



Ссылка на дополнительные материалы книги

Книга содержит основные сведения по компьютерному моделированию автоматических систем, краткое описание среды динамического моделирования технических систем *SimInTech*, методические указания к лабораторным работам и курсовому проектированию, целевое назначение которых – изучить и освоить методы компьютерного проектирования автоматических систем.

Издание предназначено для студентов технических вузов и факультетов, а также может быть рекомендовано аспирантам, научно-техническим работникам и конструкторам при создании и эксплуатации автоматических систем.

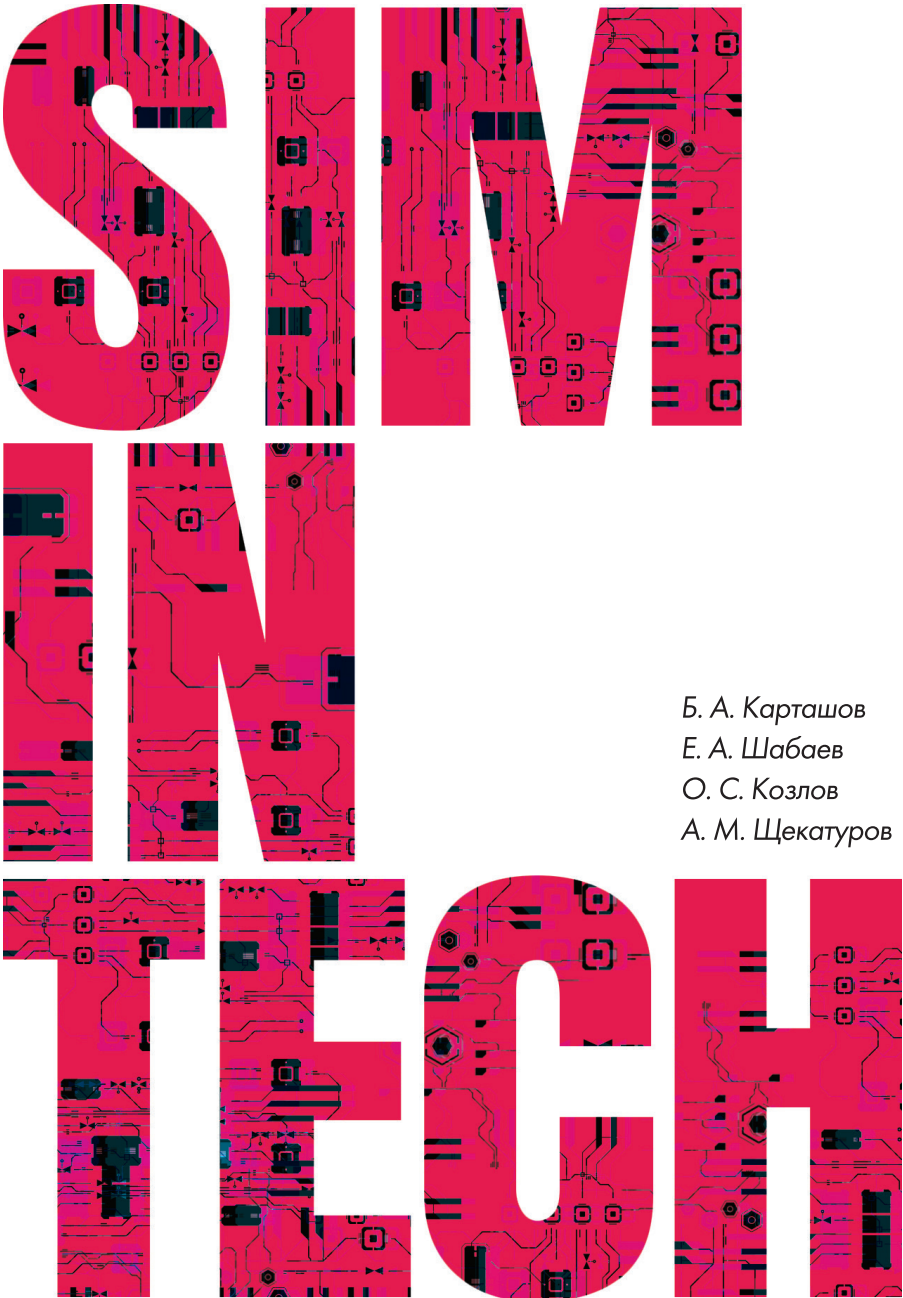


ISBN 978-5-97060-482-3



9 785970 604823 >

Среда динамического моделирования  
технических систем *SimInTech*



Б. А. Карташов  
Е. А. Шабает  
О. С. Козлов  
А. М. Щекатуров

Среда динамического  
моделирования технических  
систем *SimInTech*

Практикум по моделированию  
систем автоматического регулирования



# **Среда динамического моделирования технических систем SimInTech**

## **Практикум по моделированию систем автоматического регулирования**

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением  
в системе высшего образования по укрупненной группе  
специальностей и направлений подготовки 27.00.00  
«Управление в технических системах» в качестве учебного пособия  
для обучающихся по основным профессиональным образовательным  
программам высшего образования по всем укрупненным группам  
специальностей и направлений подготовки 27.00.00  
«Управление в технических системах»

Учебное пособие содержит сведения,  
необходимые для формирования профессиональных компетенций  
при подготовке бакалавров и магистров по направлению  
«Агроинженерия», и рекомендуется Научно-методическим советом  
по технологиям, средствам механизации и энергетическому  
оборудованию в сельском хозяйстве для использования  
в учебном процессе



Москва, 2017

УДК 681.515:004.9SimInTech(075.8)

ББК 32.965.8ся73

С75

Рецензенты:

профессор кафедры систем и технологий управления ФГАОУ ВО  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,

доктор технических наук, профессор **Ю. М. Смирнов**

заведующий лабораторией ИПМаш РАН,

доктор технических наук, профессор **А. Е. Городецкий**

профессор кафедры автоматизации и роботизации

технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина ФГБОУ ВО

«Российский государственный аграрный университет – МСХА

имени К. А. Тимирязева», доктор технических наук, профессор **Ю. А. Судник**

заведующий кафедрой электрических машин и электропривода

факультета энергетики ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ»,

доктор технических наук, профессор **С. В. Оськин**

Карташов Б. А., Шабаев Е. А., Козлов О. С., Щекатуров А. М.

С75 Среда динамического моделирования технических систем SimInTech:  
Практикум по моделированию систем автоматического регулирования. –  
М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.

ISBN 978-5-97060-482-3

Книга содержит основные сведения по компьютерному моделированию автоматических систем, краткое описание среды динамического моделирования технических систем SimInTech, методические указания к лабораторным работам и курсовому проектированию, целевое назначение которых – изучить и освоить методы компьютерного проектирования автоматических систем.

Издание предназначено для студентов технических вузов и факультетов, а также может быть рекомендовано аспирантам, научно-техническим работникам и конструкторам при создании и эксплуатации автоматических систем.

УДК 681.515:004.9SimInTech(075.8)

ББК 32.965.8ся73

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

© Карташов Б. А., Шабаев Е. А.,

Козлов О. С., Щекатуров А. М., 2017

© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2017

ISBN 978-5-97060-482-3

# Содержание

|                  |    |
|------------------|----|
| Предисловие..... | 10 |
|------------------|----|

|                |    |
|----------------|----|
| Введение ..... | 13 |
|----------------|----|

## ▼ Глава 1

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Суть и цели математического моделирования<br>систем автоматического регулирования ..... | 15 |
| 1.1. Формы представления математических моделей .....                                   | 15 |
| 1.1.1. Основные математические модели .....                                             | 15 |
| 1.1.2. Математические модели САР в пространстве состояний .....                         | 24 |
| 1.2. Математические модели внешних воздействий .....                                    | 31 |
| 1.2.1. Детерминированные воздействия .....                                              | 32 |
| 1.2.2. Случайные воздействия.....                                                       | 35 |
| 1.3. Компьютерное моделирование САР.....                                                | 38 |
| 1.3.1. Цели моделирования САР .....                                                     | 38 |
| 1.3.2. Анализ устойчивости и качества САР .....                                         | 39 |
| 1.3.3. Коррекция САР .....                                                              | 43 |
| 1.3.4. Оптимизация САР .....                                                            | 53 |
| 1.3.5. Упрощение математических моделей САР с учетом малых<br>параметров .....          | 55 |
| 1.3.6. Характеристики, режимы работы и цели моделирования<br>релейных САР .....         | 57 |
| 1.3.7. Моделирование САР с микроЭВМ.....                                                | 63 |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                     | 70 |



## ▼ Глава 2

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Основные сведения о программном обеспечении SimInTech<br>и рекомендации по его использованию ..... | 72 |
| 2.1. Принципы и методика моделирования САР .....                                                   | 72 |
| 2.2. Запуск программного обеспечения SimInTech .....                                               | 78 |
| 2.3. Командное меню главного окна .....                                                            | 79 |
| 2.4. Панели инструментов главного окна и схемных окон .....                                        | 82 |
| 2.5. Палитра компонентов .....                                                                     | 86 |
| 2.6. Краткое описание процедур и этапов работы в среде SimInTech .....                             | 88 |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                                | 89 |

## ▼ Глава 3

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Лабораторные работы .....                                                                             | 90  |
| Работа 1. Изучение ПО SimInTech на примерах моделирования<br>отдельных элементов САР .....            | 90  |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                                   | 101 |
| Работа 2. Изучение программного обеспечения SimInTech на примерах<br>моделирования линейных САР ..... | 107 |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                                   | 124 |
| Работа 3. Исследование корректирующих элементов САР .....                                             | 125 |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                                   | 134 |
| Работа 4. Параметрическая оптимизация САР .....                                                       | 134 |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                                   | 149 |
| Работа 5. Моделирование релейных САР .....                                                            | 149 |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                                   | 153 |
| Работа 6. Моделирование нелинейных САР с помощью блока Язык<br>программирования .....                 | 153 |
| Варианты индивидуальных заданий .....                                                                 | 173 |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                                   | 175 |
| Работа 7. Моделирование САР с помощью блока Переменные состояния .....                                | 175 |
| Демонстрационный пример .....                                                                         | 176 |
| Варианты индивидуальных заданий .....                                                                 | 186 |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                                   | 186 |
| Работа 8. Моделирование цифровых САР .....                                                            | 187 |
| Демонстрационный пример .....                                                                         | 187 |
| Контрольные вопросы и задания .....                                                                   | 200 |

## ▼ Глава 4

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Курсовое проектирование .....                                                                                                      | 201 |
| 4.1. Основные рекомендации для выполнения курсовой работы.....                                                                     | 201 |
| 4.1.1. Тема работы и задание.....                                                                                                  | 201 |
| 4.1.2. Содержание работы .....                                                                                                     | 202 |
| 4.1.3. Методические рекомендации по выполнению работы .....                                                                        | 202 |
| 4.1.4. Рекомендации по оформлению работы.....                                                                                      | 203 |
| 4.2. Пример выполнения курсовой работы на тему «Определение параметров типового закона регулирования САР давления в ресивере»..... | 205 |
| 4.2.1. Исходные данные.....                                                                                                        | 205 |
| 4.2.2. Определение параметров заданного типового закона регулирования .....                                                        | 209 |
| 4.2.3. Выводы по работе .....                                                                                                      | 218 |
| 4.3. Рекомендации к курсовому проектированию применительно к цифровым САР .....                                                    | 219 |
| 4.3.1. Разработка упрощенной принципиальной и составление функциональной схем САР.....                                             | 220 |
| 4.3.2. Составление структурной схемы САР .....                                                                                     | 223 |
| 4.3.3. Обоснование типа структурной модели.....                                                                                    | 225 |

## ▼ Приложение А

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| К построению структурных схем систем автоматического регулирования ..... | 231 |
| А.1. Функциональные элементы и схемы .....                               | 231 |
| А.2. Передаточные функции и структурные схемы.....                       | 233 |

## ▼ Приложение Б

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Задания по линейным системам автоматического регулирования .....                             | 241 |
| Б.1. Система автоматического регулирования температуры в помещении.....                      | 241 |
| Б.2. Система автоматического регулирования температуры в печи.....                           | 243 |
| Б.3. Система автоматического регулирования температуры теплоносителя зерносушилки.....       | 245 |
| Б.4. Система автоматического регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока ..... | 246 |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Б.5. Система автоматического регулирования частоты синхронного генератора.....                    | 248 |
| Б.6. Система автоматического регулирования температуры в атмосфере теплицы.....                   | 250 |
| Б.7. Система автоматического регулирования давления в ресивере.....                               | 252 |
| Б.8. Астатическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины.....        | 253 |
| Б.9. Статическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины.....         | 255 |
| Б.10. Система автоматического регулирования перемещения рабочего органа робота-манипулятора.....  | 257 |
| Б.11. Следящая система.....                                                                       | 259 |
| Б.12. Гидравлическая система автоматического регулирования скорости вращения паровой турбины..... | 260 |
| Б.13. Система автоматического регулирования угла крена самолета.....                              | 263 |
| Б.14. Система автоматического регулирования скорости стола обрабатывающего станка.....            | 264 |
| Б.15. Система автоматического регулирования скорости самолета.....                                | 265 |
| Б.16. Вариантные задания.....                                                                     | 265 |

## ▼ Приложение В

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Задания по нелинейным и дискретным системам автоматического регулирования.....                              | 269 |
| В.1. Релейная система автоматического регулирования температуры в помещении.....                            | 269 |
| В.2. Релейная система автоматического регулирования температуры в печи.....                                 | 270 |
| В.3. Релейная система автоматического регулирования температуры теплоносителя зерносушилки.....             | 271 |
| В.4. Релейная система автоматического регулирования угловой скорости электродвигателя постоянного тока..... | 271 |
| В.5. Нелинейная система автоматического регулирования частоты синхронного генератора.....                   | 272 |
| В.6. Релейная система автоматического регулирования температуры в атмосфере теплицы.....                    | 272 |
| В.7. Релейная система автоматического регулирования давления в ресивере.....                                | 273 |
| В.8. Нелинейная астатическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины.....       | 274 |
| В.9. Релейная статическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины.....          | 274 |
| В.10. Дискретная система автоматического регулирования температуры в помещении.....                         | 275 |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| В.11. Дискретная система автоматического регулирования температуры в печи.....                              | 276 |
| В.12. Дискретная система автоматического регулирования температуры<br>теплоносителя зерносушилки .....      | 276 |
| В.13. Дискретная система автоматического регулирования угловой<br>скорости двигателя постоянного тока ..... | 277 |
| В.14. Дискретная система автоматического регулирования частоты<br>синхронного генератора.....               | 278 |
| В.15. Дискретная система автоматического регулирования температуры<br>в атмосфере теплицы .....             | 280 |
| В.16. Дискретная система автоматического регулирования давления<br>в ресивере .....                         | 281 |
| В.17. Дискретная система автоматического регулирования угловой<br>скорости гидротурбины .....               | 282 |
| В.18. Вариантные задания .....                                                                              | 283 |

## ▼ Приложение Г

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Описание объектов регулирования .....                                                               | 286 |
| Г.1. Производственное помещение как объект автоматического регулирования .....                      | 286 |
| Г.2. Обогреваемый пол как объект автоматического регулирования .....                                | 288 |
| Г.3. Звено робота с электрическим приводом как объект автоматического<br>регулирования .....        | 289 |
| Г.4. Шахтная зерносушилка как объект автоматического регулирования .....                            | 291 |
| Г.5. Поворотное устройство солнечной батареи как объект автоматического<br>регулирования .....      | 295 |
| Г.6. Силовой трансформатор как объект автоматического регулирования .....                           | 299 |
| Г.7. Электрический привод патрона токарного станка как объект<br>автоматического регулирования..... | 300 |
| Г.8. Подогреватель мазута как объект автоматического регулирования.....                             | 302 |
| Г.9. Мармитная плита как объект автоматического регулирования .....                                 | 303 |
| Г.10. Электрический вулканизатор как объект автоматического регулирования .....                     | 304 |

## ▼ Приложение Д

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| К моделированию САР с микроЭВМ.....                                                   | 305 |
| Д.1. Принципы построения и работы САР с микроЭВМ .....                                | 305 |
| Д.2. Математическое описание дискретных систем автоматического<br>регулирования ..... | 310 |
| Д.2.1. Понятие импульсной и цифровой систем .....                                     | 310 |
| Д.2.2. Математическое описание импульсных систем.....                                 | 312 |

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Д.2.3. Математическое описание цифровых систем.....                                                          | 319 |
| Д.2.4. Определение периода квантования непрерывных сигналов<br>в цифровых системах .....                     | 325 |
| Д.3. Математическое описание систем автоматического регулирования<br>с микропроцессорными регуляторами ..... | 329 |
| Д.3.1. Общие сведения.....                                                                                   | 329 |
| Д.3.2. Алгоритмы функционирования регуляторов ТРМ.....                                                       | 335 |
| Д.3.3. Математическое описание САР с регуляторами ТРМ.....                                                   | 337 |
| Д.4. Регулирующие микропроцессорные контроллеры.....                                                         | 340 |
| Д.4.1. Контроллеры Ремиконт Р-130 .....                                                                      | 340 |
| Д.4.2. Контроллеры Ремиконт Р-130ISa.....                                                                    | 342 |

## ▼ Приложение Е

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Задания для самоконтроля и тестирования.....                  | 343 |
| Е.1. Линейная САР с единичной ОС .....                        | 343 |
| Е.2. Скорректированная линейная САР с единичной ОС .....      | 343 |
| Е.3. Линейная САР температуры в атмосфере теплицы .....       | 345 |
| Е.4. Нелинейная САР с единичной ОС.....                       | 346 |
| Е.5. Релейная САР температуры проточного водонагревателя..... | 347 |
| Е.6. Оптимизация нелинейной САР с несколькими ОС.....         | 348 |
| Е.7. Линейная САР (вариант 1).....                            | 349 |
| Е.8. Линейная САР (вариант 2) .....                           | 351 |
| Е.9. Линейная САР (вариант 3) .....                           | 352 |
| Е.10. Линейная САР (вариант 4).....                           | 353 |
| Е.11. Линейная САР (вариант 5).....                           | 354 |
| Е.12. Линейная САР (вариант 6).....                           | 355 |
| Е.13. Линейная САР (вариант 7).....                           | 357 |
| Е.14. Линейная САР (вариант 8).....                           | 358 |
| Е.15. Линейная САР (вариант 9).....                           | 359 |
| Е.16. Линейная САР (вариант 10) .....                         | 360 |
| Е.17. Линейная САР (вариант 11).....                          | 362 |
| Е.18. Линейная САР (вариант 12).....                          | 363 |
| Е.19. Линейная САР (вариант 13).....                          | 364 |
| Е.20. Линейная САР (вариант 14).....                          | 365 |
| Е.21. Линейная САР (вариант 15).....                          | 366 |
| Е.22. Линейная САР (вариант 16).....                          | 368 |
| Е.23. Линейная САР (вариант 17).....                          | 369 |
| Е.24. Линейная САР (вариант 18).....                          | 370 |
| Е.25. Линейная САР (вариант 19).....                          | 372 |
| Е.26. Линейная САР (вариант 20) .....                         | 373 |

## ▼ Приложение Ж

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| Фрагменты библиотек SimInTech.....   | 375 |
| Ж.1. Библиотека «Источники» .....    | 375 |
| Ж.2. Библиотека «Операторы» .....    | 378 |
| Ж.3. Библиотека «Динамические» ..... | 381 |
| Ж.4. Библиотека «Нелинейные» .....   | 389 |
| Ж.5. Библиотека «Субструктуры» ..... | 396 |
| Ж.6. Библиотека «Данные» .....       | 400 |
| Ж.7. Библиотека «Дискретные» .....   | 405 |

## ▼ Приложение З

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Дополнения к лабораторным работам .....                                                                                   | 408 |
| 3.1. Дополнение к лабораторной работе 6. Блок Язык программирования<br>как алгоритмическое средство программирования..... | 408 |
| Пример 1. Моделирование поступательного движения тела с учетом<br>силы сухого трения.....                                 | 409 |
| Пример 2. Моделирование процесса одномерной теплопроводности.....                                                         | 412 |
| 3.2. Дополнение к лабораторной работе 8. Моделирование цифровых САР<br>с учетом дискретизации сигналов в АЦП.....         | 416 |
| Литература.....                                                                                                           | 422 |

# Предисловие

Учебными программами по дисциплинам, изучающим автоматику, теорию автоматического управления и регулирования, наряду с теоретическим обучением предусматривается практическое изучение автоматических систем на реальных образцах и макетах, а также на основе математических моделей, реализуемых с помощью современных компьютерных прикладных программ. Такие программные средства способствуют оптимизации образовательного процесса как с целью непосредственного освоения методов теории автоматических систем, так и с целью приобретения практических навыков автоматизированного проектирования автоматических устройств и систем на их основе. К их числу относятся высокоэффективные как зарубежные (Simulink, Skilab, MATRIX, VisSim, LabVIEW и др.), так и отечественные (МИК, ПА 9, CLASSIC, MBTU, SimInTech и др.) системы автоматизации динамических расчетов (САДР).

В силу сложившихся обстоятельств в отечественной высшей школе в настоящее время доминируют преимущественно зарубежные программы. Они успешно используются многими российскими вузами в учебном процессе и активно продвигаются на отечественный рынок программных средств (так, например, торговая сеть технической литературы буквально «наводнена» различными учебными изданиями по пакету Simulink; подобная ситуация имеет место и по многим другим зарубежным программам). Применение зарубежных программных средств, при наличии отечественных альтернативных программ, противоречит наметившейся в последнее время тенденции импортозамещения в различных отраслях народно-хозяйственной деятельности РФ, в том числе и в области информационных технологий в части программного обеспечения (ПО). В этой связи следует особо отметить, что многие ведущие отечественные университеты, можно сказать, предвосхитили возникшую в настоящее время проблему импортозамещения в области ПО. Ими к концу прошлого века были созданы программы визуального программирования с русскоязычной справочной системой и удобным для отечественных пользователей интерфейсом, не уступающие по своим функциональным возможностям и характеристикам зарубежным аналогам. К числу таких программ относятся перечисленные выше отечественные программы. Из них особого внимания заслуживает программное обеспечение «Среда динамического моделирования технических систем SimInTech» (называемого далее по тексту учебного пособия как ПО SimInTech, среда SimInTech или SimInTech), разработанное коллективом



ученых и выпускников Московского государственного технического университета (МГТУ) им. Н. Э. Баумана и ООО «3В Сервис» ([www.3v-services.com](http://www.3v-services.com)). По своей идеологии построения и основной сущности среда SimInTech является программным средством, создание которого и его широкое внедрение в отечественную высшую школу и научно-техническую сферу под названием программный комплекс «Моделирование в технических устройствах» (ПК МВТУ) были начаты в начале 90-х годов прошлого столетия. Название SimInTech является сокращением от перевода на английский язык оригинального названия ПК МВТУ (Моделирование В Технических Устройствах, Simulation In Technic).

Являясь альтернативой зарубежным аналогам, ПО SimInTech позволяет рассчитывать, моделировать, исследовать и синтезировать различные технические устройства (механические, гидравлические, теплотехнические, электротехнические и др., в том числе средства и системы автоматики). Вся необходимая сопроводительная документация, методическое обеспечение и исчерпывающая справочная контекстная система SimInTech выполнена на русском языке, что для многих российских пользователей снимает языковой барьер, который имеет место при освоении и использовании таких программ, как Simulink и др., с англоязычным методическим и справочным сопровождением.

Визуальные, интерактивные средства программирования, используемые в среде SimInTech, сопроводительная документация и методическое обеспечение, отличающиеся «прозрачностью» и доступностью для понимания, позволяют пользователю, при наличии элементарных навыков работы в среде операционной системы Windows, за кратчайший срок изучить его и успешно работать в его среде. Программное обеспечение SimInTech совместимо с ОС «Гослинукс», являющейся дистрибутивом сертифицированной в России свободно и открыто распространяемой операционной системы Linux, что немаловажно при необходимости перехода с ОС Windows на ОС Linux.

На основе изложенного выше, учитывая многолетний позитивный опыт применения различных версий ПК МВТУ (в учебном процессе и научных исследованиях многих вузов России и стран СНГ), а также положительные результаты проектных работ, выполненных ООО «3В Сервис», ОАО «Гипротрубопровод» и др. на основе SimInTech [1–3], авторский коллектив посчитал целесообразным его применение в качестве программного обеспечения для учебного пособия. Использована версия 1.6.0.1 ПО SimInTech, подробная информация о котором размещена на официальном сайте [simintech.ru](http://simintech.ru).

Для изучения методов математического моделирования автоматических систем, предусмотренных рамками учебного пособия, достаточно знать принципы работы и основные положения теории систем автоматического регулирования, а также, как отмечалось ранее, иметь навыки работы в среде ОС Windows.

Глава 1 содержит последовательное взаимосвязанное описание форм представления математических моделей САР в виде систем дифференциальных и алгебраических уравнений, передаточных функций, структурных схем и в пространстве состояний на конкретных примерах автоматических систем. Рассмотрены цели

и суть компьютерного моделирования САР. Кратко изложены методики анализа устойчивости, качества, коррекции и параметрической оптимизации систем регулирования применительно к их компьютерному моделированию.

В главе 2 приводятся основные сведения о SimInTech, принципы и методика моделирования САР в этой среде, а также практические рекомендации по использованию данного программного обеспечения.

В главе 3 представлено методическое обеспечение цикла лабораторных работ применительно к системам автоматического регулирования (линейным, нелинейным импульсным и цифровым). В результате выполнения этого цикла приобретаются навыки работы в среде SimInTech и закрепляются знания основных положений теории автоматического регулирования.

Глава 4 содержит методическое обеспечение курсового проектирования на основе ПО SimInTech.

Пособие дополняют 9 приложений (одно из них в электронном виде), включающих в себя необходимый справочный материал, варианты индивидуальных заданий для лабораторных работ и курсового проектирования, тестирующие задания и др. Многовариантность заданий этих приложений позволяет повысить эффективность учебного процесса посредством обязательного выполнения индивидуальных заданий каждым обучающимся.

Отдельное электронное приложение «Интерактивные структурные модели» с разработанными моделями в среде SimInTech, которые использованы в учебном пособии, размещено на официальных сайтах издательства «ДМК Пресс» (<http://dl.dmkpress.com/978-5-97060-482-3.zip>) и ООО «ЗВ Сервис» (<http://simintech.ru/books/978-5-97060-482-3.zip>).

Учебное пособие является результатом коллективного труда сотрудников ООО «ЗВ Сервис» (А. М. Щекатуров), МГТУ им. Н. Э. Баумана (О. С. Козлов), АЧИИ (Б. А. Карташов, Е. А. Шабаетов).

Успешная реализация проекта разработки данного учебного пособия не была бы возможна без помощи, поддержки и одобрения специалистов в области автоматического управления и информационных технологий. В связи с этим авторы считают своим долгом выразить признательность коллективу ООО «ЗВ Сервис», предложившему идею проекта, за поддержку на всех этапах его выполнения и в частности его куратору А. Н. Петухову за организационно-методологическую помощь и содействие в издании книги. Авторы благодарны профессорам: А. Е. Городецкому, С. В. Оськину, Ю. М. Смирнову, Ю. А. Суднику за рецензирование учебного пособия, полезные замечания и рекомендации которых были учтены при его окончательном редактировании, а также генеральному директору ПО «ОВЕН» Д. В. Крашенинникову за предоставленную возможность использования материалов официального сайта [www.owen.ru](http://www.owen.ru).

# Введение

Одно из центральных мест в автоматике, наряду с системами логического управления (СЛУ), занимают замкнутые системы управления с обратными связями, называемые системами автоматического регулирования (САР). Им присущи два режима работы – динамический (переходный) и статический (установившийся), которые могут иметь устойчивые или неустойчивые (не пригодные для работы системы) переходные процессы. В связи с этим одной из задач, решаемой при проектировании новых и эксплуатации действующих САР, является их исследование на устойчивость. Помимо требования устойчивости, любая САР должна обладать определенными показателями качества процесса регулирования, удовлетворяющими требованиям технологического процесса. Поэтому исследование качества САР является следующей задачей при их создании и эксплуатации. Если в процессе решения этих задач, относящихся в теории автоматического регулирования к так называемому разделу «Анализ САР», получены неудовлетворительные результаты (система оказалась неустойчивой или имеет неудовлетворительные показатели качества), то приходится решать еще третью задачу – задачу из раздела «Синтез САР». При решении задачи синтеза систему дополняют корректирующими элементами с определенной структурой и посредством их параметрической оптимизации достигают выполнения условия устойчивости САР и желаемых показателей качества процессов регулирования. Для решения задач анализа и синтеза систем классическая теория автоматического управления и регулирования располагает достаточно обширным арсеналом эффективных аналитических и графоаналитических методов и подходов [4–6]. В последние десятилетия для решения этих задач широко применяют технологии, ориентированные на использование методов компьютерного моделирования. Их использование позволяет автоматизировать проектирование САР, упростить наладку систем в эксплуатационных условиях, существенно сократив при этом временные и интеллектуальные затраты. В основу таких компьютерных технологий положены высокоэффективные прикладные программы, о которых говорилось в предисловии. Эти программы удобны, просты в использовании и не требуют от пользователя специальной подготовки программиста. Для практического решения задач анализа и синтеза САР на их основе достаточно определенного минимума знаний по теории систем автоматического регулирования в объеме главы 1 и приложений А и Д учебного пособия.

Обобщенная сущность компьютерного моделирования САР с учетом методологии учебного пособия заключается в следующем:

- на первом этапе составляют математическую модель системы (математическое описание) в виде одной из форм, рассмотренных в п. 1.1;
- на втором этапе, руководствуясь целями решаемой задачи, реализуют эту модель посредством компьютера в среде SimInTech.

# Суть и цели математического моделирования систем автоматического регулирования



## 1.1. Формы представления математических моделей

### 1.1.1. Основные математические модели

Математическое моделирование технических систем, в том числе САУ и САР, базируется на математических моделях. Под термином **математическая модель** понимается записанная в форме математических соотношений совокупность знаний, представлений и гипотез о технической системе.

Первичной (исходной) формой представления математической модели (математическим описанием) любой САР является система дифференциальных и алгебраических уравнений, отображающих динамические свойства объекта регулирования и элементов системы (регулятора). Эти уравнения могут быть определены *аналитически* на основе законов физики, положенных в основу работы объекта регулирования и элементов системы, или *экспериментально* с использованием методов активного или пассивного эксперимента.

Аналитический метод определения математических моделей автоматических систем рассмотрим на примере простейшей САР температуры в камере для термической обработки деталей механизмов и машин при их производстве, которая представлена на рис. 1.1, где: 1 – термическая камера; 2 – термopapa; 3 – детали, подлежащие термической обработке; 4 – нагревательный элемент; 5 – исполнительный орган – тиристорный регулятор напряжения; 6 – силовой блок; 7 – блок управления тиристорами; 8 – электронный усилитель постоянного тока; 9 – задающий резистор; ОР – объект регулирования; РО – регулирующий орган; ИО – исполнительный орган; УО – усилительный орган; СО – сравнивающий орган; ЗО – задающий орган; ВО – воспринимающий орган.

Объектом регулирования в данной САР является термическая камера с размещенными в ней деталями. Регулируемая величина – температура в камере  $\theta_k$  – зависит от возмущающего воздействия – температуры окружающей среды  $\theta_o$ . Величину  $\theta_k$  можно регулировать, изменяя регулирующее воздействие – температуру нагревательного элемента  $\theta_n$ .

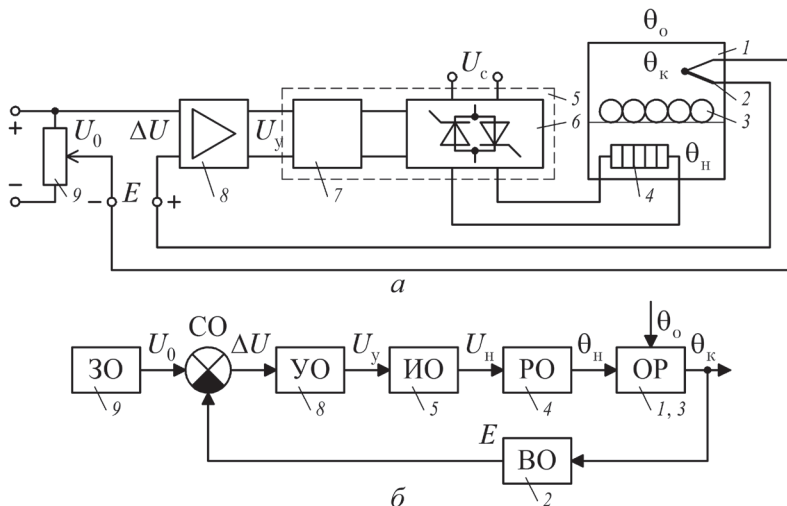


Рис. 1.1. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы САР температуры в термической камере

Данная САР работает следующим образом. Для измерения температуры в термической камере 1 имеется термопара 2, сигнал которой – ЭДС  $E$  сравнивается с задающим (опорным) сигналом  $U_0$ . Изменяя опорное напряжение  $U_0$  с помощью резистора 9, подключенного к стабилизированному источнику постоянного тока, задают необходимую температуру в камере. При этом входные и выходные величины элементов САР ( $\Delta U = U_0 - E$ ;  $U_y$ ;  $U_n$ ;  $\theta_n$ ) будут иметь определенные значения, соответствующие заданному значению температуры.

Если, например, внешнее возмущение – температура окружающей среды  $\theta_o$  уменьшилась, то снизится и температура  $\theta_k$  внутри термической камеры. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению сигнала термопары  $E$  и к росту сигнала рассогласования  $\Delta U = U_0 - E$ , что вызовет увеличение напряжения  $U_n$  на нагревательном элементе, выделяемой им мощности  $P_n$  и его температуры  $\theta_n$ . Увеличение последней приведет к росту температуры  $\theta_k$  до заданного значения. Увеличение температуры окружающей среды  $\theta_o$ , по аналогии с изложенным выше, вызовет обратный эффект (увеличение  $\theta_k$ ,  $E$  и уменьшение  $U_y$ ;  $U_n$ ;  $\theta_n$ ).

Задача построения математической модели данной САР состоит в определении уравнений, отображающих взаимосвязи выходных и входных величин объекта регулирования и элементов системы в динамическом режиме.

В динамическом режиме работы любой САР регулируемая величина, а также входные и выходные величины изменяются во времени  $t$ . Поэтому все рассмотренные ранее величины применительно к САР (см. рис. 1.1) будут переменными во времени, и их следует записывать так:  $\theta_o(t)$ ,  $\theta_n(t)$ ,  $\theta_k(t)$ ,  $E(t)$ ,  $\Delta U(t)$ ,  $U_y(t)$ ,  $U_n(t)$ . Для упрощения записи допускается изображение переменных величин без указания времени  $t$ , что и будет использовано при дальнейшем изложении.

Математическую модель объекта регулирования (термической камеры совместно с деталями) определяют на основе уравнения теплового баланса:

$$C_{\kappa} m_{\kappa} \frac{d\theta_{\kappa}}{dt} = \Phi_{\text{пк}} - \Phi_{\text{ок}}, \quad (1.1)$$

где  $C_{\kappa}$  – усредненная теплоемкость, определяемая теплоемкостью воздуха внутри камеры и деталей;

$m_{\kappa}$  – усредненная масса, определяемая массами воздуха и деталей;

$\Phi_{\text{пк}}$  – поток теплоты, поступающий в камеру от нагревательного элемента;

$\Phi_{\text{ок}}$  – поток теплоты, отводимый из камеры через стенки в окружающую среду.

Поток теплоты, поступающий в камеру от нагревателя:

$$\Phi_{\text{пк}} = \alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} (\theta_{\text{н}} - \theta_{\kappa}), \quad (1.2)$$

где  $\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент теплоотдачи нагревательного элемента;

$F_{\text{н}}$  – площадь поверхности нагревательного элемента.

Поток теплоты, отводимый из камеры:

$$\Phi_{\text{ок}} = \alpha_{\text{о}} F_{\text{о}} (\theta_{\kappa} - \theta_{\text{о}}), \quad (1.3)$$

где  $\alpha_{\text{о}}$  – коэффициент теплоотдачи ограждения (стенок) камеры;

$F_{\text{о}}$  – площадь теплоотдающей поверхности стенок камеры.

С учетом формул (1.2) и (1.3) уравнение (1.1) после несложных преобразований примет вид:

$$\frac{C_{\kappa} m_{\kappa}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} + \alpha_{\text{о}} F_{\text{о}}} \frac{d\theta_{\kappa}}{dt} + \theta_{\kappa} = \frac{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} + \alpha_{\text{о}} F_{\text{о}}} \theta_{\text{н}} + \frac{\alpha_{\text{о}} F_{\text{о}}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} + \alpha_{\text{о}} F_{\text{о}}} \theta_{\text{о}},$$

или

$$C_{\kappa} \frac{d\theta_{\kappa}}{dt} + \theta_{\kappa} = k_{\kappa} \theta_{\text{н}} + k_{\text{о}} \theta_{\text{о}}. \quad (1.4)$$

Постоянную времени  $T_{\kappa}$  камеры и коэффициенты передачи  $k_{\kappa}$  и  $k_{\text{о}}$  определяют по формулам:

$$C_{\kappa} = \frac{C_{\kappa} m_{\kappa}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} + \alpha_{\text{о}} F_{\text{о}}}; \quad k_{\kappa} = \frac{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} + \alpha_{\text{о}} F_{\text{о}}}; \quad k_{\text{о}} = \frac{\alpha_{\text{о}} F_{\text{о}}}{\alpha_{\text{н}} F_{\text{н}} + \alpha_{\text{о}} F_{\text{о}}}.$$

Математическая модель регулирующего органа (нагревательного элемента) определяется по аналогии с изложенным ранее на основе уравнения теплового баланса:

$$C_{\text{н}} m_{\text{н}} \frac{d\theta_{\text{н}}}{dt} = P_{\text{н}} - \Phi_{\text{пк}}, \quad (1.5)$$

где  $C_{\text{н}}$  и  $m_{\text{н}}$  – соответственно удельная теплоемкость и масса нагревательного элемента;

$P_{\text{н}}$  – мощность нагревательного элемента.

С учетом формулы (1.2) уравнение (1.5) после соответствующих преобразований примет вид:

$$\frac{C_n m_n}{\alpha_n F_n} \frac{d\theta_n}{dt} + \theta_n = \frac{P_n}{\alpha_n F_n} + \theta_k. \quad (1.6)$$

Вводя обозначения  $T_n = C_n m_n / (\alpha_n F_n)$  и  $k_n = 1 / (\alpha_n F_n)$ , уравнение (1.5) можно окончательно записать так:

$$T_n \frac{d\theta_n}{dt} + \theta_n = k_n P_n + \theta_k, \quad (1.7)$$

где  $T_n$  и  $k_n$  – соответственно постоянная времени и коэффициент передачи нагревательного элемента.

Мощность нагревательного элемента:

$$P_n = U_n^2 / R, \quad (1.8)$$

где  $U_n$  – напряжение на нагревательном элементе;

$R$  – активное сопротивление нагревательного элемента.

Таким образом, динамика нагревательного элемента описывается уравнениями (1.7) и (1.8).

Для получения **математической модели** (дифференциального уравнения) **воспринимающего органа** (термопары) запишем уравнение теплового баланса:

$$C_t m_t \frac{d\theta_t}{dt} = \Phi_{пт}, \quad (1.9)$$

где  $C_t$  и  $m_t$  – соответственно удельная теплоемкость и масса термопары;

$\theta_t$  – температура термопары;

$\Phi_{пт}$  – поток теплоты, поступающий к термопаре из воздушного пространства камеры.

Поток теплоты:

$$\Phi_{пт} = \alpha_t F_t (\theta_k - \theta_t), \quad (1.10)$$

где  $\alpha_t$  – коэффициент теплоотдачи от воздуха к термопаре;

$F_t$  – площадь поверхности термопары.

С учетом (1.10) уравнение (1.9) примет вид:

$$C_t m_t \frac{d\theta_t}{dt} + \alpha_t F_t \theta_t = \alpha_t F_t \theta_k. \quad (1.11)$$

Вводим обозначение:

$$T_t = \frac{C_t m_t}{\alpha_t F_t},$$

где  $T_t$  – постоянная времени термопары.

Тогда уравнение теплового баланса окончательно запишем так:

$$T_t \frac{d\theta_t}{dt} + \theta_t = \theta_k. \quad (1.12)$$



Это уравнение отображает только термический процесс в термопаре. По условию же задачи необходимо определить взаимосвязь температуры в камере  $\theta_k$  с ЭДС термопары  $E$ . Зависимость ЭДС термопары от ее температуры  $\theta_T$  можно приближенно описать так:

$$E = k_T \theta_T, \quad (1.13)$$

где  $k_T$  – коэффициент, определяемый по графику градуировочной (статической) характеристики термопары (рис. 1.2) как отношение приращений  $\Delta E$  к  $\Delta \theta_T$  в рабочей зоне:  
 $k_T = \Delta E / \Delta \theta_T$ .

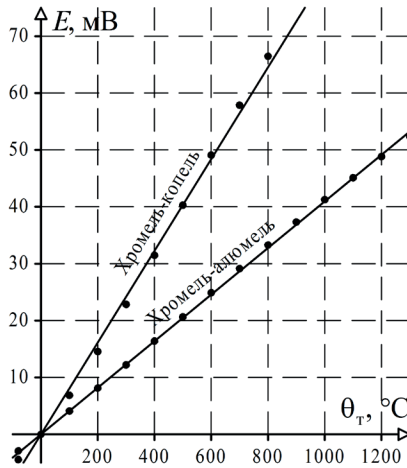


Рис. 1.2. Градуировочные характеристики термопар

Исключая в уравнениях (1.12) и (1.13) промежуточную переменную  $\theta_T$  и учитывая, что

$$\theta_T = \frac{1}{k_T} E, \quad \frac{d\theta_T}{dt} = \frac{1}{k_T} \frac{dE}{dt},$$

получим окончательно дифференциальное уравнение термопары:

$$T_T \frac{d}{dt} + E = k_T \theta_k. \quad (1.14)$$

Следует подчеркнуть, что при определении математических моделей термической камеры, нагревательного элемента и термопары использован один физический принцип (закон) теплотехники – принцип теплового баланса. Это обусловлено тем, что работа (физическая суть) камеры, нагревателя и термопары основана на тепловых процессах.

Остальные элементы рассматриваемой САР (см. рис. 1.1) – тиристорный регулятор напряжения (ИО) и электронный усилитель (УО) – являются электротехническими устройствами. Их математические модели можно определить на основе законов электротехники. Эти элементы относятся к электронным устройствам,

в которых входные сигналы передаются на выход практически без каких-либо временных задержек, так как ток в них создается за счет электронов и «дырок», обладающих сверхмалой массой. Поэтому математические модели тиристорного регулятора напряжения (усилителя) и электронного усилителя описываются соответственно следующими алгебраическими уравнениями:

$$U_n = k_{тр} U_y; U_y = k_э \Delta U, \quad (1.15)$$

где  $k_{тр}$  и  $k_э$  – коэффициенты усиления соответственно тиристорного регулятора и электронного усилителя.

Вывод уравнений (1.15), выполненный на основе законов Кирхгофа, можно найти в любом учебнике по электронике.

Таким образом, с учетом зависимости  $\Delta U = U_0 - E$ , отображающей обратную связь в системе, на основе уравнений (1.4), (1.7), (1.8), (1.14) и (1.15) **математическая модель САР температуры** в термической камере может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} T_k \frac{d\theta_k}{dt} + \theta_k = k_k \theta_n + k_o \theta_o; \\ T_t \frac{d}{dt} + E = k_t \theta_k; \\ \Delta U = U_0 - E; \\ U_y = k_э \Delta U; \\ U_n = k_{тр} U_y; \\ P_n = U_n^2 / R; \\ T_n \frac{d\theta_n}{dt} + \theta_n = k_n P_n + \theta_k. \end{cases} \quad (1.16)$$

Анализ системы уравнений (1.16) показывает, что рассматриваемая САР нелинейная. Ее нелинейность обусловлена наличием нелинейного алгебраического уравнения (1.8). Это уравнение можно привести к линеаризованному виду, используя известные в теории автоматического регулирования методы линеаризации [6–9], основываясь на следующих рассуждениях.

Рассматриваемая система стабилизации температуры в термической камере (см. рис. 1.1) предназначена для поддержания температуры в камере  $\theta_k$  на заданном уровне. При работе системы величина  $\theta_k$  изменяется в пределах малых отклонений  $\pm \Delta \theta_k$  относительно заданного значения. В пределах малых отклонений будут изменяться также все входные и выходные величины элементов САР, в том числе и напряжение  $U_n$  на нагревательном элементе и его мощность  $P_n$  соответственно относительно значений  $U_{н0}$  и  $P_{н0}$  (здесь  $U_{н0}$  и  $P_{н0}$  – напряжение на нагревательном элементе и его мощность, соответствующие установившемуся заданному значению температуры в камере).

Для линеаризации уравнения (1.8) воспользуемся аналитическим методом линеаризации, разложив его в ряд Тейлора, при  $U_{\text{н}} = U_{\text{н0}}$ :

$$P_{\text{н}} = P_{\text{н0}} + \left( \frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} \right)_{U_{\text{н}}=U_{\text{н0}}} \frac{(U_{\text{н}} - U_{\text{н0}})}{1!} + \left( \frac{d^2 P_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}^2} \right)_{U_{\text{н}}=U_{\text{н0}}} \frac{(U_{\text{н}} - U_{\text{н0}})^2}{2!} + \\ + \left( \frac{d^3 P_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}^3} \right)_{U_{\text{н}}=U_{\text{н0}}} \frac{(U_{\text{н}} - U_{\text{н0}})^3}{3!} + \dots$$

Пренебрегая нелинейными членами ряда ввиду их малости, получим:

$$P_{\text{н}} - P_{\text{н0}} = \left( \frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} \right)_{U_{\text{н}}=U_{\text{н0}}} \frac{(U_{\text{н}} - U_{\text{н0}})}{1!}.$$

Так как  $P_{\text{н}} - P_{\text{н0}} = \Delta P_{\text{н}}$ , а  $U_{\text{н}} - U_{\text{н0}} = \Delta U_{\text{н}}$ , то линеаризованное уравнение в пределах малых отклонений мощности  $\Delta P_{\text{н}}$  и напряжения  $\Delta U_{\text{н}}$  можно записать в следующем виде:

$$\Delta P_{\text{н}} = k_{\text{р}} \Delta U_{\text{н}}. \quad (1.17)$$

Для определения  $k_{\text{р}}$  возьмем производную от исходной функции (1.8):

$$\frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} = \frac{d(U_{\text{н}}^2/R)}{dU_{\text{н}}} = \frac{2U_{\text{н}}}{R}. \quad (1.18)$$

Подставив в это выражение  $U_{\text{н}} = U_{\text{н0}}$ , получим:

$$k_{\text{р}} = \left( \frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} \right)_{U_{\text{н}}=U_{\text{н0}}} = \frac{2U_{\text{н0}}}{R}. \quad (1.19)$$

С учетом выражения (1.19) линеаризованное уравнение мощности нагревательного элемента (1.17) примет вид:

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{2U_{\text{н0}}}{R} \Delta U_{\text{н}}. \quad (1.20)$$

Таким образом, нелинейную модель САР (1.16) с учетом уравнения (1.17) можно рассматривать как линеаризованную математическую модель.

Известно [6–11], что линейные и линеаризованные математические модели САР в виде дифференциальных и алгебраических уравнений могут быть представлены соответствующими им передаточными функциями (подробно о передаточных функциях см. п. А.2 приложения А). Для рассматриваемой САР передаточные функции, полученные в результате преобразования уравнений (1.4), (1.7), (1.14), (1.15), (1.17) по Лапласу при нулевых начальных условиях, примут вид:

- передаточная функция камеры по регулирующему воздействию:

$$W_{\text{кр}}(s) = \frac{\theta_{\text{к}}(s)}{\theta_{\text{н}}(s)} = \frac{k_{\text{к}}}{T_{\text{к}}s + 1};$$

- передаточная функция камеры по возмущающему воздействию:

$$W_{\text{кв}}(s) = \frac{\theta_{\text{к}}(s)}{\theta_{\text{о}}(s)} = \frac{k_{\text{о}}}{T_{\text{к}}s + 1};$$

- передаточная функция термопары:

$$W_{\text{т}}(s) = \frac{E(s)}{\theta_{\text{к}}(s)} = \frac{k_{\text{т}}}{T_{\text{т}}s + 1};$$

- передаточная функция нагревателя по каналу мощности  $P$ :

$$W_{\text{н1}}(s) = \frac{\theta_{\text{н}}(s)}{P_{\text{н}}(s)} = \frac{k_{\text{н}}}{T_{\text{н}}s + 1};$$

- передаточная функция нагревателя по каналу температуры  $\theta_{\text{к}}$ :

$$W_{\text{н2}}(s) = \frac{\theta_{\text{н}}(s)}{\theta_{\text{к}}(s)} = \frac{1}{T_{\text{н}}s + 1};$$

- передаточная функция, соответствующая линеаризованному уравнению (1.17):

$$W_{\text{р}}(s) = \frac{\Delta P(s)}{\Delta U_{\text{н}}(s)} = k_{\text{р}};$$

- передаточная функция электронного усилителя:

$$W_{\text{у}}(s) = \frac{U_{\text{у}}(s)}{\Delta U(s)} = k_{\text{у}};$$

- передаточная функция тиристорного регулятора напряжения:

$$W_{\text{тр}}(s) = \frac{U_{\text{н}}(s)}{U_{\text{у}}(s)} = k_{\text{тр}},$$

где  $\theta_{\text{к}}(s)$ ,  $\theta_{\text{н}}(s)$ ,  $\theta_{\text{о}}(s)$ ,  $E(s)$ ,  $P_{\text{н}}(s)$ ,  $\Delta P_{\text{н}}(s)$ ,  $U_{\text{н}}(s)$ ,  $\Delta U_{\text{н}}(s)$ ,  $U_{\text{у}}(s)$ ,  $\Delta U(s)$  – изображения по Лапласу соответственно температуры в камере  $\theta_{\text{к}}$ , нагревателя  $\theta_{\text{н}}$ , окружающей атмосферы  $\theta_{\text{о}}$ , ЭДС  $E$  термопары, мощности  $P_{\text{н}}$  и ее отклонения  $\Delta P_{\text{н}}$ , напряжения  $U_{\text{н}}$  и его отклонения  $\Delta U_{\text{н}}$ , напряжения  $U_{\text{у}}$  и сигнала рассогласования  $\Delta U$  при нулевых начальных условиях.

Интерпретация математических моделей автоматических систем совокупностью передаточных функций объекта регулирования и элементов регулятора позволяет представлять математические модели САР графически в виде структурных схем [6–11], которые достаточно просто составить на основе заданных функциональных схем и передаточных функций (подробно о структурных схемах см. в п. А.2 приложения А). Применительно к рассматриваемому примеру структурная схема САР (см. рис. 1.1) в соответствии с ее функциональной схемой и приведенными выше передаточными функциями будет иметь вид, показанный на рис. 1.3.

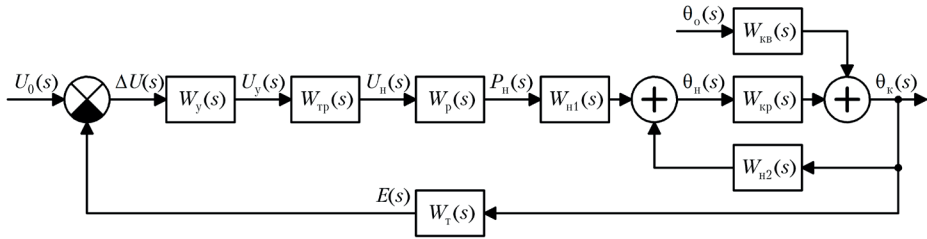


Рис. 1.3. Структурная схема линейризованной САР температуры в термической камере

На структурных схемах вместо изображений переменных (входных и выходных величин) допускается указывать их оригиналы, что существенно повышает их дидактичность и физическую наглядность.

Если математический аппарат передаточных функций применим только для линейных и линейризованных САР, то графические представления динамических свойств автоматических систем с использованием структурных схем можно использовать также для любых нелинейных САР. На структурных схемах можно отображать нелинейные зависимости, заданные как аналитически, так и графически.

При графическом представлении нелинейностей в звеньях структурных схем указывают соответствующие им графики. Если нелинейность задана в виде функциональных зависимостей, то в звеньях структурных схем отображают соответствующие формулы или адекватные им условные графические обозначения. На рис. 1.4 в качестве примера показаны структурные схемы некоторых нелинейных звеньев и элементов, где:  $a$  – звено, реализующее умножение двух входных величин  $X_{\text{ВЫХ}} = X_{\text{ВХ1}} \cdot X_{\text{ВХ2}}$ ;  $b$  – звено, реализующее деление одной входной величины на другую  $X_{\text{ВЫХ}} = X_{\text{ВХ2}} / X_{\text{ВХ1}}$ ;  $в$  – звено, реализующее извлечение квадратного корня из входной величины  $X_{\text{ВЫХ}} = \sqrt{X_{\text{ВХ}}}$ ;  $г$  – двухпозиционный элемент с зоной нечувствительности и гистерезисом;  $д$  – трехпозиционный релейный элемент с зоной нечувствительности;  $е$  – трехпозиционный элемент с зоной нечувствительности и гистерезисом.

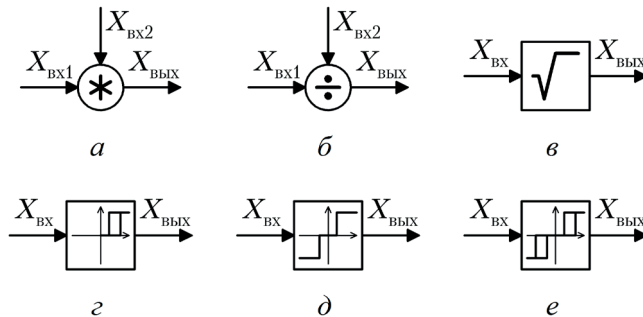


Рис. 1.4. Примеры структурных схем некоторых нелинейных звеньев и элементов

На основе изложенного выше исходную нелинейную математическую модель САР температуры в термической камере (1.16) можно представить в виде структурной схемы (рис. 1.5).

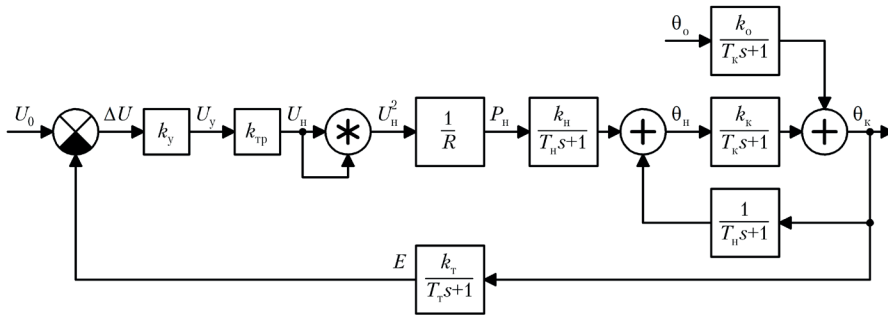


Рис. 1.5. Структурная схема нелинейной САР температуры в термической камере

Обобщая изложенное, можно отметить следующее: основные математические модели САР – это системы дифференциальных и алгебраических уравнений, а также полученные на их основе передаточные функции и структурные схемы.

**Примечание:** исходной базой рассмотренных математических моделей САР являются системы дифференциальных и алгебраических уравнений, в которых входные и выходные переменные (координаты) представляют собой реальные величины или малые отклонения от их абсолютных значений, соответствующих установившемуся режиму с определенными физическими размерностями. Помимо такого подхода, могут применяться модели на основе уравнений, записанных в безразмерной форме, в которых переменные представлены в безразмерном виде (в относительных единицах). Методику преобразования исходных уравнений в безразмерную форму можно найти в ряде учебников по теории автоматического регулирования и управления [8, 9]. Для целей компьютерного моделирования САР, исходя из физической наглядности процессов регулирования, целесообразно использовать математические модели, координаты которых представлены в поименованных единицах.

Кроме рассмотренных выше форм представления математических моделей, в теории автоматических систем используются математические модели в векторно-матричной форме (в пространстве состояний), сущность которых рассмотрена далее в п. 1.1.2.

### 1.1.2. Математические модели САР в пространстве состояний

Поведение любой САР во времени при определенных значениях входных воздействий (координат)  $g_1 \dots g_m$  можно характеризовать не только выходными величинами системы  $y_1 \dots y_k$ , но и ее переменными  $x_1 \dots x_n$ , число которых равно порядку

системы  $n$  [6, 10]. Посредством перевода исходной системы дифференциальных уравнений в форму Коши, с использованием входных, промежуточных и выходных координат, получают  $n$ -мерный вектор состояния, множество возможных сочетаний которого образует векторное пространство, называемое пространством состояний системы (рис. 1.6).

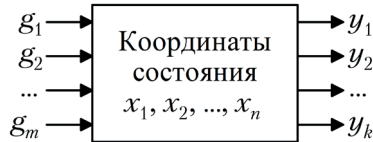


Рис. 1.6. К понятию пространства состояний системы

Рассмотрим в общем случае линейную (линеаризованную) САР (рис. 1.6), описываемую системой дифференциальных уравнений в векторной форме:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bg; \\ y = Cx, \end{cases} \quad (1.21)$$

где  $x$  – вектор состояния системы,  $y$  – вектор выходных величин,  $g$  – вектор внешних воздействий (задающих и возмущающих), а именно:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_k \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ \dots \\ g_m \end{bmatrix}.$$

Через  $A, B, C$  обозначены:

- собственная параметрическая матрица системы:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix};$$

- входная матрица системы:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix};$$

- выходная матрица системы:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{k1} & \dots & c_{kn} \end{bmatrix}.$$

Процессы в системе в свободном движении (без внешних воздействий), согласно (1.21), описываются векторно-матричным уравнением

$$\dot{x} = Ax, \quad (1.22)$$

или в развернутом виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n; \\ \dots; \\ \dot{x}_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n. \end{cases} \quad (1.23)$$

Эти уравнения дают возможность исследовать переходные процессы в автоматической системе с помощью компьютерных программ, реализующих численные методы решения дифференциальных уравнений.

Рассмотрим, в качестве примера, вывод уравнений состояния для замкнутой системы регулирования – электромеханической следящей системы [6], представленной на рис. 1.7, где: Д – двигатель постоянного тока; РМ – рабочий механизм; ЗУ – задающий механизм; РО – рабочая ось; ЗО – задающая ось; П и П<sub>0</sub> – измерительный и задающий потенциометрические датчики угловых перемещений; Т и Т<sub>0</sub> – измерительный и задающий тахогенераторные датчики угловых скоростей; УН – усилитель напряжения; УМ – усилитель мощности; R<sub>ш</sub> – резистор для контроля тока двигателя; ДТ – датчик тока якоря двигателя; УВ<sub>φ</sub> – устройство (схема) вычитания (сравнения) сигналов датчиков угловых перемещений; УВ<sub>ω</sub> – устройство (схема) вычитания (сравнения) сигналов датчиков угловых скоростей; УВ<sub>U</sub> – устройство (схема) вычитания (сравнения) сигналов усилителя напряжения и токовой обратной связи; УС – устройство (схема) сложения сигналов рассогласования датчиков угловых перемещений и угловых скоростей.

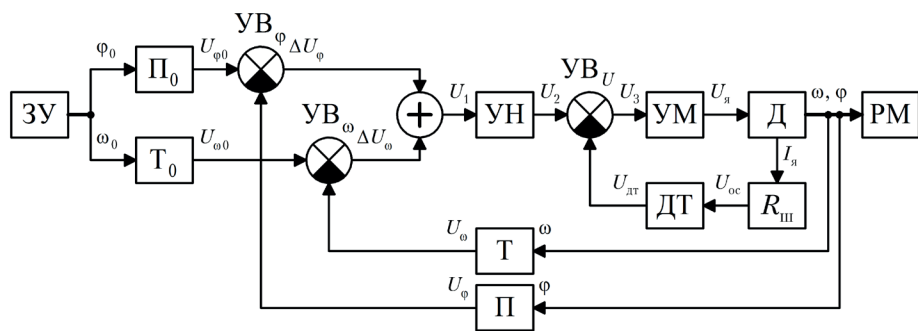
В системе, кроме главного контура регулирования по углу поворота вала двигателя, введены дополнительный контур регулирования по его скорости вращения и отрицательная обратная связь по току якоря. На схеме датчики угловых перемещений П и П<sub>0</sub> изображены как однооборотные, в реальной системе они выполнены в виде многооборотных потенциометрических преобразователей.

Величины, обозначенные на рис. 1.7 и далее по тексту латинскими и греческими буквенными символами, имеют следующий физический смысл:

- $\varphi$  и  $\varphi_0$  – угловые перемещения рабочей и задающей осей, рад;
- $\omega$  и  $\omega_0$  – угловые скорости рабочей и задающей осей, рад/с;
- $M_d$  – момент двигателя, Н·м ( $M_d = k_m I_a$ ,  $k_m$  – конструктивная константа, Н·м/А);
- $M_c$  – момент сопротивления, Н·м ( $M_c = r\omega$ ,  $r$  – конструктивная константа, Н·м·с/рад);
- $E_d$  – ЭДС двигателя, В ( $E_d = k_e \omega$ ,  $k_e$  – конструктивная константа, В·с/рад);
- $U_a$  и  $I_a$  – напряжение и ток якоря двигателя, В и А;
- $U_{oc}$  – напряжение обратной связи по току якоря двигателя, В;
- $U_{дт}$  – выходное напряжение датчика тока, В;
- $U_1$  и  $U_2$  – напряжения на входе и выходе усилителя напряжения, В;



- 

 $a$ 

6

Рис. 1.7. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы следящей системы

Элементы и устройства, входящие в следящую систему (рис. 1.7), описываются следующими дифференциальными или алгебраическими уравнениями:

- электрическая цепь двигателя:

$$L_{\mathfrak{A}} \frac{dI_{\mathfrak{A}}}{dt} + R_{\mathfrak{A}} I_{\mathfrak{A}} + E_{\mathfrak{A}} = U_{\mathfrak{A}}, \quad (1.24)$$

где  $L_{\text{я}}$  и  $R_{\text{я}}$  – индуктивность и активное сопротивление обмотки якоря, Гн и Ом;

- механическая часть двигателя совместно с рабочим механизмом:

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_c = M_d, \quad (1.25)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции ротора двигателя и приведенного к его валу общего момента инерции рабочего механизма, кг·м<sup>2</sup>;

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega; \quad (1.26)$$

- усилитель мощности:

$$U_y = k_{ym} U_3, \quad (1.27)$$

где  $k_{ym}$  – коэффициент усиления;

- отрицательная обратная связь по току:

$$U_3 = U_2 - U_{дт}; \quad (1.28)$$

- датчик тока, исходное уравнение которого  $U_{дт} = k_{дт} U_{oc}$ , с учетом сигнала обратной связи по току  $U_{oc} = R_{ш} I_y$ , в окончательном виде имеет уравнение:

$$U_{дт} = k_{дт} R_{ш} I_y, \quad (1.29)$$

где  $k_{дт}$  – коэффициент передачи датчика тока;  $R_{ш}$  – сопротивление резистора, Ом;

- усилитель напряжения:

$$U_2 = k_1 U_1, \quad (1.30)$$

где  $k_1$  – коэффициент усиления;

- операция сложения сигналов рассогласования  $\Delta U_\varphi$  и  $\Delta U_\omega$ :

$$U_1 = \Delta U_\varphi + \Delta U_\omega; \quad (1.31)$$

- операции сравнения электрических сигналов потенциометрических и тахогенераторных датчиков соответственно:

$$\Delta U_\varphi = U_{\varphi 0} - U_\varphi \text{ и } \Delta U_\omega = U_{\omega 0} - U_\omega; \quad (1.32)$$

- потенциометрические датчики  $\Pi$  и  $\Pi_0$  угловых перемещений соответственно:

$$U_\varphi = k_\Pi \varphi \text{ и } U_{\varphi 0} = k_\Pi \varphi_0, \quad (1.33)$$

где  $k_\Pi$  – коэффициент передачи датчиков, В/рад;

- тахогенераторные датчики  $T$  и  $T_0$  угловых скоростей  $\omega$  и  $\omega_0$  соответственно:

$$U_\omega = k_T \omega \text{ и } U_{\omega 0} = k_T \omega_0, \quad (1.34)$$

где  $k_T$  – коэффициент передачи датчиков, В·с/рад.

Приведем исходную систему уравнений (1.24)–(1.34) к системе трех дифференциальных уравнений, связывающих координаты  $I_y$ ,  $\omega$  и  $\varphi$  с входными координатами  $\omega_0$  и  $\varphi_0$ . Для этого последовательной подстановкой уравнения (1.27)–(1.34) сведем к одному уравнению следующего вида:

$$U_{\text{я}} = k_{\text{ум}} k_1 [k_{\text{п}}(\varphi_0 - \varphi) + k_{\text{т}}(\omega_0 - \omega)] - k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} R_{\text{ш}} I_{\text{я}}. \quad (1.35)$$

Подставляя в уравнения (1.24)–(1.25) выражения (1.35),  $E_{\text{д}} = k_e \omega$ ,  $M_{\text{д}} = k_m I_{\text{я}}$  и  $M_{\text{с}} = r\omega$ , получим:

$$L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + k_e \omega = k_{\text{ум}} k_1 [k_{\text{п}}(\varphi_0 - \varphi) + k_{\text{т}}(\omega_0 - \omega)] - k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} R_{\text{ш}} I_{\text{я}}; \quad (1.36)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + r\omega = k_m I_{\text{я}}. \quad (1.37)$$

После преобразования (1.36) и (1.37) в форму Коши, с учетом (1.26), система дифференциальных уравнений, описывающая динамику следящей системы, примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = & - \left( \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} + k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} \frac{R_{\text{ш}}}{L_{\text{я}}} \right) I_{\text{я}} - \left( \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} + \frac{k_e}{L_{\text{я}}} \right) \omega - \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} \varphi + \\ & + \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} \omega_0 + \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} \varphi_0; \end{aligned} \quad (1.38)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m}{J} I_{\text{я}} - \frac{r}{J} \omega \quad \text{или} \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m}{J} I_{\text{я}} - \frac{1}{T_{\text{м}}} \omega, \quad (1.39)$$

при  $r/J = 1/T_{\text{м}}$  (здесь  $T_{\text{м}}$  – механическая постоянная времени);

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega. \quad (1.40)$$

Систему из трех уравнений (1.38), (1.39) и (1.40) запишем в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{\text{я}} \\ \omega \\ \varphi \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} - \left( \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} + \frac{k_{\text{дт}} k_{\text{ум}} R_{\text{ш}}}{L_{\text{я}}} \right) & - \left( \frac{k_e}{L_{\text{я}}} + \frac{k_1 k_{\text{ум}} k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} \right) & - \frac{k_1 k_{\text{ум}} k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} \\ \frac{k_m}{J} & - \frac{1}{T_{\text{м}}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{я}} \\ \omega \\ \varphi \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} \frac{k_1 k_{\text{ум}} k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} & \frac{k_1 k_{\text{ум}} k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \varphi_0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Введем обозначения координат вектора состояний следящей системы как  $I_{\text{я}} = x_1$ ;  $\omega = x_2$ ;  $\varphi = x_3$ , а также обозначим:

$$-\frac{k_1 k_{\text{ym}} k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} = a_{13} = b_{12}, \quad \frac{k_m}{J} = a_{21}, \quad -\frac{R_{\text{я}} + k_{\text{лт}} k_{\text{ym}} R_{\text{ш}}}{L_{\text{я}}} = a_{11},$$

$$-\frac{k_e + k_1 k_{\text{ym}} k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} = a_{12}, \quad -\frac{1}{T_{\text{м}}} = a_{22}, \quad \frac{k_1 k_{\text{ym}} k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} = b_{11}, \quad \omega_0 = g_1, \quad \Phi_0 = g_2.$$

В результате получим уравнение состояния следящей системы в векторной форме:

$$\dot{x} = Ax + Bg, \quad (1.41)$$

где  $x$  – вектор состояния системы;  $g$  – входной вектор, причем

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}.$$

Параметрическая матрица системы  $A$  и входная матрица  $B$  имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнению состояния следящей системы (1.41) соответствует следующая система уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + b_{11}g_1 + b_{12}g_2; \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + 0 \cdot x_3; \\ \dot{x}_3 = 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3. \end{cases} \quad (1.42)$$

Дополним (1.41) выходным уравнением

$$y = Cx. \quad (1.43)$$

Так как в принятых обозначениях выходные величины  $\omega = x_2$  и  $\Phi = x_3$ , то в по-

следнем уравнении координатами выходного вектора системы  $y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}$  будут

$$y_1 = 0; y_2 = x_2 = \omega; y_3 = x_3 = \Phi, \text{ а выходная матрица системы } C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, можно привести к стандартной векторной форме (1.21) уравнения состояния любой линеаризованной системы автоматического регулирования и управления. Для решения задачи их анализа и синтеза на основе моделей в пространстве состояний ПО SimInTech содержит специальный блок *Переменные состояния*. Кроме этого, в среде SimInTech эти задачи можно также решать

с помощью блока *Язык программирования*, используя непосредственно уравнения, записанные в форме Коши, к примеру (1.42), или применяя составленные на их основе структурные схемы, подобные схеме, показанной на рис. 1.8. Методика составления структурных схем на основе исходных уравнений рассмотрена в п. А.2 приложения А.

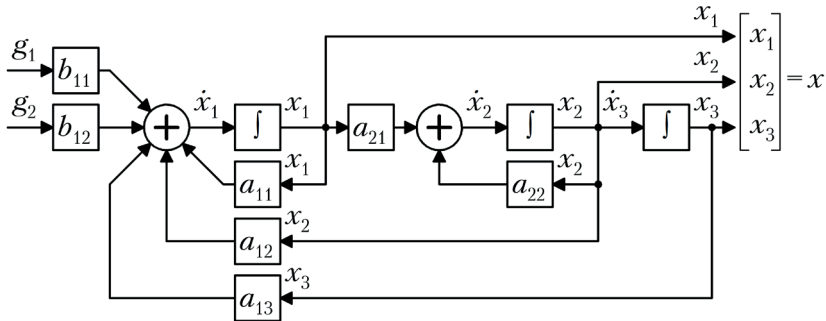


Рис. 1.8. Структурная модель следящей системы, соответствующая системе уравнений (1.42)

Для практической апробации процедур моделирования САР и САУ на основе моделей в пространстве состояний с использованием примера следящей системы можно воспользоваться следующими числовыми значениями параметров элементов и устройств с учетом вышепринятых обозначений и физических размерностей:  $k_{\Pi} = 0,26$  В/рад;  $k_{\tau} = 1$  В-с/рад;  $R_{\text{ш}} = 0,1$  Ом;  $k_{\text{дт}} = 15$ ;  $k_1 = \text{var}(5...50)$ ;  $k_{\text{ум}} = 26$ ;  $k_e = 2$  В-с/рад;  $k_m = 2$  Н·м/А;  $L_{\text{я}} = 0,13$  Гн;  $R_{\text{я}} = 2,6$  Ом;  $J = 0,115$  кг·м<sup>2</sup>;  $r = 0,23$  Н·м-с/рад;  $T_{\text{м}} = 0,5$  с [12].

## 1.2. Математические модели внешних воздействий

Любая САР подвержена влиянию возмущающих воздействий, которые зависят от изменяющихся внешних факторов и условий. В общем случае они представляют собой непрерывно изменяющиеся функции времени, точный закон которых невозможно предугадать. По причине сложности математического описания таких **случайных воздействий** при исследовании САР чаще всего применяют **детерминированные воздействия**, которые можно математически представить в виде непрерывных или дискретных функций времени. К числу детерминированных функций относятся непериодические и периодические функции времени. В каждом конкретном случае при выборе математической модели (математического

описания) входных воздействий исходят из физической сущности, реальных режимов работы и требований к процессу регулирования. В отдельных случаях, когда необходимо определить количественные оценки влияния реальных непредсказуемых воздействий на выходные координаты системы, эти воздействия представляют как случайные функции времени, для описания которых существует специальный математический аппарат, базирующийся на методах теории вероятностей. Сущность и характеристики **детерминированных** и **случайных воздействий** рассмотрены в следующих параграфах.

### 1.2.1. Детерминированные воздействия

**Ступенчатое воздействие** – одно из наиболее простых видов воздействий, в общем случае имеет вид, показанный на рис. 1.9. Аналитически оно записывается как

$$x(t - \tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau; \\ A & \text{при } t \geq \tau, \end{cases} \quad (1.44)$$

где  $\tau$  – момент «включения» скачка;  $A$  – величина входного воздействия.

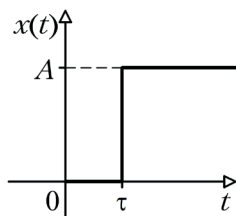


Рис. 1.9. График ступенчатого воздействия

**Импульсные воздействия** (рис. 1.10) описывают соответственно следующими зависимостями:

- прямоугольный импульс (рис. 1.10а):

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau_1; \\ A & \text{при } t \geq \tau_1, \text{ и } t < \tau_2; \\ 0 & \text{при } t \geq \tau_2; \end{cases} \quad (1.45)$$

- треугольный импульс (рис. 1.10б):

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ A & \text{при } t = \tau_1; \\ 0 & \text{при } t \geq \tau_2. \end{cases} \quad (1.46)$$

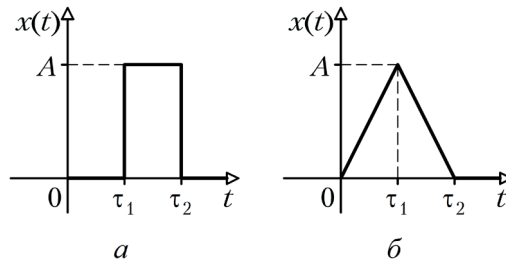


Рис. 1.10. Импульсные воздействия

**Линейное (рамповое) воздействие** в общем случае имеет график, показанный на рис. 1.11. Его аналитически описывают следующей формулой:

$$x(t) = a_0 1(t) + a_1 t, \quad (1.47)$$

где  $1(t)$  – единичное ступенчатое воздействие (рис. 1.11,  $\tau = 0$ ;  $A = 1$ );

$a_0$  – начальное значение воздействия,  $a_0 = x(0)$ ;

$a_1$  – коэффициент, определяемый углом наклона линейного воздействия как  $a_1 = \operatorname{tg} \alpha$ .

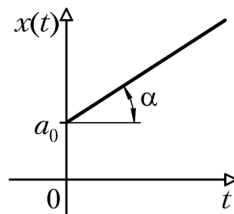
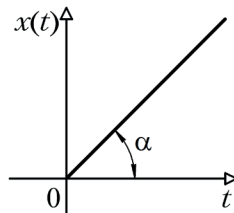


Рис. 1.11. График линейного воздействия

В частном случае при  $a_0 = 0$  график линейного воздействия имеет вид, показанный на рис. 1.12, а аналитическое выражение (1.47):

$$x(t) = a_1 t. \quad (1.48)$$


 Рис. 1.12. График линейного воздействия (1.47)  
при  $a_0 = 0$

**Гармоническое воздействие** представляет функцию времени

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.49)$$

где  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  – соответственно амплитуда, круговая частота и начальная фаза гармоника.

**Пилообразное воздействие** имеет график, приведенный на рис. 1.13.

Показанное на рис. 1.13 пилообразное воздействие называют «прямой» пилой. Есть также воздействие в виде «обратной» пилы, у которой передние фронты перпендикулярные, а задние пологие.

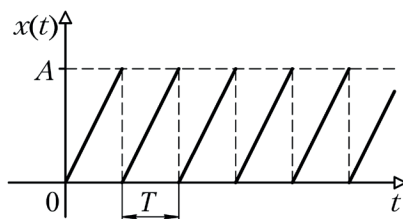


Рис. 1.13. Пилообразное воздействие:  
 $A$  – высота зуба пилы;  
 $T$  – период (шаг зубьев пилы)

**Треугольное воздействие** представляет собой последовательную серию равнобоких треугольных импульсов (рис. 1.14) с постоянной высотой треугольника (амплитудой)  $A$  и периодом  $T$ .

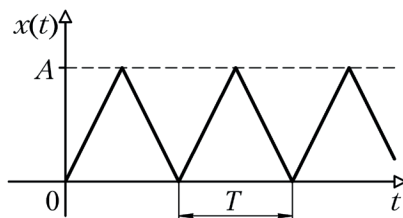


Рис. 1.14. Треугольное воздействие

**Прямоугольное воздействие (меандр)** имеет график, приведенный на рис. 1.15, где:  $A_1$ ,  $A_2$  – амплитуда соответственно прямоугольника и впадины;  $T_1$ ,  $T_2$  – длительность соответственно прямоугольника и впадины.

Помимо рассмотренных выше элементарных функций, в качестве детерминированных воздействий, при необходимости, могут использоваться и другие, более сложные и специальные функции.



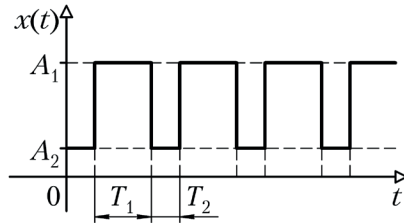


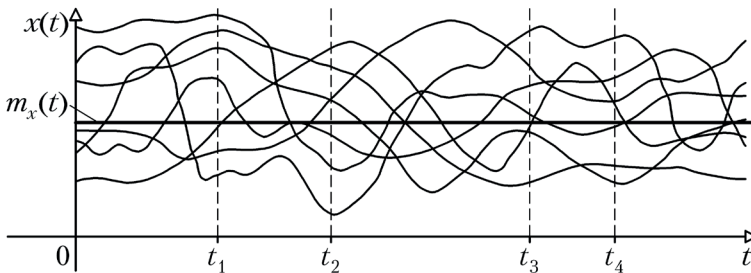
Рис. 1.15. Прямоугольное воздействие

### 1.2.2. Случайные воздействия

Для математического описания случайных внешних воздействий применяют математический аппарат случайных функций, базирующийся на положениях теории вероятностей.

**Случайной функцией** называют такую функцию, значение которой при каждом значении аргумента является случайной величиной. Зарегистрированную при одном наблюдении случайную функцию называют реализацией этой случайной функции. Каждая реализация может принять тот или иной конкретный вид, неизвестно заранее, какой именно. Случайную функцию, аргументом которой является время, называют **случайным процессом**. При исследовании САР случайные воздействия рассматриваются как случайные процессы. В связи с этим далее по тексту под общим термином «случайная функция» понимается понятие случайного процесса.

По множеству реализаций случайной функции можно найти обобщенные неслучайные числовые характеристики: математическое ожидание и дисперсию. Понятие и определение этих характеристик рассмотрим применительно к некоторой случайной функции, реализации которой изображены на рис. 1.16.

Рис. 1.16. Реализации случайной функции (случайного процесса)  $x(t)$ 

При любом фиксированном времени  $t$  ( $t_1 \dots t_4$ ) значение случайной функции  $x(t)$  обращается в случайную величину  $x(t)$ , называемую сечением случайной функции (рис. 1.16).

Математическим ожиданием случайной функции  $x(t)$  называется неслучайная функция  $m_x(t)$ , которая при каждом  $t$  представляет собой математическое ожидание  $M[x(t)]$  соответствующего сечения случайной функции:

$$m_x(t) = M[x(t)].$$

Дисперсией случайной функции  $x(t)$  называется неслучайная функция  $D_x(t)$ , значение которой для каждого момента времени  $t$  равно дисперсии соответствующего сечения случайной функции. Квадратный корень из дисперсии называется среднеквадратическим отклонением  $\sigma_x(t)$  случайной функции  $x(t)$ :

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}. \quad (1.50)$$

Различают случайные функции **стационарные** и **нестационарные**.

**Стационарной** называют случайную функцию, статистические характеристики (математическое ожидание, дисперсия и др.) которой не меняются при изменении момента времени. Для стационарной случайной функции математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение являются постоянными величинами. В частном случае математическое ожидание стационарного случайного процесса может быть нулевым. На рис. 1.16 приведены реализации, соответствующие стационарной случайной функции  $x(t)$ .

**Нестационарной** называют случайную функцию, математическое ожидание, дисперсия и другие характеристики которой меняются во времени.

Для описания случайных воздействий их представляют стационарными функциями, обладающими так называемыми эргодическими свойствами.

**Эргодической** называют стационарную функцию, у которой статистические характеристики, полученные при обработке одной реализации достаточно большой продолжительности, идентичны статистическим характеристикам, полученным при обработке множества реализаций той же общей продолжительности. Свойство эргодичности в значительной степени упрощает исследование стационарных функций, так как оценивать процесс можно по одной реализации. Если стационарная случайная функция  $x(t)$  обладает эргодическими свойствами, то для нее математическое ожидание (среднее по времени на достаточно большом участке одной реализации) приблизительно равно математическому ожиданию по множеству реализаций. То же будет верно и для дисперсии случайной функции. Следовательно, статистические характеристики случайной функции (математическое ожидание и дисперсию) можно приблизительно определять по одной достаточно продолжительной реализации.

Рассмотрим метод обработки стационарных эргодических функций.

Предположим, что реализация эргодического стационарного случайного процесса представлена записанной регистрирующим прибором кривой  $x(t)$  на интервале времени  $T$  (рис. 1.17).

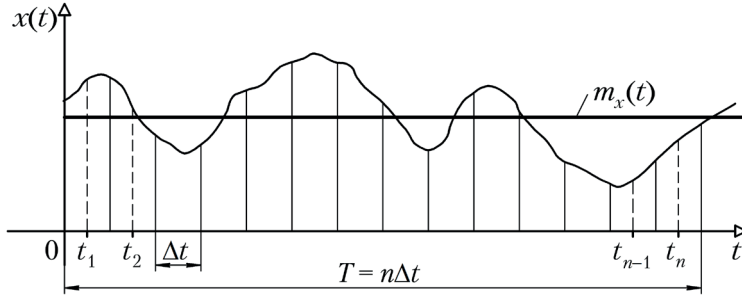


Рис. 1.17. Реализация стационарного случайного процесса

Разобьем кривую на интервале  $T$  на части, соответствующие равным промежуткам времени  $\Delta t$ , на которых кривая изменяется сравнительно мало, и обозначим середины полученных участков через  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{n-1}, t_n$ . Количество промежутков (интервалов)  $\Delta t$  и значений ординат  $x(t_i)$  будет равно  $n$ .

Найдем оценку значения математического ожидания процесса. Оно представляет собой среднее арифметическое ординат кривой процесса на рассматриваемом интервале:

$$m_x(t) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t_i). \quad (1.51)$$

На рис. 1.17 математическое ожидание  $m_x(t)$  изображено прямой, параллельной оси времени. Этот случайный процесс можно центрировать, т. е. отсчитывать ординаты кривой процесса от прямой математического ожидания  $m_x(t)$ .

Найдем приближенное значение дисперсии рассматриваемого случайного процесса. Для этого возведем в квадрат все значения ординат  $x(t)$  централизованного процесса, просуммируем эти квадраты и разделим сумму на число ординат:

$$D_x(t) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x(t_i)]^2. \quad (1.52)$$

Для получения оценок статистических характеристик стационарных эргодических случайных процессов по формулам (1.51), (1.52) с необходимой степенью достоверности их расчет должен быть выполнен по реализации процесса, имеющей определенную достаточную продолжительность  $T$ . Для применения этих формул на основе непрерывного графика реализации случайного процесса вначале получают его дискретные значения через интервал (шаг) дискретизации (дискретности) по времени  $t$ . При этом очень важно правильно выбрать шаг дискретности. В случае преобразования непрерывной реализации в дискретную форму с малым шагом дискретности значения двух соседних ординат оказываются сильно коррелированы, т. е. будет иметь место излишняя информация, которая требует большого объема вычислительных операций. Преобразование с завышенным шагом дискретности дает пониженную информационную надежность: соседние орди-

наты могут оказаться некоррелированными или связи будут слабо выражены. Основное требование выбора рационального шага дискретности вытекает из требования минимальной потери информации за счет погрешности временного квантования.

Для выбора времени интегрирования  $T$  (длительности реализации) и шага дискретности по времени  $t$  можно воспользоваться следующими рекомендациями:

- располагая некоторыми априорными данными об объекте регулирования или ему подобном, рассматривая и анализируя реализацию случайной функции как центрированную, определяют диапазон частот  $\omega$  ее гармоник (ориентировочно задают минимальную  $\omega_{\min}$  и максимальную частоты  $\omega_{\max}$ );
- время интегрирования  $T$  задают с учетом следующей приближенной формулы:

$$T \geq 50/\omega_{\min};$$

- шаг дискретности (интегрирования) рассчитывают как

$$\Delta t = \frac{\pi}{10\omega_{\max}} = \frac{1}{20f_{\max}},$$

где  $f_{\max}$  – максимальная частота, Гц.

## 1.3. Компьютерное моделирование САР

### 1.3.1. Цели моделирования САР

В общем случае под термином математическое моделирование автоматических систем понимаются процессы отыскания их математических моделей (п. 1.1), а также непосредственного исследования и анализа этих моделей на основе методов теории автоматического управления и регулирования аналитически, графоаналитически или с использованием ЭВМ [6–11].

По мере развития вычислительной техники разработано достаточно много прикладных программ применительно к современным компьютерам (см. предисловие), обеспечивающих исследование переходных и установившихся процессов в автоматических системах любой сложности и практически в любых режимах работы при изменении их параметров и структуры. Метод исследования САР на основе таких прикладных программ и является методом математического моделирования с помощью компьютера – **методом компьютерного моделирования**. Его сущность заключается в том, что на основе математической модели САР с помощью прикладной программы на компьютере получают графики переходных процессов. Анализируя эти графики, достигают следующих **целей**:

- определяют устойчивость системы;
- оценивают качество системы;
- если система оказывается неустойчивой или показатели качества не отвечают заданным требованиям, то, изменяя параметры элементов САР или ее структуру (вводя дополнительные корректирующие элементы), добиваются

желаемого результата (устойчивости системы или требуемых показателей качества), оптимизируя закон регулирования или параметры регулятора.

### 1.3.2. Анализ устойчивости и качества САР

**Устойчивость САР** оценивают по виду переходного процесса. Если график переходного процесса сходящийся, то система устойчивая, а если расходящийся – то неустойчивая. Поясним сказанное на примере САР температуры в термической камере (см. рис. 1.1 и 1.5). Предположим, что в результате компьютерного моделирования режима включения в работу САР на основе структурной схемы (см. рис. 1.5) получены два графика: один сходящийся (рис. 1.18а), а другой – расходящийся (рис. 1.18б).

В первом случае  $\lim \Delta\theta_{\text{к}} \rightarrow \Delta\theta_{\text{ст}}$  при  $t \rightarrow \infty$ , а во втором случае  $\lim \Delta\theta_{\text{к}} \rightarrow \infty$  при  $t \rightarrow \infty$ . Следовательно, в первом случае САР будет устойчивой, а во втором – неустойчивой.

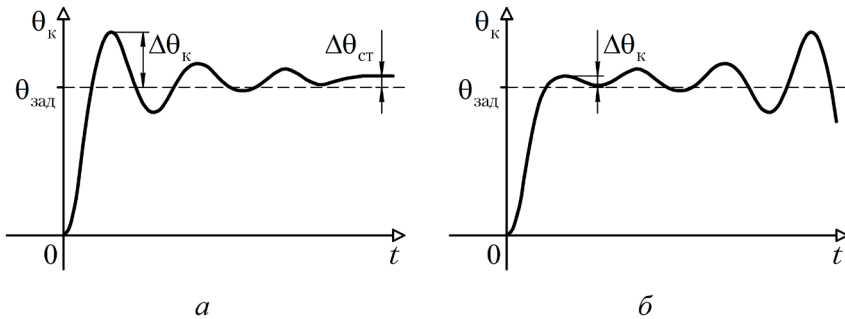


Рис. 1.18. Переходные процессы САР: а – сходящийся; б – расходящийся;  
 $\Delta\theta_{\text{к}}$  – отклонение температуры  $\theta_{\text{к}}$  в термической камере от заданного значения  $\theta_{\text{зад}}$ ;  
 $\Delta\theta_{\text{ст}}$  – статическая ошибка

**Качество САР** оценивают по задающему и возмущающему воздействиям на основе прямых и косвенных методов. При этом показатели качества должны отвечать заданным требованиям. Оценку качества САР с помощью компьютерного моделирования целесообразно проводить прямым методом по графикам переходных процессов (временным характеристикам). Применительно к САР с постоянным значением задающего воздействия (системам стабилизации) широкое распространение получил метод оценки качества по переходным функциям (кривым разгона) по задающему и возмущающему воздействиям. При этом значение задающего воздействия рассчитывают с учетом коэффициента статизма  $k_{\text{ст}}$ , а значение ступенчатого возмущающего воздействия – с учетом возможных максимальных значений внешних возмущений.

Рассмотрим методику и последовательность оценки качества САР по переходным функциям на примере системы стабилизации температуры в термической камере (см. рис. 1.1 и 1.3).

Значение задающего воздействия:

$$U_0 = \theta_{\text{зад}}/k_{\text{ст}} \quad (1.53)$$

Коэффициент статизма САР по задающему воздействию определяем по структурной схеме (см. рис. 1.3):

$$k_{\text{ст}} = W_{U_0}(0), \quad (1.54)$$

где  $W_{U_0}(0)$  – значение передаточной функции системы по задающему воздействию при  $s = 0$ .

Возмущающее воздействие – температура атмосферы, окружающей термическую камеру, – будет определяться ее минимальными возможными значениями, зависящими от времени года.

Допустим, что в процессе компьютерного моделирования рассматриваемой САР получен график переходной функции **по задающему воздействию** при  $\theta_0 = 0$  (рис. 1.19).

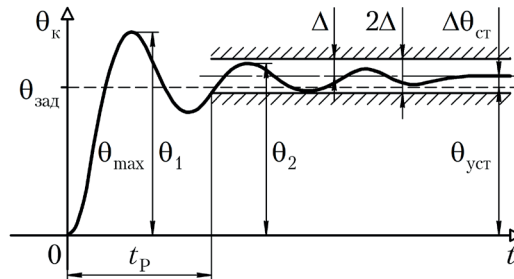


Рис. 1.19. Колебательная переходная функция САР по задающему воздействию

Переходный процесс САР будут характеризовать следующие основные показатели качества:

- установившееся статическое отклонение (статическая ошибка) – отклонение регулируемой величины от заданного значения после окончания переходного процесса:

$$\Delta\theta_{\text{ст}} = \theta_{\text{зад}} - \theta_{\text{уст}};$$

- время регулирования  $t_p$ , в течение которого отклонение регулируемой величины станет меньше заранее заданного значения, определяемого требуемой точностью системы  $\Delta$ ;
- перерегулирование (колебательность), определяемое разностью максимального значения регулируемой величины и ее установившегося значения, %:

$$\sigma = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\text{уст}}}{\theta_{\text{уст}}} 100\%;$$

- число перерегулирований –  $n$ , т. е. число максимальных значений за время регулирования; для графика, изображенного на рис. 1.19,  $n = 2$ ;

- степень затухания  $\varphi$  (некоторое подобие логарифмическому декременту затухания), характеризующая интенсивность затухания колебательных переходных процессов:

$$\varphi = \frac{\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2}{\Delta\theta_1} 100\%,$$

где  $\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{уст}$ ;  $\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{уст}$ .

Следует отметить, что статическую ошибку по задающему воздействию можно полностью компенсировать за счет соответствующего выбора задающего воздействия с учетом формулы (1.53). Это значит, что при достаточной точности вычислений по формуле (1.53)  $\theta_{зад} = \theta_{уст}$ , а  $\Delta\theta_{ст} = 0$ .

Рассмотренные показатели качества применимы для колебательных переходных процессов. При монотонных переходных функциях (рис. 1.20) качество САР характеризуется статической ошибкой  $\Delta\theta_{ст}$  и временем регулирования  $t_p$ .

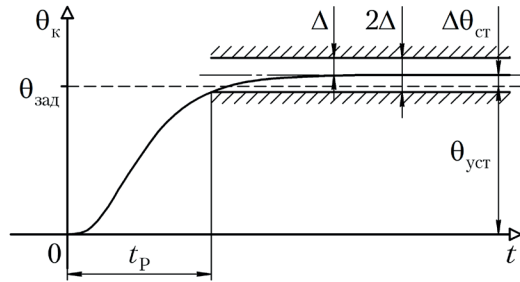


Рис. 1.20. Монотонная переходная функция САР по задающему воздействию

Переходные функции по каналам задающего и возмущающего воздействий при компьютерном моделировании можно получить в виде одного совмещенного графика (рис. 1.21).

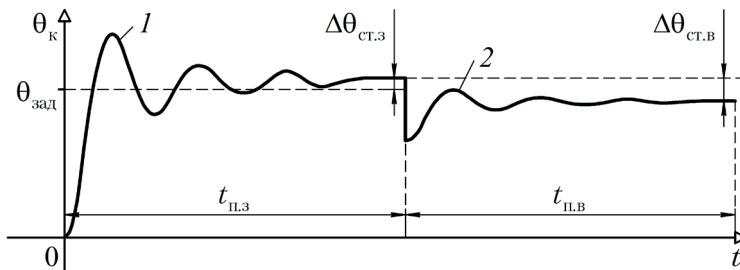


Рис. 1.21. Совмещенный график переходных процессов САР:  
1 — по задающему воздействию; 2 — по возмущению;  
 $t_{п.з}$  и  $t_{п.в}$  — время переходного процесса от задающего воздействия и от возмущения

При этом вначале прикладывается ступенчатое задающее воздействие, а возмущение подается в виде смещенной ступенчатой функции (рис. 1.22):

$$\theta_o = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau; \\ \theta_{oc} & \text{при } t \geq \tau, \end{cases}$$

где  $\tau$  – время, удовлетворяющее условию  $\tau > t_{п.з}$  (здесь  $t_{п.з}$  – время затухания переходного процесса по задающему воздействию);

$\theta_{oc}$  – значение ступенчатого воздействия.

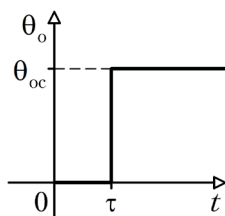


Рис. 1.22. Смещенное ступенчатое возмущение

К рассмотренным показателям качества предъявляют следующие конкретные требования с учетом регламентированной точности регулируемой величины.

Статическая ошибка определяется требуемой точностью к поддержанию регулируемой величины.

Значение заданной величины  $\Delta$ , определяющей длительность времени регулирования  $t_p$ , обычно принимают ориентировочно не более 5% заданного значения регулируемой величины. Величину  $\pm\Delta$  условно называют «трубкой».

Перерегулирование  $\sigma$  не должно превышать 20%, а число перерегулирований  $n \leq 2-3$ .

Степень затухания  $\phi$  косвенно определяет запас устойчивости САР. Если  $\phi = 0$ , то система находится на границе устойчивости. При  $\phi = 100\%$  в системе будет апериодический переходный процесс. Приемлемые значения  $\phi$  должны удовлетворять условию  $\phi \geq 75\%$ .

Рассмотренная выше статическая ошибка имеет место только в статических системах – системах, содержащих статические элементы (звенья). В так называемых астатических САР, включающих в себя интегрирующие звенья, статическая ошибка отсутствует (к таким системам, например, относятся следящие САР). Они, в дополнение к рассмотренным выше показателям качества (за исключением статической ошибки), характеризуются еще установившейся ошибкой слежения (скоростной ошибкой)  $\Delta y_{уст}$  (рис. 1.23). Величина скоростной ошибки в каждой конкретной САР регламентируется требованиями технологического процесса.



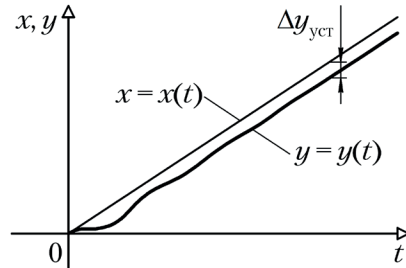


Рис. 1.23. К определению скоростной ошибки  $\Delta y_{уст}$  астатической САР по задающему воздействию:  $y$  – регулируемая величина;  $x$  – задающее воздействие;  $x = x(t) = vt$  – типовое линейное воздействие с постоянной скоростью  $v$ ;  $y = y(t)$  – кривая разгона

### 1.3.3. Коррекция САР

Если в результате компьютерного моделирования установлено, что САР оказалась неустойчивой или ее показатели качества не соответствуют заданным, то дальнейший процесс моделирования сводится к выбору корректирующих элементов в соответствии с рекомендациями, изложенными далее.

Под коррекцией САР понимают изменение их структурных схем с целью обеспечения устойчивых с требуемыми показателями качества переходных процессов. Коррекция САР достигается посредством введения в систему дополнительных, так называемых корректирующих элементов (устройств), охватывающих один или несколько элементов исходной системы. Если направление сигналов (воздействий) в корректирующем устройстве совпадает с направлением сигналов в охватываемых им элементах, то связь называют **прямой**. В противном случае связь будет **обратной**. Коррекцию САР на основе прямых связей принято называть **последовательной**, а с использованием обратных связей – **параллельной**.

Рассмотрим случаи последовательной коррекции САР.

Пусть задана структурная схема САР (рис. 1.24), в которую введен дополнительный корректирующий элемент с передаточной функцией  $W_K(s)$ , обеспечивающий прямую положительную связь.

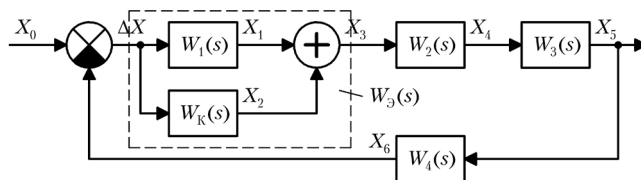


Рис. 1.24. Структурная схема САР с последовательной коррекцией

Зачастую на первом этапе проектирования САР в ее алгоритм функционирования закладывают простейший закон регулирования, для которого связь сигнала рассогласования  $\Delta X$  с сигналом  $X_1$  определяется уравнением

$$X_1 = k_1 \Delta X, \quad (1.55)$$

где  $k_1$  – передаточный коэффициент,

или передаточной функцией

$$W_1(s) = k_1.$$

Такой закон регулирования называется пропорциональным (*П-закон регулирования*). Ему соответствует аналогичная передаточная функция

$$W_{\Pi}(s) = k_{\Pi}.$$

В качестве корректирующего элемента (см. рис. 1.24) может быть принято идеальное дифференцирующее звено с передаточной функцией

$$W_K(s) = T_D s,$$

где  $T_D$  – постоянная времени дифференцирования, с.

Тогда в закон регулирования вводят производную от сигнала рассогласования

$$X_2 = T_D \frac{d\Delta X}{dt}. \quad (1.56)$$

С учетом выражений (1.55) и (1.56) закон регулирования примет вид:

$$X_3 = k_{\Pi} \Delta X + T_D \frac{d\Delta X}{dt}. \quad (1.57)$$

Соответствующая ему эквивалентная передаточная функция:

$$W_{\Pi D}(s) = W_{\Sigma}(s) = k_{\Pi} + T_D s. \quad (1.58)$$

Закон регулирования (1.57) с введением производной называется пропорционально-дифференциальным (*ПД-законом регулирования*). Регулятор, реализующий *ПД-закон регулирования* (его называют *ПД-регулятором*), реагирует не только на значение отклонения регулируемой величины в данный момент времени, но и на скорость изменения отклонения. Следовательно, регулятор работает с опережением, улучшая качество переходного процесса за счет учета тенденции последующего его развития, т. е. увеличивает быстродействие системы и запас устойчивости.

Эффективность введения в закон регулирования первой производной от сигнала рассогласования проиллюстрируем на следующем примере.

**Пример 1.** Пусть передаточные функции исходной САР (см. рис. 1.24) имеют следующий вид:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = k_4,$$

а соответствующая им передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_p(s) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)}.$$

Повысить быстродействие рассматриваемой САР можно за счет уменьшения влияния, например, постоянной времени  $T_2$ , подобрав постоянную времени дифференцирующего звена с учетом равенства  $T_d/k_1 = T_2$ . Тогда передаточная функция скорректированной разомкнутой САР:

$$\begin{aligned} W_{p.c}(s) &= [W_1(s) + W_K(s)] W_2(s) W_3(s) W_4(s) = \frac{(k_1 + T_d s) k_2 k_3 k_4}{(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} = \\ &= \frac{(T_d s / k_1 + 1) k_1 k_2 k_3 k_4}{(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{T_3 s + 1}. \end{aligned}$$

Из этого выражения видно, что введение в закон регулирования производной обеспечивает полную компенсацию влияния постоянной времени  $T_2$  и, следовательно, улучшает динамические свойства системы.

В качестве корректирующего элемента (см. рис. 1.24) можно использовать идеальное интегрирующее звено с передаточной функцией

$$W_K(s) = \frac{1}{T_{\text{И}} s},$$

где  $T_{\text{И}}$  – постоянная времени интегрирования, с.

Тогда в закон регулирования вводят интеграл от сигнала рассогласования

$$X_2 = \frac{1}{T_{\text{И}}} \int \Delta X dt.$$

В таком случае закон регулирования, называемый пропорционально-интегральным (*ПИ-законом регулирования*), будет описываться следующим уравнением:

$$X_3 = k_{\text{П}} \Delta X + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int \Delta X dt. \quad (1.59)$$

Соответствующая ему передаточная функция:

$$W_{\text{ПИ}}(s) = W_{\text{Э}}(s) = k_{\text{П}} + \frac{1}{T_{\text{И}} s}. \quad (1.60)$$

Введение интеграла в закон регулирования исключает статическую ошибку САР, превращая ее в астатическую систему, но при этом одновременно уменьшаются запас устойчивости и быстродействие системы.

В качестве корректирующих элементов можно одновременно применять дифференцирующие и интегрирующие звенья. В данном случае получается *ПИД-закон регулирования*, реализующий алгоритм

$$W_3 = k_{\Pi} \Delta X + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int \Delta X dt + T_{\text{Д}} \frac{d\Delta X}{dt}, \quad (1.61)$$

которому соответствует следующая передаточная функция:

$$W_{\text{ПИД}}(s) = k_{\Pi} + \frac{1}{T_{\text{И}} s} + T_{\text{Д}} s. \quad (1.62)$$

Совместное введение производной и интеграла обеспечивает желаемое быстроедействие, необходимый запас устойчивости и отсутствие статической ошибки САР.

Для последовательной коррекции статических САР может использоваться интегрирующее звено, включенное последовательно в канал прямой связи САР. В таком случае статическая САР превращается в астатическую, у которой отсутствует статическая ошибка. В результате такого включения интегрирующего звена получается интегральный закон (*И-закон*) регулирования:

$$X_{\text{вых}} = \frac{1}{T_{\text{И}}} \int X_{\text{вх}} dt,$$

где  $X_{\text{вых}}$  и  $X_{\text{вх}}$  – выходная и входная величины звена (элемента).

Для этого закона регулирования передаточная функция:

$$W_{\text{И}}(s) = \frac{1}{T_{\text{И}} s}.$$

Из всех рассмотренных законов регулирования *ПИД-закон* по своим функциональным возможностям является более универсальным. С его помощью можно формировать различные варианты законов регулирования.

Так при  $T_{\text{Д}} = 0$  и бесконечно большом значении  $T_{\text{И}}$  (1.62) получается *П-закон*; при  $T_{\text{Д}} = 0$  – *ПИ-закон*, а при бесконечно большом  $T_{\text{И}}$  и конечных значениях  $k_{\Pi}$  и  $T_{\text{Д}}$  формируется *ПД-закон*; при  $k_{\Pi} = 0$  и  $T_{\text{Д}} = 0$  получается *И-закон*.

Помимо передаточной функции (1.62), отображающей динамические свойства идеального *ПИД-закона регулирования*, применительно к промышленным регуляторам нашла распространение передаточная функция

$$W_{\text{ПИД}}(s) = k_{\text{р}} \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{из}} s} + T_{\text{пв}} s \right), \quad (1.63)$$

где  $k_{\text{р}}$  – коэффициент передачи регулятора;

$T_{\text{из}}$  – приведенная постоянная времени интегрирования, называемая постоянной времени изодрома;

$T_{\text{пв}}$  – приведенная постоянная времени дифференцирования, называемая постоянной времени предварения,

здесь  $k_{\text{р}} = k_{\Pi}$ ;  $T_{\text{из}} = k_{\text{р}} T_{\text{И}}$ ;  $T_{\text{пв}} = T_{\text{Д}}/k_{\text{р}}$ .

Параметры  $k_{\text{р}}$ ,  $T_{\text{из}}$  и  $T_{\text{пв}}$  являются варьируемыми (настраиваемыми), изменяя их определенным образом, можно добиться желаемых процессов регулирования.

В теории и практике САР для определения значений этих параметров, обеспечивающих рациональные или оптимальные переходные процессы, имеется многообразие как строго аналитических, так и эмпирических методов. При компьютерном моделировании САР для решения задач синтеза типовых законов регулирования целесообразно использовать эмпирические методы, базирующиеся на простейших формулах и номограммах [7, 11]. Одним из них, отличающимся существенной простотой, является эмпирический метод Циглера-Никольса [7].

Поэтапная методика его использования заключается в следующем.

**Этап 1.** Определяют значение критического коэффициента (усиления) пропорциональной составляющей закона регулирования (1.63)  $k_{\Pi\text{кр}}$  (при  $1/T_{\text{из}} = 0$ ;  $T_{\text{пв}} = 0$ ): его можно рассчитать на основе известных аналитических или графоаналитических методов (к примеру, методом Д-разбиения), или, что наиболее просто, найти непосредственно в процессе компьютерного моделирования САР, постепенно увеличивая  $k_{\Pi}$  до значения, когда в системе возникнут незатухающие гармонические колебания с периодом  $T_{\text{кр}}$ ;  $T_{\text{кр}}$  находят непосредственно по графику гармонических колебаний; значение периода  $T_{\text{кр}}$  расчетным путем определяют с помощью формулы  $T_{\text{кр}} = 2\pi/\omega_{\text{кр}}$ , где  $\omega_{\text{кр}}$  – частота незатухающих гармонических колебаний, рад/с.

**Этап 2.** По найденным значениям  $k_{\Pi\text{кр}}$  и  $T_{\text{кр}}$  рассчитывают параметры типовых законов регулирования, используя формулы:

- для *П*-закона –  $k_{\Pi} = 0,5k_{\Pi\text{кр}}$ ;
- для *ПИ*-закона –  $k_{\Pi} = 0,45k_{\Pi\text{кр}}$ ,  $T_{\text{из}} = 0,83T_{\text{кр}}$ ;
- для *ПИД*-закона –  $k_{\Pi} = 0,6k_{\Pi\text{кр}}$ ,  $T_{\text{из}} = 0,5T_{\text{кр}}$ ,  $T_{\text{пв}} = 0,125T_{\text{кр}}$ .

Приведенные выше формулы применимы для передаточной функции (1.63), которую для удобства компьютерного моделирования (рис. 1.25) можно представить в следующем виде:

$$W_{\text{ПИД}}(s) = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + k_{\text{Д}}s, \quad (1.64)$$

где  $k_{\text{И}} = k_{\Pi}/T_{\text{из}}$ ;  $k_{\text{Д}} = k_{\Pi}T_{\text{пв}}$ .

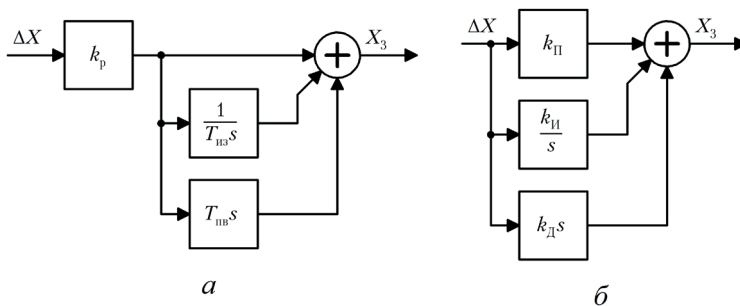


Рис. 1.25. Структурные схемы *ПИД*-законов регулирования:  
а – для передаточной функции (1.63); б – для передаточной функции (1.64)

Применительно к (1.64) параметры  $k_{\Pi}$ ,  $k_{\text{И}}$  и  $k_{\text{Д}}$  находят по формулам:

- для *П-закона* –  $k_{\Pi} = 0,5k_{\text{Пкр}}$ ;
- для *ПИ-закона* –  $k_{\Pi} = 0,45k_{\text{Пкр}}$ ,  $k_{\text{И}} = \frac{0,54 k_{\text{Пкр}}}{T_{\text{кр}}}$ ;
- для *ПИД-закона* –  $k_{\Pi} = 0,6k_{\text{Пкр}}$ ,  $k_{\text{И}} = \frac{1,2 k_{\text{Пкр}}}{T_{\text{кр}}}$ ,  $k_{\text{Д}} = 0,075k_{\text{Пкр}}T_{\text{кр}}$ .

Параметры закона регулирования, определенные с помощью метода Циглера-Никольса, обеспечивают в САР необходимый запас устойчивости, но не гарантируют оптимальных показателей качества процесса регулирования. Улучшенные или оптимальные показатели качества САР можно достичь либо подбором варьируемых параметров [ $k_{\text{р}}$ ,  $T_{\text{из}}$ ,  $T_{\text{пв}}$  для (1.63) и  $k_{\Pi}$ ,  $k_{\text{И}}$ ,  $k_{\text{Д}}$  для (1.64)], либо их оптимизацией. При этом в качестве начальных (стартовых) значений варьируемых параметров следует принимать их значения, рассчитанные по приведенным выше формулам.

Если задача коррекции САР на основе *ПИД-закона регулирования* (1.64) в процессе ее моделирования решается посредством подбора варьируемых параметров, то целесообразно руководствоваться следующим:

- увеличение коэффициента  $k_{\Pi}$  приводит к увеличению перерегулирования  $\sigma$ , времени регулирования  $t_{\text{р}}$  и уменьшению степени затухания  $\Phi$ ;
- увеличение коэффициента  $k_{\text{И}}$  приводит к уменьшению времени регулирования  $t_{\text{р}}$  и увеличению перерегулирования  $\sigma$ ;
- увеличение коэффициента  $k_{\text{Д}}$  приводит к уменьшению времени регулирования  $t_{\text{р}}$  и увеличению перерегулирования  $\sigma$ .

Обобщая изложенное и учитывая результаты анализа различных законов регулирования [6–11], можно сформулировать следующие рекомендации по их использованию.

*П-закон регулирования (П-регулятор)* рекомендуется для объектов с небольшим запаздыванием и незначительными изменениями внешних возмущений. Обычно они применяются в САР, содержащих одностепенные и двухстепенные объекты регулирования.

*И-закон регулирования (И-регулятор)* целесообразно применять в тех случаях, когда допускается большое время регулирования. Его нельзя использовать на объектах без самовыравнивания и с большим запаздыванием, так как процесс регулирования может быть неустойчивым. Если *И-закон регулирования* должен обеспечивать работу САР при непрерывно изменяющемся внешнем воздействии, то необходимо, чтобы максимальная скорость изменения регулирующего воздействия превышала скорость изменения внешнего воздействия.

*ПИ-закон регулирования (ПИ-регулятор)* обеспечивает работоспособность САР практически при сколько угодно широком диапазоне изменения внешних возмущений.

*ПД-закон регулирования (ПД-регулятор)* можно использовать в системах с большим временем запаздывания.

*ПИД-закон регулирования (ПИД-регулятор)* пригоден для САР с большим временем запаздывания, значительными и резкими изменениями внешних воздействий.

**Параллельная коррекция САР**, как отмечалось ранее, обеспечивается посредством обратных связей. Обратные связи (рис. 1.26) могут быть *положительными* или *отрицательными*, *жесткими* или *гибкими*.

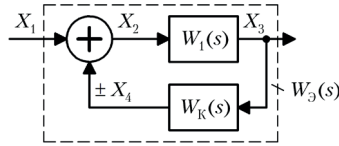


Рис. 1.26. Структурная схема элемента САР, охваченного обратной связью

*Жесткая обратная связь* формируется, если передаточная функция корректирующего элемента  $W_K(s) = k_K$ , т. е. если в качестве корректирующего элемента использовано безынерционное (пропорциональное) звено. Если в качестве корректирующего элемента применяют идеальное дифференцирующее звено с передаточной функцией  $W_K(s) = Ts$ , то получают *гибкую обратную связь*, которая действует только в переходном режиме работы САР.

Эффективность и область применения различных вариантов обратных связей для коррекции САР можно уяснить на следующих примерах.

**Пример 2.** Жесткой обратной связью с передаточной функцией  $W_K(s) = k_K$  охвачено апериодическое звено (см. рис. 1.26), имеющее передаточную функцию

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}.$$

При положительной обратной связи эквивалентная передаточная функция

$$W_{\text{Э.П}}(s) = \frac{W(s)}{1 - W(s)W_K(s)} = \frac{k}{Ts + 1 - kk_K}.$$

Разделив знаменатель и числитель этого выражения на  $1 - kk_K$ , получим:

$$W_{\text{Э.П}}(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1}, \quad (1.65)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{k}{1 - kk_K}; \quad T_1 = \frac{T}{1 - kk_K}.$$

Для отрицательной обратной связи:

$$W_{\text{Э.О}}(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}, \quad (1.66)$$

$$\text{где } k_2 = \frac{k}{1 + kk_K}; \quad T_2 = \frac{T}{1 + kk_K}.$$

Из передаточных функций (1.65), (1.66) следует, что жесткие обратные связи не приводят к качественным изменениям охватываемого апериодического звена

и не изменяют структурную схему системы, но изменяют постоянную времени и передаточный коэффициент аperiodического звена.

Положительная жесткая обратная связь увеличивает постоянную времени  $T_1$  и передаточный коэффициент  $k_1$  эквивалентного аperiodического звена. Следовательно, она уменьшает быстродействие и запас устойчивости системы. Если в выражении (1.65)  $kk_K > 1$ , то обратная связь превращает устойчивое аperiodическое звено в неустойчивое.

Отрицательная жесткая обратная связь уменьшает постоянную времени  $T_2$  и передаточный коэффициент  $k_2$  эквивалентного аperiodического звена. Следовательно, она увеличивает быстродействие, устойчивость системы и статическую ошибку системы.

Охват аperiodического звена жесткими обратными связями можно применять для коррекции только структурно-устойчивых САР.

**Пример 3.** Жесткой обратной связью охвачено колебательное звено системы (см. рис. 1.26). Передаточные функции:

$$W(s) = \frac{k}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}; \quad W_K(s) = k_K.$$

Выполнив те же преобразования, что и в предыдущем примере, получим:

$$W_{\Sigma}(s) = \frac{k_{\Sigma}}{T_{\Sigma 2}^2 s^2 + T_{\Sigma 1} s + 1}, \quad (1.67)$$

$$\text{где } k_{\Sigma} = \frac{k}{1 \pm kk_K}; \quad T_{\Sigma 2}^2 = \frac{T_2^2}{1 \pm kk_K}; \quad T_{\Sigma 1} = \frac{T_1}{1 \pm kk_K}.$$

Знак «плюс» в знаменателях постоянных времени и коэффициента передачи относится к отрицательной обратной связи, а «минус» – к положительной.

Эквивалентная передаточная функция  $W_{\Sigma}(s)$  не отличается от исходной передаточной функции  $W_{\Sigma}(s)$ . Следовательно, введение жесткой обратной связи вокруг колебательного звена не изменяет структурной схемы САР.

Из выражения (1.67) видно, что отрицательная обратная связь уменьшает, а положительная увеличивает постоянные времени  $T_{\Sigma 2}$ ,  $T_{\Sigma 1}$  и передаточный коэффициент  $k_{\Sigma}$ . Поэтому для улучшения динамических свойств САР применяют жесткие отрицательные связи. Причем их можно использовать только в структурно-устойчивых системах.

**Пример 4.** Жесткая отрицательная обратная связь [ $W_K(s) = k_K$ ] охватывает интегрирующее звено системы (см. рис. 1.26), передаточная функция которого

$$W(s) = 1/(Ts).$$

Эквивалентная передаточная функция:

$$W_{\Sigma.O}(s) = \frac{1/(Ts)}{1 + k_K/(Ts)} = \frac{1}{Ts + k_K} = \frac{k_{\Sigma}}{T_{\Sigma} s + 1}, \quad (1.68)$$

$$\text{где } k_{\Sigma} = 1/k_K; \quad T_{\Sigma} = T/k_K.$$



Из передаточной функции (1.68) следует, что при охвате интегрирующего звена жесткой отрицательной обратной связью эквивалентная передаточная функция будет соответствовать аperiodическому звену, т. е. структурная схема САР изменится.

Этот метод коррекции можно применять для улучшения динамических свойств (устойчивости и качества регулирования) и для превращения структурно-неустойчивых систем в структурно-устойчивые или астатических систем в статические.

**Пример 5.** Гибкая обратная связь  $[W_K(s) = T_D s]$  охватывает аperiodическое звено с передаточной функцией  $W(s) = k/(Ts + 1)$  (см. рис. 1.26).

Эквивалентная передаточная функция:

$$W_{\Sigma.A}(s) = \frac{k/(Ts + 1)}{1 \pm \frac{kT_D s}{Ts + 1}} = \frac{k}{(Ts + 1) \pm kT_D s} = \frac{k}{(T \pm kT_D)s + 1} = \frac{k}{T_{\Sigma.A}s + 1}, \quad (1.69)$$

где  $T_{\Sigma.A} = T \pm kT_D$  – постоянная времени эквивалентного звена (знак «плюс» для отрицательной связи, «минус» для положительной).

Анализ передаточной функции (1.69) показывает, что гибкая отрицательная обратная связь увеличивает постоянную времени  $T_{\Sigma.A}$ , а гибкая положительная уменьшает ее. При этом коэффициент передачи  $k$  не изменяется.

При введении гибкой отрицательной связи вокруг аperiodического звена повышаются устойчивость и качество переходного процесса (вместо затухающего колебательного можно получить монотонный переходный процесс), но при этом снижается быстродействие системы.

**Пример 6.** Гибкая обратная связь  $[W_K(s) = T_D s]$  введена вокруг интегрирующего звена с передаточной функцией  $W(s) = 1/(T_I s)$  (см. рис. 1.26). В данном случае эквивалентная передаточная функция

$$W_{\Sigma.I}(s) = \frac{1}{(T_I \pm T_D)s}. \quad (1.70)$$

Из передаточной функции (1.70) видно, что гибкая обратная связь не изменяет структурную схему интегрирующего звена, но изменяет его постоянную времени: она увеличивается при отрицательной связи и уменьшается при положительной. Данный метод коррекции применяют для превращения неустойчивых систем в устойчивые или для улучшения качества процесса регулирования.

В рассмотренных методах коррекции САР использованы идеальные дифференцирующие и интегрирующие звенья, которые реализовать на практике простыми средствами очень сложно. Поэтому для коррекции автоматических систем чаще используют более простые, так называемые реальные дифференцирующие и интегрирующие звенья.

Схемы и передаточные функции некоторых идеальных и реальных корректирующих элементов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Идеальные и реальные электрические корректирующие элементы

| Тип элемента                                                                                                            | Схема | Передаточная функция                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Идеальный дифференцирующий элемент на операционном усилителе                                                            |       | $W(s) = -Ts, T = RC$                                                                                                                                                                 |
| Реальный дифференцирующий элемент в виде RC-контура                                                                     |       | $W(s) = \frac{Ts}{Ts + 1},$<br>$T = RC$                                                                                                                                              |
| Реальный дифференцирующий элемент в виде RC-контура с активной нагрузкой                                                |       | $W(s) = \frac{Ts}{Ts + 1},$<br>$T = \frac{RR_Н}{R + R_Н}C$                                                                                                                           |
| Дифференцирующий ненагруженный трансформатор                                                                            |       | $W(s) = \frac{kTs}{Ts + 1},$<br>$k = \omega_2/\omega_1; T = L_1/R_1$                                                                                                                 |
| Дифференцирующий трансформатор с активной нагрузкой                                                                     |       | $W(s) = \frac{kTs}{Ts + 1},$<br>$k = \frac{\omega_2}{\omega_1}; T = \frac{M}{R_1} \approx \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2}$                                                               |
| Дифференцирующий трансформатор, нагруженный активно-индуктивной нагрузкой (входная и выходная величины $I_1$ и $I_2$ )  |       | $W(s) = \frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \frac{kT_1s}{T_2s + 1};$<br>$k = \frac{R_1\omega_2}{(R_2 + R_Н)\omega_1};$<br>$T_1 = \frac{L_1}{R_1}; T_2 = \frac{L_2 + L_Н}{R_2 + R_Н}$             |
| Дифференцирующий трансформатор, нагруженный активно-индуктивной нагрузкой (входная и выходная величины $U_ВХ$ и $I_2$ ) |       | $W(s) = \frac{U_ВХ(s)}{I_2(s)} = \frac{kT_1s}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$<br>$k = \frac{R_Н\omega_2}{(R_2 + R_Н)\omega_1};$<br>$T_1 = \frac{L_1}{R_1}; T_2 = \frac{L_2 + L_Н}{R_2 + R_Н}$ |
| Идеальный интегрирующий элемент на операционном усилителе                                                               |       | $W(s) = -\frac{1}{Ts}, T = RC$                                                                                                                                                       |

**Пояснение:** при использовании операционных усилителей в корректирующих устройствах (элементах) следует иметь в виду, что они, в зависимости от их схем, могут иметь либо инвертирующий вход, либо в сочетании с ним – неинвертирующий (рис. 1.27).

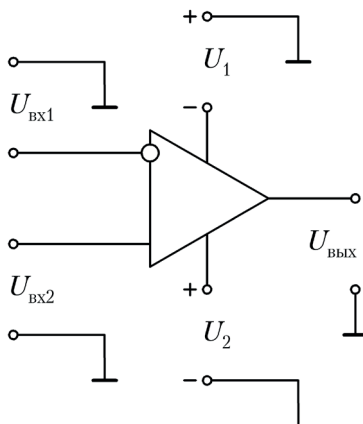


Рис. 1.27. Общее условное обозначение операционного усилителя с инвертирующим ( $U_{\text{вх1}}$ ) и неинвертирующим ( $U_{\text{вх2}}$ ) входами:  $U_1$  и  $U_2$  – напряжение источников питания усилителя

В табл. 1.1 для схем идеального дифференцирующего и интегрирующего элемента использован инвертирующий вход. В связи с этим в правой части их передаточных функций присутствует знак «минус».

### 1.3.4. Оптимизация САР

**Оптимальной** называют автоматическую систему с наилучшими качествами по какому-либо показателю. Например, применительно к САР система, оптимальная по быстродействию, осуществляет наиболее быстрый переход из одного установившегося состояния в другое; система, оптимальная по среднеквадратичному отклонению регулируемой величины от ее заданного значения, обеспечивает наивысшую в определенных условиях точность регулирования. В общем случае автоматические системы могут быть оптимальными по затратам энергии, производительности, по качеству продукции, надежности и по целому ряду других показателей.

Для каждой конкретной оптимальной системы устанавливают определенный **критерий оптимальности**, под которым понимают некое число, зависящее от параметров системы или алгоритма ее функционирования (закона управления или регулирования). Критерий оптимальности, выражаемый в какой-либо математической форме, составляют так, чтобы посредством его минимизации получить удовлетворительные результаты управления.

Оптимизацию САР часто проводят с целью достижения наилучших показателей качества регулирования. Прикладные программы для компьютерного мо-

делирования автоматических систем, в том числе и SimInTech, обеспечивают оптимизацию на основе интегральных критериев оценки качества процесса регулирования. При такой оптимизации, называемой *параметрической*, из множества возможных переходных процессов САР для различных оптимизируемых параметров выбирается переходный процесс с минимальным значением одного из интегральных критериев качества. В качестве критерия оптимальности при этом целесообразно использовать функционал

$$S_1 = \int_0^{\infty} \Delta x^2 dt, \quad (1.71)$$

где  $\Delta x = x_0 - x$  – сигнал рассогласования, представляющий функцию времени:  $\Delta x = f(t)$ ;  $x_0$  и  $x$  – соответственно задающий сигнал и сигнал обратной связи САР.

Функционал (1.71) однозначно зависит от среднего квадратического отклонения регулируемой величины (средней квадратической ошибки) САР и геометрически интерпретируется как площадь  $S$  под графиком  $\Delta x^2 = f^2(t)$  (рис. 1.28).

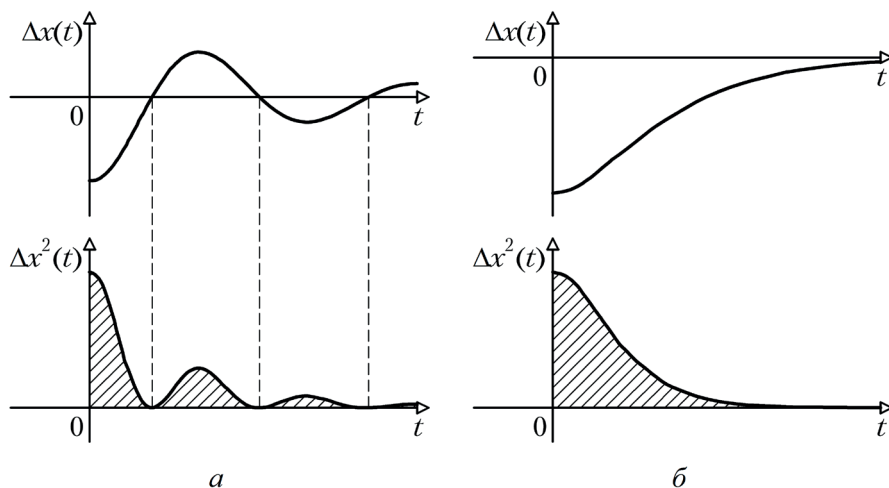


Рис. 1.28. К геометрической интерпретации функционала (1.71) при переходных процессах: а – колебательном; б – аperiodическом

Иногда оптимизация САР на основе функционала (1.71) не дает положительного результата – в процессе моделирования получается затянувшийся колебательный процесс. Это объясняется следующим.

Квадратичный интегральный показатель качества (1.71) оценивает процесс по сумме площадей под графиком  $\Delta x^2$ . При определенных условиях монотонный и колебательный процессы могут иметь такое соотношение площадей, при котором колебательный переходный процесс представляется лучшим, чем монотонный. В таком случае следует использовать более сложную интегральную оценку качества в виде функционала

$$S_2 = \int_0^{\infty} \left[ \Delta x^2 + T^2 \left( \frac{d\Delta x}{dt} \right)^2 \right] dt, \quad (1.72)$$

где  $T$  – постоянная времени идеализированного экспоненциального переходного процесса.

Критерий оптимальности (1.72), в отличие от оценки (1.71), учитывает плавность переходного процесса за счет скорости изменения регулируемой величины.

Рассматривая постоянную времени  $T$  как варьируемый параметр, посредством его подбора в процессе компьютерной оптимизации САР можно получить требуемый оптимальный переходный процесс регулирования. При этом граничное максимальное значение  $T$  в процессе вариации следует задавать ориентировочно с учетом значения требуемой длительности времени регулирования  $t_p$  (см. рис. 1.19).

Целесообразность использования квадратичных критериев (1.71), (1.72) при параметрической оптимизации обусловлена тем, что их можно применять как при колебательных, так и при апериодических переходных процессах САР. В этой связи необходимо отметить следующее: если заранее известно, что в САР происходят только апериодические переходные процессы, то оптимизацию можно проводить по минимуму функционала:

$$S_3 = \int_0^{\infty} \Delta x dt. \quad (1.73)$$

С помощью компьютерных моделирующих программ на основе критериев (1.71), (1.72) и (1.73) можно не только выполнить параметрическую оптимизацию САР, но и подобрать наилучший закон регулирования из рассмотренных ранее – (1.55), (1.57), (1.59), (1.61) – или необходимый корректирующий элемент с оптимальными параметрами.

### 1.3.5. Упрощение математических моделей САР с учетом малых параметров

Значения параметров элементов САР могут различаться на один или несколько порядков. В таком случае параметры с меньшими значениями можно рассматривать как малые параметры. Установлено, что малые параметры в большинстве случаев несущественно влияют на переходный процесс и ими без ущерба для точности исследования можно пренебречь. Это приводит к снижению порядка САР и упрощению исследования.

В некоторых случаях отбрасывание малых параметров сильно искажает переходный процесс и может послужить причиной ошибки. Поэтому очень важно оценить влияние малых параметров на поведение системы автоматического регулирования.

К параметрам элементов САР относятся постоянные времени и коэффициенты передачи. Коэффициенты передачи элементов входят сомножителями в общий

коэффициент усиления системы, поэтому пренебречь ими нельзя ни в коем случае. Постоянные времени при их относительной малости можно в ряде случаев отбрасывать.

Относительно малыми постоянные времени считаются в том случае, если они меньше других, ближайших по величине постоянных на один или несколько порядков (т. е. в 10, в 100 раз и более). Для САР, структурная схема которой показана на рис. 1.29, постоянные времени имеют значения:  $T_1 = 0,05$  с;  $T_2 = 0,1$  с;  $T_3 = 0,2$  с;  $T_4 = 1$  с. Постоянная времени  $T_1$  меньше следующей по величине постоянной  $T_2$  всего лишь в 2 раза,  $T_2$  меньше  $T_3$  тоже в 2 раза, а  $T_3$  меньше  $T_4$  в 5 раз. Ни одна постоянная времени не может считаться достаточно малой, чтобы ее можно было бы отбросить. Если бы постоянная времени  $T_1$  была меньше или равна 0,01 с, то ею можно пренебречь, так как она по величине на один порядок меньше постоянной времени  $T_2 = 0,1$  с.

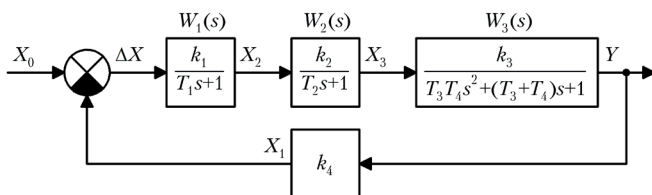


Рис. 1.29. Структурная схема САР

Малые постоянные времени можно отбрасывать в одноконтурных САР. В многоконтурных системах их можно отбрасывать только в элементах, входящих в контур главной обратной связи, и ни в коем случае нельзя отбрасывать, если эти постоянные характеризуют элементы, входящие в местные обратные связи. Это объясняется тем, что постоянные времени элементов обратной связи перемножаются с постоянными времени охватываемых звеньев, вследствие чего они существенно влияют на переходный процесс системы.

Отбрасывание одной постоянной времени снижает порядок САР на единицу, и все дальнейшие исследования можно выполнять с помощью упрощенной структурной схемы. Однако в тех случаях, когда при исследовании упрощенной системы она оказывается близкой к границе устойчивости, ее устойчивость следует проверить по полной структурной схеме, так как отбрасывание малых параметров иногда может привести устойчивую систему к неустойчивой.

Отбрасывание малых постоянных времени приводит к потере в характеристическом уравнении САР корней с большими абсолютными значениями вещественной части, которые соответствуют быстро затухающим составляющим переходного процесса, что вносит некоторую погрешность в самом начале переходного процесса. Это справедливо в том случае, когда рабочие частоты системы относительно низки, что обычно имеет место при автоматизации технологических процессов. Звенья с большими постоянными времени не пропускают высоких частот,

переходные процессы происходят относительно медленно, и рабочими оказываются только низкие частоты (медленные изменения воздействий). Следовательно, отбрасывание малых параметров вполне допустимо.

Если объект регулирования имеет большую постоянную времени, а постоянные времени звеньев, входящих в регулятор, на много порядков меньше, то, не внося заметной погрешности, все малые постоянные времени можно приравнять к нулю и привести порядок системы к порядку уравнения регулируемого объекта, что существенно упрощает исследование.

С учетом изложенного в качестве примера можно упростить структурную схему САР температуры в термической камере (см. рис. 1.3 при  $T_T = 8-10$  с,  $T_H = 300$  с,  $T_K = 1800$  с) за счет отбрасывания постоянной времени термопары  $T_T$ , так как она в 30 раз меньше постоянной времени нагревателя  $T_H$  и в 190 раз меньше постоянной времени термической камеры  $T_K$ . Таким образом, термопару применительно к данной САР можно рассматривать как пропорциональное звено с передаточной функцией  $W_T(s) = k_T$ .

### 1.3.6. Характеристики, режимы работы и цели моделирования релейных САР

Линейные САР, относящиеся к классу непрерывных систем, по своим качественным показателям являются наиболее совершенными системами, но их практическая реализация в некоторых случаях не всегда возможна по ряду технических причин или нецелесообразна по технико-экономическим показателям. В связи с этим наряду с линейными находят широкое применение релейные САР, относящиеся к так называемому классу нелинейных дискретных автоматических систем, в которых сигналы в процессе регулирования изменяются во времени скачкообразно. Технической причиной появления релейных свойств САР является использование в них дискретных элементов: релейных датчиков, усилителей и исполнительных устройств. Как примеры дискретных элементов можно привести биметаллические датчики температуры, контактные преобразователи линейных (угловых) перемещений, пороговые элементы типа триггера Шмидта, электромагнитные реле, магнитные и тиристорные пускатели, фрикционные электромагнитные муфты, релейные исполнительные электромагнитные механизмы и т. п.

В зависимости от физической сущности и конструкции дискретных элементов автоматики они могут иметь статические характеристики релейного вида, показанные на рис. 1.30, 1.31, смысловое значение буквенных обозначений на которых следующее:  $X_{ВХ}$ ,  $X_{ВЫХ}$  – входная и выходная величины элемента;  $c$  – дискретное значение выходной величины;  $b$  – зона нечувствительности;  $m$  – коэффициент возврата, значения которого могут быть любыми дробными числами в интервале  $-1 \leq m \leq 1$ .

Характеристики, показанные на рис. 1.30, имеют поляризованные реле, трехпозиционные регуляторы температуры, реверсивные магнитные и тиристорные пускатели, двухходовые электромагнитные гидравлические и пневматические распределители (золотники).

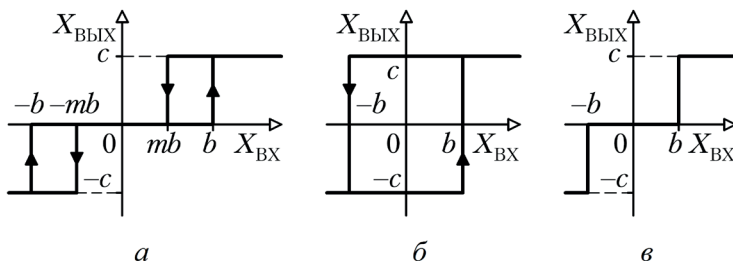


Рис. 1.30. Симметричные трехпозиционные релейные характеристики:  
 а – общего вида с зоной нечувствительности и гистерезисом;  
 б – с гистерезисом; в – с зоной нечувствительности

Несимметричными релейными характеристиками (рис. 1.31) обладают двухпозиционные регуляторы температуры, электромагнитные реле, неререверсивные реле, неререверсивные магнитные и тиристорные пускатели, электромагнитные одноходовые гидро- и пневмораспределители, электромагнитные муфты трения, контактные биметаллические термодатчики, dilatометрические датчики (температуры, влажности воздуха) с контактными преобразователями линейного перемещения, триггеры Шмидта, фотореле и т. д.

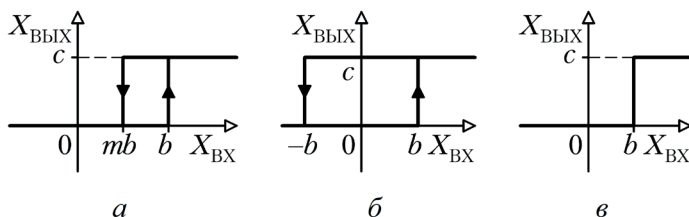


Рис. 1.31. Несимметричные двухпозиционные релейные характеристики:  
 а – с зоной нечувствительности и гистерезисом; б – с гистерезисом;  
 в – с зоной нечувствительности

Особенностью релейных САР является возможность существования, наряду со сходящимися переходными процессами (рис. 1.32а), автоколебательных процессов регулирования (рис. 1.32б), параметры которых (амплитуда и период) зависят от вида релейной характеристики, значения ее параметров и динамических свойств объекта регулирования и непрерывных элементов системы.



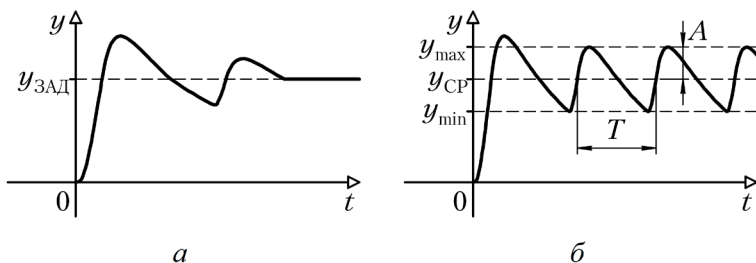


Рис. 1.32. Сходящийся (а) и автоколебательный (б) процессы регулирования:  
 $y$  – регулируемая величина САР;  $A$  и  $T$  – амплитуда и период автоколебаний  
 $(A = (y_{\max} - y_{\min})/2)$

Целесообразность применения релейных САР определяется прежде всего требованиями к процессу регулирования применительно к конкретному технологическому процессу (объекту). Если объект регулирования не требует высокой точности поддержания регулируемой величины и автоколебания не сказываются отрицательно на технологическом процессе и надежности элементов системы, то можно использовать релейную САР как более простую и дешевую, по сравнению с непрерывной системой.

Так, например, для водонапорной башни, используемой в системах водоснабжения, нет необходимости применять непрерывный датчик для контроля уровня воды. В таких системах широкое распространение нашли дискретные электродные датчики (рис. 1.33), отличающиеся простотой и обеспечивающие достаточную точность контроля уровня воды в башне. Нецелесообразность построения непрерывной САР для водонапорной башни также обуславливается широким распространением насосных установок с асинхронным короткозамкнутым электроприводом, управляемыми магнитными или тиристорными пускателями, являющимися элементами дискретного действия.

Система (рис. 1.33) работает следующим образом: контроль уровня воды в башне осуществляется с помощью двух электродов – верхнего уровня ВУ и нижнего НУ, которые при соприкосновении с водой представляют электрические контакты, включенные во входную цепь прибора САУ-М2. Когда воды в башне нет, контакта электродов с водой нет, выходное реле К1 САУ-М2 включено, и его контакты К1 в цепи катушки магнитного пускателя КМ1 замкнуты. Магнитный пускатель КМ1 срабатывает и включает двигатель М1 насоса. При достижении воды верхнего уровня (верхнего электрода ВУ) выходное реле К1 прибора САУ-М2 выключается, и его замыкающиеся контакты возвращаются в исходное состояние, разрывая цепь катушки магнитного пускателя. Электродвигатель насоса отключается. Его повторное включение произойдет после того, когда исчезнет контакт воды с датчиком нижнего уровня НУ.

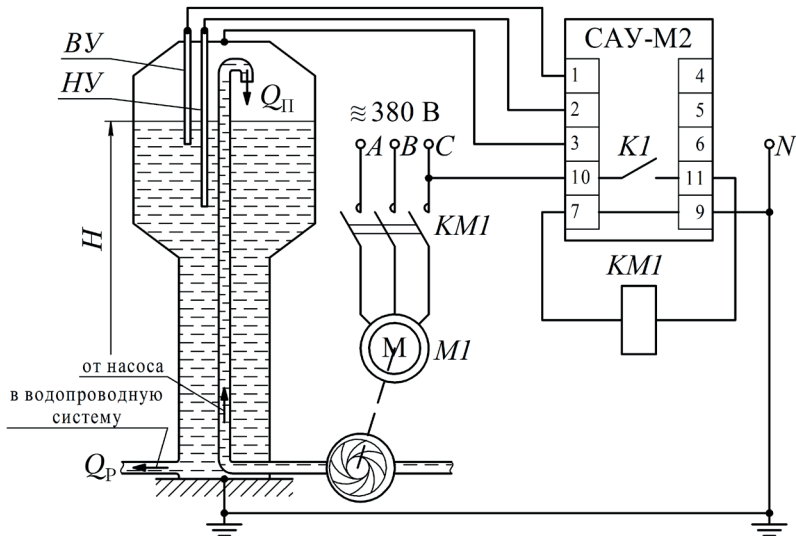


Рис. 1.33. Схема релейной САР уровня воды на базе прибора ОВЕН САУ-М2

Объектом регулирования в данной САР является водонапорная башня. Регулируемой величиной объекта – уровень воды в башне  $H$ , регулирующим воздействием – количество воды  $Q_{\Pi}$ , поступающее от насоса, а возмущающим воздействием – расход воды  $Q_{\text{Р}}$ . Следовательно, объект регулирования можно представить в виде, изображенном на рис. 1.34.

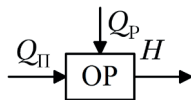


Рис. 1.34. Водонапорная башня как объект регулирования

Главная обратная связь в системе единичная. Она замыкается через воду, обеспечивая включение либо датчика верхнего, либо датчика нижнего уровня. При этом в процессе работы системы уровень воды в башне будет колебаться в пределах, ограниченных датчиками ВУ и НУ. То есть в башне будет какой-то средний уровень воды  $H_0$  (рис. 1.35), значение которого при  $Q_{\text{Р}} = \text{const}$  будет полностью определяться расположением датчиков ВУ и НУ по высоте башни: чем выше расположены датчики, тем больше  $H_0$ , и наоборот. Таким образом, задающим воздействием в данной системе будут координаты  $H_{01}$  и  $H_{02}$  датчиков ВУ и НУ или

их усредненная величина  $H_0$ . С этой усредненной величиной  $H_0$  и сравнивается фактическое значение регулируемой величины  $H$ . То есть датчики ВУ и НУ выполняют роль сравнивающего органа. Эти же датчики выполняют роль воспринимающего органа, т. е. они подают электрические сигналы в зависимости от разности  $\Delta H = H_0 - H$  на включение или отключение насоса. Электрические сигналы от датчиков поступают на усилительный орган, роль которого выполняют прибор САУ-М2 с выходным реле К1 совместно с магнитным пускателем КМ1. Сигнал усилительного органа поступает на исполнительный орган – электродвигатель с насосом.

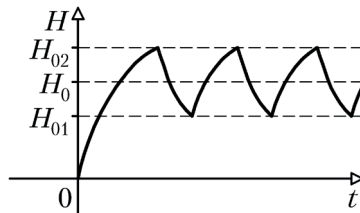


Рис. 1.35. График изменения уровня воды в водонапорной башне

Таким образом, функциональная схема САР может быть представлена в виде, показанном на рис. 1.36, где:  $H$  – регулируемая величина (уровень воды в башне);  $Q_{\Pi}$  – регулирующее воздействие (производительность насоса);  $Q_p$  – возмущающее воздействие (расход воды из башни);  $H_0$  – задающее воздействие, определяемое расположением датчиков уровня воды;  $\Delta H$  – рассогласование ( $\Delta H = H_0 - H$ );  $U_1$  – напряжение на входе прибора САУ-М2;  $U_2$  – напряжение на зажимах электродвигателя насоса.

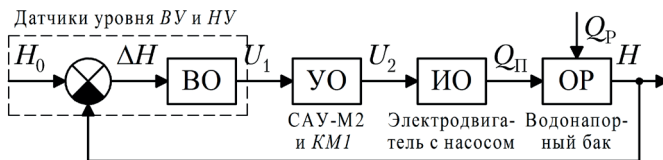


Рис. 1.36. Функциональная схема САР уровня воды в водонапорной башне

Датчики уровня ВУ и НУ совместно с прибором САУ-М2 и магнитным пускателем КМ1 можно рассматривать как одно звено САР (рис. 1.36), статическая характеристика которого будет иметь вид, показанный на рис. 1.37.

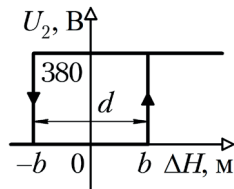


Рис. 1.37. Общая статическая характеристика релейной (дискретной) части САР (рис. 1.33):  
 $d = (H_{01} + H_{02})/2$  – дифференциал

Таким образом, САР уровня воды в водонапорной башне состоит из непрерывной части – ОР, ИО и релейной, включающей в себя остальные элементы системы.

Передаточная функция объекта регулирования – водонапорного бака при постоянном расходе  $Q_p$  по регулирующему воздействию:

$$W_O(s) = \frac{H(s)}{Q_{II}(s)} = \frac{k_O}{T_O s + 1},$$

где  $H(s)$ ,  $Q_{II}(s)$  – изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях величин  $H$ ,  $Q_{II}$ ;  $T_O$ ,  $k_O$  – постоянная времени и передаточный коэффициент.

В линейном приближении исполнительный орган – насосный агрегат соответствует аperiodическому звену первого порядка, постоянная времени которого много меньше постоянной времени  $T_O$ . В связи с этим исполнительный орган принято рассматривать как пропорциональное звено с передаточной функцией

$$W_{II}(s) = \frac{Q_{II}(s)}{U_2(s)} = k_{II},$$

где  $U_2(s)$  – изображение по Лапласу напряжения  $U_2$  при нулевых начальных условиях;  $k_{II}$  – передаточный коэффициент.

С учетом общей статической характеристики (рис. 1.37) и передаточных функций  $W_O(s)$ ,  $W_{II}(s)$ , на основе функциональной схемы (рис. 1.36), структурную схему – математическую модель рассматриваемой САР можно представить в виде, показанном на рис. 1.38.

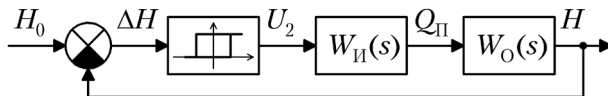


Рис. 1.38. Структурная схема САР уровня воды в водонапорной башне

Как отмечалось выше, в релейных САР наряду со сходящимися переходными процессами возможны и автоколебательные (рис. 1.32). В связи с этим при моделировании нелинейных САР, в том числе и релейных систем, достигают следующих целей:

- определяют параметры релейного элемента, при которых в системе возможны сходящиеся переходные процессы, удовлетворяющие необходимым требованиям качества процесса регулирования;
- если в системе будут только автоколебательные процессы регулирования, то находят их параметры (амплитуду и частоту) при различных значениях параметров релейного элемента; на основе анализа параметров автоколебаний, исходя из технологических требований к стабилизации регулируемой величины и требований к надежности элементов САР, определяют возможность работы системы в автоколебательном режиме;
- если процессы регулирования (сходящиеся или автоколебательные) не удовлетворяют необходимым требованиям, то исходную САР дополняют корректирующими элементами.

Для моделирования релейных САР в среде SimInTech есть отдельная библиотека «Нелинейные», содержащая практически все звенья с любыми релейными характеристиками и типовыми нелинейностями.

### 1.3.7. Моделирование САР с микроЭВМ

В современной автоматике широкое распространение нашли автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП). Они строятся на основе комплекса микропроцессорных средств, главными составляющими которого является электронная вычислительная машина (ЭВМ) – микроЭВМ, устройства сопряжения (УСО) с технологическим объектом и периферийные устройства (см. приложение Д). МикроЭВМ, обладающие высоким быстродействием, позволяют в мультиплексорном режиме управлять технологическими объектами с большим количеством управляемых величин (координат) или группой объектов. Один контур регулирования системы с микроЭВМ можно рассматривать как отдельную одномерную цифровую систему автоматического регулирования [6, 8, 9] (рис. 1.39).

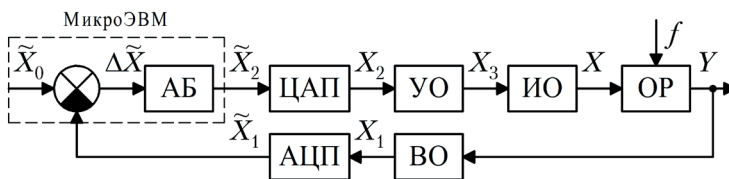


Рис. 1.39. Функциональная схема САР с микроЭВМ (цифровой САР)

На рис. 1.39 приняты следующие обозначения: ОР – объект регулирования; ВО – воспринимающий орган; УО – усилительный орган; ИО – исполнительный орган; АЦП – аналого-цифровой преобразователь аналогового сигнала датчика (воспринимающего органа)  $X_1$  в дискретный двоичный сигнал  $\tilde{X}_1$ ; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь выходного дискретного двоичного сигнала микроЭВМ  $\tilde{X}_2$  в аналоговый сигнал  $X_2$ .

В микроЭВМ, а точнее в ее процессоре, выполняются операции вычисления сигнала рассогласования  $\Delta\tilde{X} = \tilde{X}_0 - \tilde{X}_1$  и предписанного алгоритма управления (на функциональной схеме эти операции условно отображены соответственно сравнивающим органом СО и виртуальным алгоритмическим блоком АБ). Связь между непрерывной частью САР и микроЭВМ, являющейся дискретным устройством, осуществляется посредством АЦП и ЦАП. Статические характеристики этих преобразователей являются нелинейными (рис. 1.40). Когда разрядность преобразователей достаточно велика, нелинейностью их характеристик пренебрегают. В таком случае выполняется линеаризация, как показано на рис. 1.40 штриховыми линиями (см. п. Д.2.3 приложения Д).

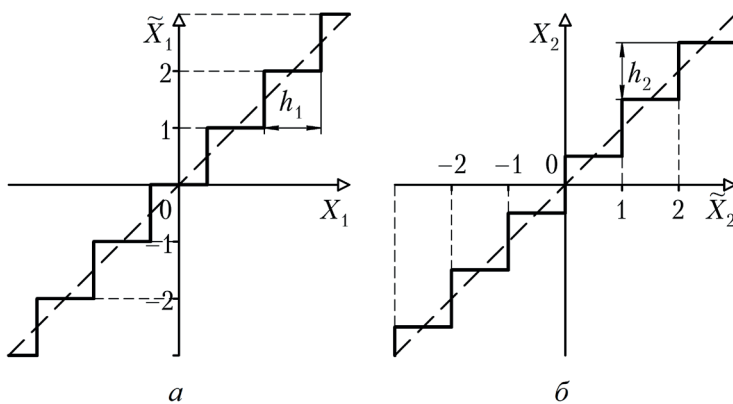


Рис. 1.40. Статические характеристики АЦП (а) и ЦАП (б)

Коэффициенты передачи АЦП и ЦАП после линеаризации их статических характеристик:

$$k_{\text{АЦП}} = 1/h_1; k_{\text{ЦАП}} = h_2.$$

Известно, что динамические свойства любой линейной (линеаризованной) САР зависят от передаточной функции разомкнутой системы  $W_{\text{РАЗ}}(s)$  (на ее основе формируется характеристическое уравнение системы  $1 + W_{\text{РАЗ}}(s) = 0$ ). Общий коэффициент передачи АЦП и ЦАП, входящий в передаточную функцию  $W_{\text{РАЗ}}(s)$ :

$$k_{\text{АЦП}} k_{\text{ЦАП}} = h_2/h_1.$$

При равенстве  $h_1$  и  $h_2$  (такой случай имеет место при одинаковом числе двоичных разрядов преобразователей) общий коэффициент передачи АЦП и ЦАП обращается в единицу. Следовательно, САР будет не критична к статическим свойствам АЦП и ЦАП. На характере переходных процессов САР будут сказываться только динамические свойства ЦАП, поскольку он, в отличие от АЦП, является динамическим элементом, структурная схема которого имеет вид, показанный на рис. 1.41.

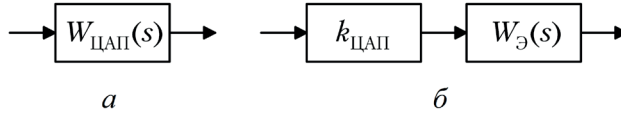


Рис. 1.41. Структурная схема ЦАП: а – обобщенная; б – развернутая

Звено с передаточной функцией  $W_{\text{Э}}(s)$  (рис. 1.41), называемое экстраполятором нулевого порядка, определяется как

$$W_{\text{Э}}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s},$$

где  $T$  – период квантования (дискретизации) сигнала по времени.

Экстраполятор как звено цифровой САР отображает (моделирует) временное запаздывание, вносимое в систему процессом дискретизации сигнала с периодом квантования  $T$ . Это запаздывание принято учитывать посредством приближенной аппроксимации [8, 9]:

$$W_{\text{Э}}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \approx e^{-\tau s},$$

где  $\tau$  – запаздывание, определяемое как  $\tau = T/2$ .

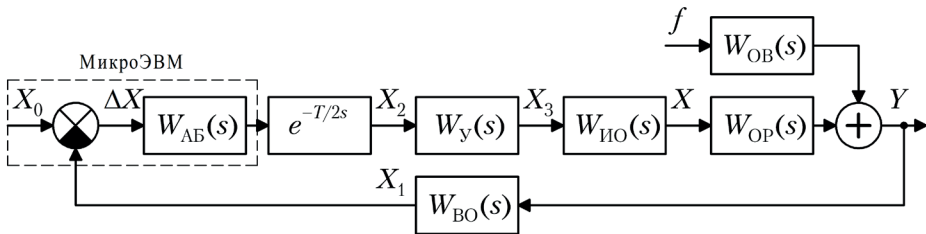


Рис. 1.42. Структурная схема непрерывной модели САР с микроЭВМ

С учетом изложенного выше исходную САР с микроЭВМ (рис. 1.39) можно представить в виде структурной схемы непрерывной САР (рис. 1.42). В такой структурной схеме передаточная функция алгоритмического блока  $W_{\text{АБ}}(s)$  соответствует необходимому, исходя из требований синтеза САР, закону регулирования, а передаточная функция  $e^{-\tau s}$  учитывает запаздывание в системе, обусловленное дискретизацией с периодом квантования  $T$ .

По непрерывной модели САР (рис. 1.42) на основе методов линейной теории автоматического регулирования определяют передаточную функцию алгоритмического блока  $W_{\text{АБ}}(s)$ . Алгоритмический блок по своей сути является регулятором с передаточной функцией  $W_{\text{АБ}}(s)$ , которая в микропроцессоре микроЭВМ реализуется в виде численного алгоритма, который можно определить с помощью дискретного преобразования Лапласа или с помощью одного из способов дис-

кретизации, основанных на замене производных разностными схемами и методах численного интегрирования. Наибольшее распространение на практике получил способ, основанный на численном интегрировании методом трапеций, известный как преобразование Тустена (Tustin) [7, 8]. На основе этого преобразования в результате замены

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}$$

получают дискретную передаточную функцию:

$$W_{AB}(z) = W_{AB}(s) \Big|_{s=\frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}}.$$

Следует отметить, что подобные преобразования при использовании методов численного интегрирования Эйлера (методов прямоугольника) выполняют на основе следующих соотношений: для прямого метода  $s = (z-1)/T$  и для обратного  $-s = (z-1)/(Tz)$ .

В результате такого преобразования, которое иногда называют переоборудованием регулятора, получают непрерывно-дискретную модель цифровой САР. Дискретную часть непрерывно-дискретных моделей цифровых САР в среде SimInTech реализуют с привлечением библиотеки «Дискретные».

Поясним рассмотренную методику переоборудованием регулятора на следующем примере [9].

**Пример 7.** Задана непрерывная модель цифровой САР в виде структурной схемы (рис. 1.43), в которой период квантования  $T = 0,02$  с учитывается посредством запаздывающего звена с передаточной функцией  $e^{-\tau s}$ , где  $\tau = T/2$ . Передаточная функция алгоритмического блока:

$$W_{AB}(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}, \quad (1.74)$$

где  $T_1 = 0,5$  с;  $T_2 = 0,05$  с.

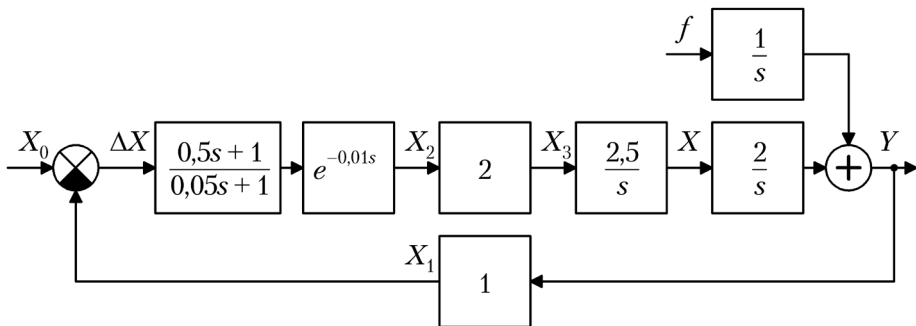


Рис. 1.43. Непрерывная модель САР с микроЭВМ



Необходимо непрерывную модель системы (рис. 1.43), используя метод интегрирования Тустена, преобразовать в непрерывно-дискретную модель.

Подставляя  $s = \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}$  в (1.74), получим дискретную передаточную функцию цифрового регулятора (алгоритмического блока):

$$W_{AB}(z) = \frac{0,5s+1}{0,05s+1} \Big|_{s=\frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}} = \frac{51z-49}{6z-4}. \quad (1.75)$$

Заменяя в структурной схеме (рис. 1.43) звенья, относящиеся к цифровой части САР, звеном с передаточной функцией (1.75), получим непрерывно-дискретную модель САР (рис. 1.44).

На рис. 1.45 приведены переходные процессы при единичном ступенчатом задающем воздействии (кривые разгона) в непрерывной и непрерывно-дискретной модели САР, полученные посредством моделирования в среде SimInTech.

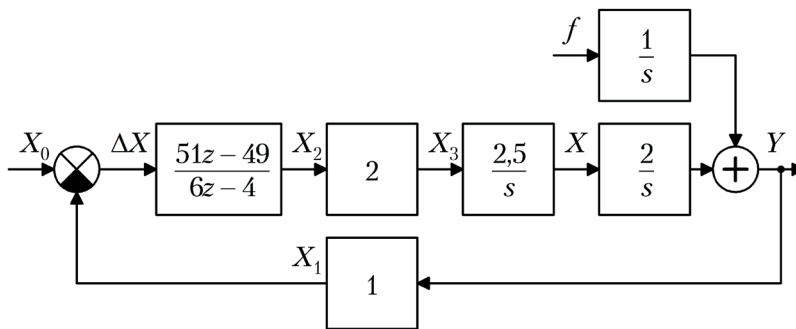


Рис. 1.44. Непрерывно-дискретная модель САР

Анализ графиков показывает их близкую сходимость, что свидетельствует о практически полной адекватности непрерывной и непрерывно-дискретной моделей рассматриваемой САР при заданном значении периода квантования  $T = 0,02$  с. Здесь следует отметить, что адекватность моделей при увеличении периода квантования  $T$  может нарушаться. Это показывают кривые разгона непрерывной и непрерывно-дискретной модели при увеличенных значениях  $T$  (рис. 1.46 и 1.47).

Рассмотренный пример показывает, что окончательные параметры синтезированного регулятора следует принимать, руководствуясь результатами синтеза САР на основе их непрерывно-дискретной модели.

Обобщая изложенное, можно сформулировать следующую последовательность синтеза цифровых САР:

- на основе непрерывной модели системы определяются вид передаточной функции алгоритмического блока  $W_{AB}(s)$  и ее числовые параметры, обеспечивающие заданные показатели процесса управления;

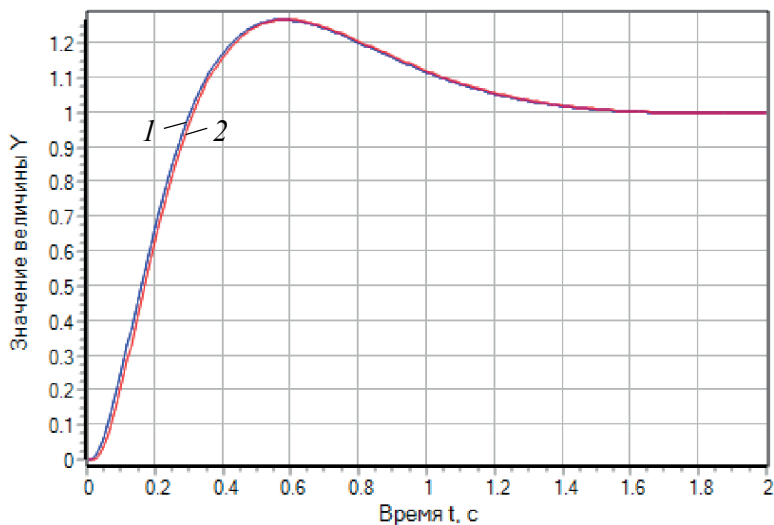


Рис. 1.45. Графики переходных процессов САР при  $T = 0,02$  с:  
1 – в непрерывной модели (рис. 1.43);  
2 – в непрерывно-дискретной модели (рис. 1.44)

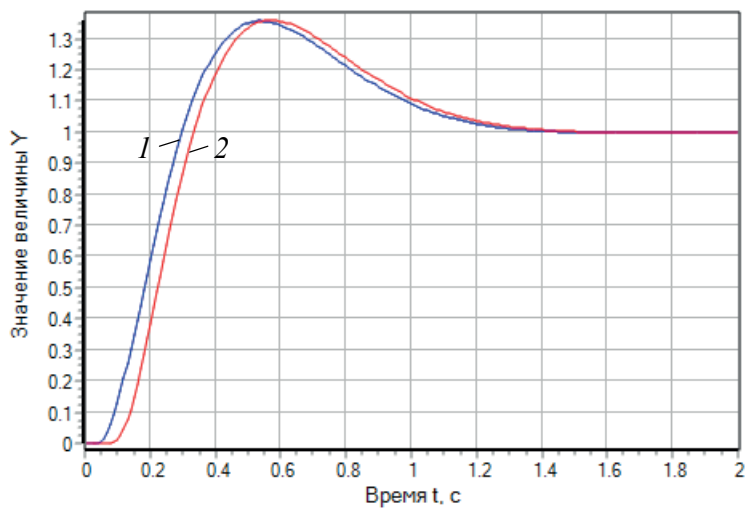


Рис. 1.46. Графики переходных процессов САР при  $T = 0,08$  с:  
1 – в непрерывной модели (рис. 1.43);  
2 – в непрерывно-дискретной модели (рис. 1.44)

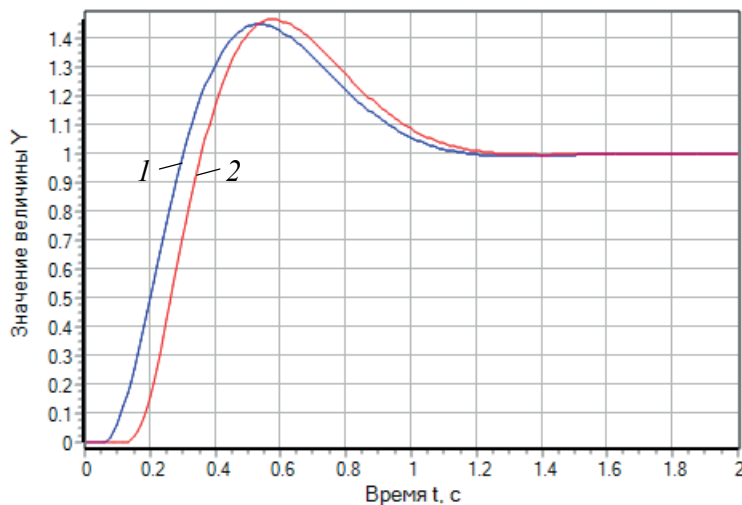


Рис. 1.47. Графики переходных процессов САР при  $T = 0,12$  с:  
 1 – в непрерывной модели (рис. 1.43);  
 2 – в непрерывно-дискретной модели (рис. 1.44)

- передаточная функция  $W_{AB}(s)$  преобразуется в дискретную передаточную функцию  $W_{AB}(z)$ , с учетом которой формируется непрерывно-дискретная модель системы;
- проверяется адекватность модели; если непрерывная модель соответствует непрерывно-дискретной модели, то задача синтеза системы считается завершенной и при разработке управляющей программы используется передаточная функция  $W_{AB}(z)$ ;
- если непрерывная модель не соответствует непрерывно-дискретной модели, то на основе последней уточняются параметры  $W_{AB}(z)$ , при которых обеспечиваются заданные показатели процесса управления. Уточненные параметры закладываются в управляющую программу.

Следует отметить, что с помощью компьютерного моделирования можно анализировать и синтезировать САР с микроЭВМ на основе чисто дискретных моделей (см. приложение Д, рис. Д.14). Такой подход целесообразен в тех случаях, когда в распоряжении исследователя имеются готовые дискретные модели САР.

### Пояснения

1. Цифровые САР при определенных значениях периода квантования  $T$  обладают худшими показателями качества регулирования, чем непрерывные системы, что объясняется потерей информации при квантовании по времени. Период квантования при проектировании новых и настройке действующих САР с микроЭВМ выбирают с учетом требований теоремы В. А. Котельникова. Если требование данной теоремы выполнено, то система с микроЭВМ будет эквивалентна непрерывной и процессом дискретизации сигнала по времени можно пренебречь. Если

период квантования превышает требования, предъявляемые теоремой В. А. Котельникова, то САР с микроЭВМ должна рассматриваться с его учетом [6–11].

2. Рассмотренные выше структурные модели применимы при компьютерном моделировании САР с микроЭВМ при условии, когда в цифровой части системы применены АЦП и ЦАП с одинаковым числом двоичных разрядов и система оказывается не критичной к статическим свойствам преобразователей. Если разрядность АЦП и ЦАП разная, то следует использовать структурные модели, учитывающие статические свойства преобразователей (рис. 1.48, 1.49).

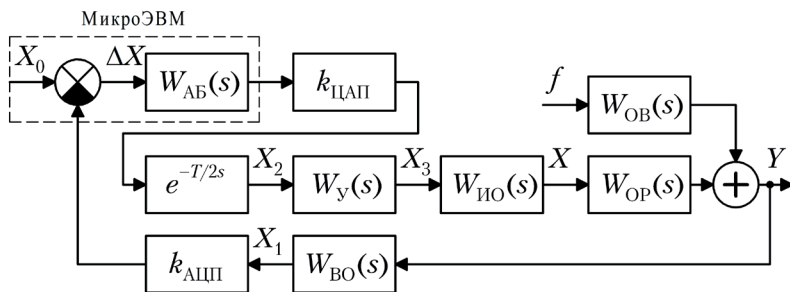


Рис. 1.48. Структурная схема непрерывной модели цифровой САР с учетом статических свойств АЦП и ЦАП

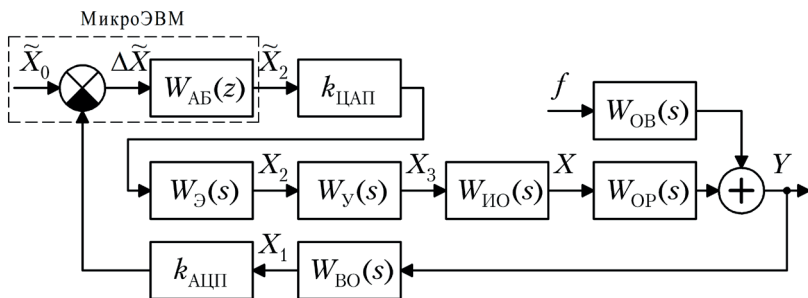


Рис. 1.49. Структурная схема непрерывно-дискретной модели цифровой САР с учетом статических свойств АЦП и ЦАП

## Контрольные вопросы и задания

1. Что такое математическая модель технической системы?
2. Каков принцип работы САР?
3. Какие существуют методы определения математических моделей элементов и объектов регулирования автоматических систем?
4. Какова сущность аналитического метода отыскания математических моделей элементов и объектов регулирования автоматических систем?
5. Что такое передаточные функции элементов и объектов регулирования автоматических систем?

6. Что такое структурная схема САР? Как составляют структурные схемы САР?
7. Что представляют собой линейные и нелинейные САР? Какова сущность линеаризации нелинейных элементов САР?
8. Какова сущность математических моделей САР в пространстве состояний?
9. Что такое детерминированные и случайные внешние воздействия на САР?
10. Что такое ступенчатое воздействие?
11. Что такое линейное воздействие?
12. Что такое случайная функция и случайный процесс?
13. Что такое реализация случайной функции?
14. Что такое стационарная случайная функция?
15. Что такое эргодическая случайная функция?
16. Как определяют математическое ожидание и дисперсию стационарного случайного процесса по одной реализации?
17. Каковы сущность и цели компьютерного моделирования САР?
18. Как оценивают устойчивость САР в результате их компьютерного моделирования?
19. Как оценивают качество САР по результатам их компьютерного моделирования?
20. Какие показатели качества САР определяют по переходным характеристикам?
21. С какой целью проводят коррекцию САР? Что такое последовательная и параллельная коррекция САР?
22. Каковы сущность и область использования типовых законов регулирования (*П-, ПД-, ПИ-, ПИД-законов регулирования*)?
23. Что такое жесткие и гибкие обратные связи?
24. Какую систему называют оптимальной? Что такое критерий оптимальности?
25. Как оценить качество САР на основе интегральных оценок качества?
26. Какова сущность параметрической оптимизации САР?
27. Что такое малые параметры? Как с их учетом можно упрощать математические модели САР?
28. Какова сущность эмпирического метода синтеза типовых законов регулирования Циглера-Никольса?
29. Что такое релейный элемент? Приведите примеры релейных элементов и устройств, имеющих релейные статические характеристики.
30. Какие процессы регулирования могут быть в релейных САР?
31. Каковы цели моделирования релейных САР?
32. Какие функции в САР с микроЭВМ выполняют АЦП и ЦАП?
33. Какие функции выполняет микроЭВМ в цифровой САР?
34. Кто такой В. А. Котельников и какова сущность теоремы В. А. Котельникова?
35. Какова сущность структурно-параметрического синтеза САР с микроЭВМ на основе ее непрерывной модели?
36. Что такое преобразование Эйлера и Тустена?

# Основные сведения о программном обеспечении SimInTech и рекомендации по его использованию



ГЛАВА  
2

## 2.1. Принципы и методика моделирования САР

В SimInTech (**Simulation In Technic**) использован метод структурного моделирования, базирующийся на математических моделях САР в виде их структурных схем (см. п. 1.1).

В среде SimInTech принята графическая форма ввода исходных данных в компьютер в виде структурной схемы моделирования САР, которую составляют с использованием соответствующих блоков, имеющихся в библиотеках SimInTech (приложение Ж). По внешнему виду структурная схема моделирования полностью повторяет исходную структурную схему САР с добавлением специальных блоков для формирования внешних воздействий на систему (задающего и возмущающих воздействий) и регистрации переходных процессов. Возможность графического ввода исходных данных обеспечивается наличием в среде SimInTech графического и текстового редакторов, а также библиотеки графических представлений функциональных блоков и диалоговых средств интерфейса пользователя.

Графически представленная математическая модель САР в виде ее структурной схемы, введенная в компьютер посредством программных средств среды SimInTech, автоматически преобразуется в систему уравнений в форме Коши и решается численными методами интегрирования. Исходные данные для ввода в компьютер готовят в такой последовательности.

**Этап 1.** С использованием блоков из *общетехнической* библиотеки среды SimInTech (см. приложение Ж), соответствующих звеньям исходной структурной схемы, составляют структурную схему моделирования САР. Кроме этого, на структурной схеме моделирования САР изображают блоки, формирующие ее задающее и возмущающие воздействия (из библиотеки «Источники»), а также блок для фиксации графика переходного процесса на выходе системы (из библиотеки «Данные»).

**Этап 2.** На основе анализа значений параметров передаточных функций САР выбирают метод и задают основные параметры интегрирования (время, шаг и точность интегрирования), а также шаг вывода результатов моделирования.

ПО SimInTech реализует несколько методов интегрирования (см. приложение А справочной системы SimInTech). При моделировании САР рекомендуется использовать один из методов Рунге-Кутты (RK45 классический, модифицированный) или один из адаптивных методов.

Остальные параметры интегрирования следует задавать, руководствуясь следующими общими рекомендациями (они применимы для любых значений постоянных времени объектов регулирования).

**Время интегрирования** (конечное время расчета) ориентировочно задают на один-два порядка больше, чем наибольшая постоянная времени исходной САР. В процессе моделирования время интегрирования уточняют. Оно должно быть не меньше времени регулирования (рис. 2.1). Для переходного процесса, изображенного на рис. 2.1а, время интегрирования принято недостаточным (переходный процесс за время интегрирования  $t_{\text{И}}$  еще не затух). На рис. 2.1б изображен переходный процесс с принятым достаточным временем интегрирования (переходный процесс практически затух, и время интегрирования  $t_{\text{И}}$  приблизительно равно времени регулирования  $t_{\text{Р}}$ ).

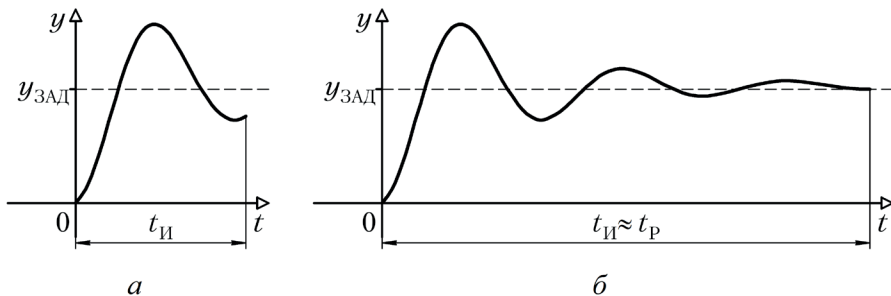


Рис. 2.1. К выбору времени интегрирования

**Шаг интегрирования** задают двумя значениями: максимальным и минимальным. При этом максимальное значение шага интегрирования принимают в 5–10 раз меньше наименьшей постоянной времени исходной САР. Минимальное значение шага интегрирования принимают в 10–100 раз меньше максимального значения шага интегрирования. Если в процессе моделирования не обеспечивается заданная точность интегрирования, то минимальный шаг интегрирования уменьшают до значений, при которых будет достигнута заданная точность.

**Точность интегрирования** определяется двумя величинами: относительной и абсолютной ошибками интегрирования. Их значения задают, исходя из условий сходимости численного решения задачи десятичным числом: например,  $1e - 4 = 0,0001$  (0,01%). Не следует задавать относительную ошибку больше 0,01 или меньше  $1e - 10$ . В большинстве случаев значения относительной и абсолютной ошибок можно принимать равными по умолчанию  $1e - 4$  и  $1e - 6$  соответственно.

**Шаг вывода результатов** (шаг синхронизации задачи) ориентировочно принимают равным или больше максимального значения шага интегрирования. В процессе моделирования его можно изменять и уточнять, исходя из требований к качеству изображения графика переходного процесса.

При задании числовых значений параметров интегрирования удобно пользоваться экспоненциальной формой записи числа.

Подготовленные исходные данные с помощью соответствующих процедур (они рассмотрены в п. 2.6) вводят в компьютер и выполняют моделирование САР. В результате моделирования получают график переходного процесса, на основе анализа которого достигают требуемых целей (см. п. 1.3).

В качестве примера рассмотрим подготовку исходных данных для моделирования переходных процессов САР напряжения синхронного генератора, принципиальная схема которой изображена на рис. 2.2, где:  $M1$  – приводной двигатель;  $G1$  – синхронный генератор;  $G2$  – генератор возбуждения;  $A2$  – электромашинный усилитель;  $A1$  – электронный усилитель;  $Z$  – электрическое сопротивление нагрузки;  $TV1$ ,  $VD1$ – $VD6$  и  $R1$  – элементы обратной связи (соответственно понижающий измерительный трансформатор напряжения, трехфазный выпрямитель и нагрузочное сопротивление);  $R0$  – задающий резистор.

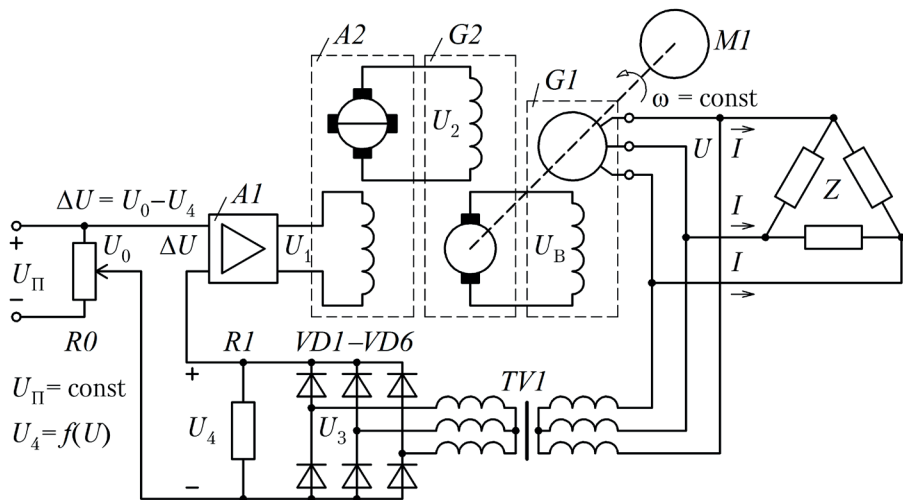


Рис. 2.2. Упрощенная принципиальная схема САР напряжения синхронного генератора

Принцип работы САР напряжения синхронного генератора (рис. 2.2) следующий. Напряжение генератора  $U$  измеряется трансформатором  $TV1$  и выпрямителем  $VD1$ – $VD6$  преобразуется в напряжение  $U_4$ . Напряжение  $U_4$  подается на вход системы встречно задающему напряжению  $U_0$ . В результате получается разность напряжений  $\Delta U = U_0 - U_4$ . При уменьшении напряжения  $U_4$  разность  $\Delta U$



возрастает, что приводит к увеличению напряжения возбуждения  $U_B$  генератора и к восстановлению его напряжения  $U$  до заданного значения. При увеличении напряжения  $U_4$  разность  $\Delta U$  уменьшается, что вызывает снижение напряжения возбуждения генератора  $U_B$ , а следовательно, и его напряжения  $U$  до требуемого значения. Таким образом, само отклонение регулируемой величины (напряжения генератора) от заданного значения вызывает изменение регулирующего воздействия так, чтобы уменьшить это отклонение и вернуть регулируемую величину к заданному значению.

В соответствии с принципиальной схемой САР, представленной на рис. 2.2, функциональную схему системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора можно представить в виде, изображенном на рис. 2.3, где: ОР – объект регулирования; ИО – исполнительный орган; УО1, УО2 – усиленные органы 1 и 2; ВО – воспринимающий орган; ПО – преобразующий орган; ЗО – задающий орган; СО – сравнивающий орган.

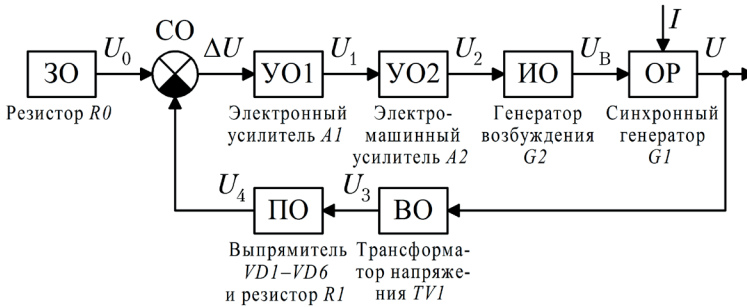


Рис. 2.3. Функциональная схема САР напряжения синхронного генератора

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующими передаточными функциями:

- объект регулирования (синхронный генератор  $G1$ ) по задающему и возмущающему воздействиям:

$$W_p(s) = \frac{k_{OP}}{T_O s + 1} \text{ и } W_B(s) = -k_{OB}, \quad (2.1)$$

где  $k_{OP} = 30$ ,  $k_{OB} = 1,64 \text{ В/А}$  – передаточные коэффициенты;  
 $T_O = 1,2 \text{ с}$  – постоянная времени;

- воспринимающий орган (трансформатор напряжения  $TV1$ ):

$$W_{BO}(s) = k_{BO}, \quad (2.2)$$

где  $k_{BO} = 0,001$  – передаточный коэффициент (коэффициент трансформации);

- преобразующий орган (трехфазный выпрямитель  $VD1–VD6$  с нагрузкой  $R1$ ):

$$W_{\Pi O}(s) = k_{\Pi O}, \quad (2.3)$$

где  $k_{\Pi O}$  – передаточный коэффициент (для схемы Ларионова  $k_{\Pi O} = 2,34$ );

- усилительный орган УО1 (электронный усилитель А1):

$$W_{Y1}(s) = k_1, \quad (2.4)$$

где  $k_1 = 1-35$  – коэффициент усиления по напряжению (варьируемая величина);

- усилительный орган УО2 (электромашинный усилитель А2):

$$W_{Y2}(s) = \frac{k_2}{T_2^2 s^2 + 2bT_2 s + 1}, \quad (2.5)$$

где  $k_2 = 2$  – коэффициент усиления по напряжению;

$T_2 = 0,15$  с – постоянная времени;

$b = 1,17$  – коэффициент демпфирования;

- исполнительный орган (генератор возбуждения G2):

$$W_{\Pi O}(s) = \frac{k_{\Pi O}}{T_{\Pi O} s + 1}, \quad (2.6)$$

где  $k_{\Pi O} = 2$  – передаточный коэффициент;

$T_{\Pi O} = 0,5$  с – постоянная времени.

На основе функциональной схемы САР (рис. 2.3) и передаточных функций (2.1)–(2.6) структурная схема системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора имеет вид, представленный на рис. 2.4.

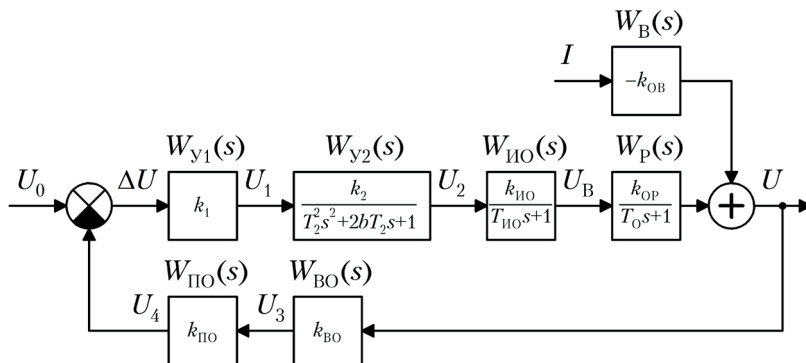


Рис. 2.4. Структурная схема САР напряжения синхронного генератора

Номинальные значения напряжения и тока синхронного генератора  $U_H = 6300$  В и  $I_H = 688$  А.

Входные воздействия САР:

- задающее воздействие  $U_0$  первоначально рассчитывается через коэффициент статизма (2.7), затем в процессе моделирования его значение уточняется

(путем подбора) таким, чтобы напряжение на выходе синхронного генератора было равно номинальному значению при номинальном токе нагрузки:

$$U_0 = U_{\text{ЗАД}}/k_{\text{СТ}}, \quad (2.7)$$

где  $U_{\text{ЗАД}} = U_{\text{Н}}$  – заданное напряжение на выходе синхронного генератора;

- максимальное возмущающее воздействие – скачкообразное изменение тока нагрузки  $I$  от  $I_{\text{ХХ}} = 0$  до  $I_{\text{Н}} = 688$  А ( $I_{\text{ХХ}}$  – ток холостого хода генератора).

Порядок составления структурной схемы моделирования САР (рис. 2.5) следующий:

- каждое звено исходной структурной схемы (рис. 2.4) заменяем соответствующим блоком из *общетехнической* библиотеки среды SimInTech;
- для формирования задающего воздействия  $U_0$  используем блок *Константа*, а возмущающего воздействия (изменения тока нагрузки  $I$ ) – блок *Ступенька* из библиотеки «Источники».

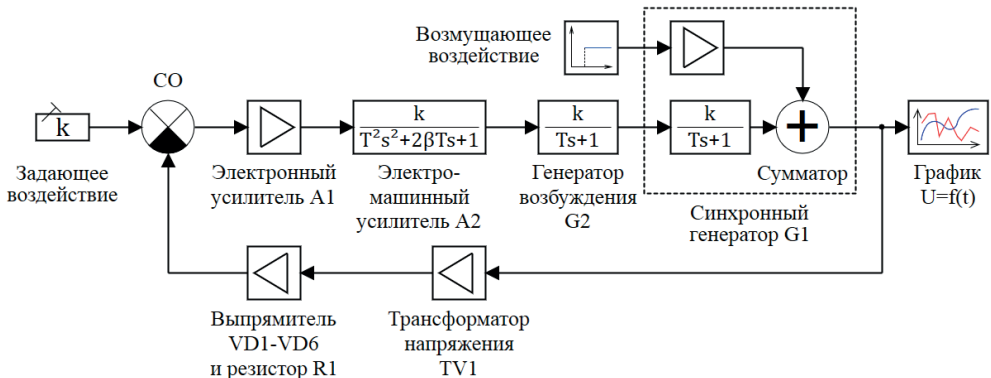


Рис. 2.5. Структурная схема моделирования САР напряжения синхронного генератора в среде SimInTech

Выбираем метод и задаем параметры интегрирования:

- метод интегрирования «Адаптивный 1»;
- исходя из наименьшей постоянной времени  $T_2 = 0,15$  с, принимаем первоначальные значения шага интегрирования: максимального  $0,015$  с и минимального  $1,5e - 4$  с;
- исходя из наибольшей постоянной времени  $T_O = 1,2$  с, принимаем первоначальное значение времени интегрирования  $24$  с;
- шаг вывода результатов  $0,015$  с;
- относительная ошибка  $1e - 3$ ;
- абсолютная ошибка  $1e - 1$ .

## 2.2. Запуск программного обеспечения SimInTech

Программное обеспечение SimInTech в операционной системе Windows может быть запущено посредством: кнопки **Пуск** и меню **Программы** или **Выполнить...**; посредством специально созданной при установке ПО SimInTech пиктограммы на рабочем столе (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Ярлык для запуска ПО SimInTech

Операция запуска ПО SimInTech осуществляется посредством установки курсора на пиктограмму и последовательного двукратного нажатия *левой* клавиши мыши. Через 1...2 секунды после запуска на экране монитора появится заставка с указанием версии SimInTech (рис. 2.7). После этого на экране монитора появится *главное окно* SimInTech (см. рис. 2.8), в верхней части которого представлено *главное командное меню* (1), в центральной части – *панель инструментов* (командных кнопок) (2), а ниже – *палитра компонентов* (3) с соответствующими пиктограммами и закладками названий отдельных библиотек, сформированных по функциональному принципу.

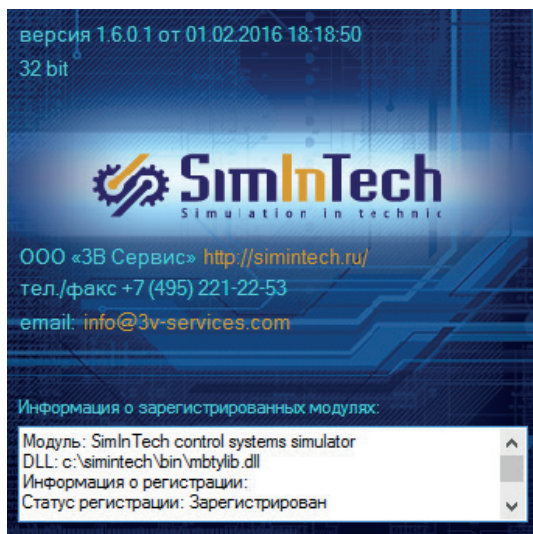


Рис. 2.7. Заставка SimInTech

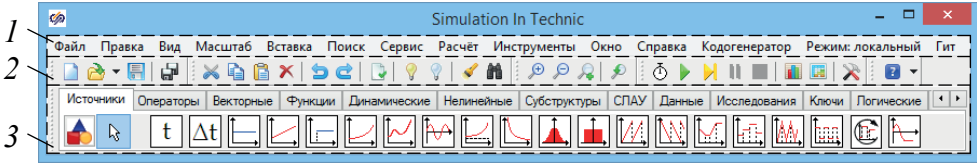


Рис. 2.8. Главное окно SimInTech

Назначение *командного меню* и *панели инструментов* (командных кнопок) одинаковое, однако для начинающего пользователя ПО SimInTech удобнее большинство операций выполнять с помощью *панели инструментов*. Это обусловлено ее следующими дидактическими возможностями:

- на каждой кнопке показано графическое изображение, отображающее ее функциональное назначение;
- при установке курсора на кнопку высвечивается подпись ее функционального назначения.

Следует подчеркнуть, что при решении задач, предусмотренных настоящим пособием, пользователю понадобится только определенная часть команд и опций. Полную информацию о функциональных возможностях *командного меню* и *панели инструментов* можно найти в справочной системе SimInTech.

## 2.3. Командное меню главного окна

Команды *главного командного меню* программы SimInTech распределены по пунктам: **Файл**, **Правка**, **Вид**, **Масштаб**, **Вставка**, **Поиск**, **Сервис**, **Расчёт**, **Инструменты**, **Окно**, **Справка**, **Кодогенератор**, **Режим**. Пункты главного меню частично продублированы в *панелях инструментов* (см. п. 2.2, рис. 2.8 и п. 2.4, табл. 2.2).

Меню **Инструменты** является настраиваемым, оно позволяет вызывать дополнительные внешние программы. Меню **Окно** позволяет вызывать или скрывать существующие в программе *схемные окна* и осуществлять переход от одного *схемного окна* к другому.

Пункты меню **Кодогенератор** и **Режим** являются дополнительными и зависят от наличия модуля генератора кода в поставке ПО SimInTech.

Частичное описание пунктов и команд *главного командного меню* в пользовательском режиме отображения интерфейса среды SimInTech представлено в табл. 2.1.

Учитывая, что все интерфейсные команды нецелесообразно вносить в *командное меню главного окна*, часть команд реализована посредством:

- *командного меню схемного окна*, расположенного в верхней части основного или *субмодельного схемного окна* (см. рис. 2.9), с пунктами **Вид**, **Масштаб** и отображающего режим функционирования схемы (редактирование/индикация);
- *дополнительной панели инструментов* (см. п. 2.4, табл. 2.3), расположенной под *командным меню* основного или *субмодельного схемного окна*

(см. рис. 2.9) и обеспечивающей выполнение большинства команд и процедур редактирования структурной схемы проекта;

- *дополнительного командного меню* (см. рис. 2.9), вызов которого осуществляется нажатием *правой* клавиши мыши при расположении ее курсора в свободном месте *схемного окна* (основного или субмодельного).

**Таблица 2.1. Пункты и команды *главного командного меню***

| <b>Пункт: команда, сочетание клавиш</b>                                                                                          | <b>Описание</b>                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Файл → Новый проект</b>                                                                                                       | Создание нового <i>схемного окна</i> (проекта) или нового пакета проектов                       |
| <b>Файл → Новый проект → Схема ТТР</b>                                                                                           | Создание нового проекта в соответствии с шаблоном для схемы ТТР                                 |
| <b>Файл → Новый проект → Схема автоматики</b>                                                                                    | Создание нового проекта автоматики                                                              |
| <b>Файл → Новый проект → Схема теплогидравлики</b>                                                                               | Создание нового проекта в соответствии с шаблоном для схемы теплогидравлики                     |
| <b>Открыть..., Ctrl+F3</b>                                                                                                       | Загрузка нового проекта из файла                                                                |
| <b>Файл → История</b>                                                                                                            | Вывод списка последних открываемых проектов                                                     |
| <b>Файл → Сохранить проект</b>                                                                                                   | Сохранение текущего проекта в файл                                                              |
| <b>Файл → Сохранить проект как..., Ctrl+F2</b>                                                                                   | Сохранение текущего проекта в файл с новым именем                                               |
| <b>Файл → Заккрыть</b>                                                                                                           | Заккрыть активный проект                                                                        |
| <b>Файл → Сохранить все проекты</b>                                                                                              | Сохранить все открытые окна проектов в соответствующие файлы                                    |
| <b>Файл → Заккрыть все</b>                                                                                                       | Заккрыть все открытые проекты                                                                   |
| <b>Файл → Параметры...</b>                                                                                                       | Настройка основных параметров программы (вид, рабочие папки и файлы, другое)                    |
| <b>Файл → Выход из программы</b>                                                                                                 | Выход из среды SimInTech                                                                        |
| <b>Правка → Вырезать, Ctrl+X</b>                                                                                                 | Удаление выделенных объектов в буфер обмена                                                     |
| <b>Правка → Копировать, Ctrl+C</b>                                                                                               | Копирование образов выделенных объектов в буфер обмена                                          |
| <b>Правка → Вставка, Ctrl+V</b>                                                                                                  | Вставка объектов из буфера обмена в <i>схемное окно</i>                                         |
| <b>Правка → Удалить, BkSpс</b>                                                                                                   | Удаление выделенных объектов                                                                    |
| <b>Правка → Отмена, Ctrl+Z</b>                                                                                                   | Отмена выполненного действия                                                                    |
| <b>Правка → Возврат отмены, Ctrl+Shift+Z</b>                                                                                     | Выполнение отмененного действия                                                                 |
| <b>Правка: Включить объекты</b>                                                                                                  | Включение выделенных на схеме объектов в расчетную схему                                        |
| <b>Правка: Исключить объекты</b>                                                                                                 | Исключение выделенных на схеме объектов из расчетной схемы                                      |
| <b>Правка → Снять выделение; Выделить все, Ctrl+A; Выделить по имени...; Выделить по типу...</b>                                 | Команды выделения объектов в <i>схемном окне</i>                                                |
| <b>Правка → Повернуть; Переместить; Масштабировать; Масштабировать с коэффициентом...; Растянуть-сжать; Зеркальное отражение</b> | Команды изменения отображения, расположения, размеров выделенных объектов в <i>схемном окне</i> |

Таблица 2.1 (продолжение)

| Пункт: команда, сочетание клавиш                  | Описание                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Правка → Выровнять по сетке                       | Выравнивание выделенных объектов по узлам сетки                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Правка → Выдвинуть вперед / Поместить назад       | Перемещение выделенного объекта в конец/начало списка объектов (объект будет перерисован поверх/позади всех остальных)                                                                                                                                                                                              |
| Правка → Порядок перерисовки...                   | Изменения последовательности прорисовки объектов <i>схемного окна</i>                                                                                                                                                                                                                                               |
| Правка → Свойства...                              | Изменение свойств выделенного объекта или общих свойств (по типу и названию) нескольких выделенных объектов                                                                                                                                                                                                         |
| Вид → Режим разработчика                          | Включение этого режима разблокирует «продвинутые» возможности ПО SimInTech, в том числе и редактирование блоков                                                                                                                                                                                                     |
| Вид → Не перемещать объекты                       | Включение/отключение возможности перемещения объектов в <i>схемном окне</i>                                                                                                                                                                                                                                         |
| Вид → Редактировать подписи блоков                | Включение/отключение возможности редактирования подписи блока непосредственно в <i>схемном окне</i>                                                                                                                                                                                                                 |
| Вид → Не изменять размеры блоков                  | Включение/отключение возможности изменения размеров объектов в <i>схемном окне</i>                                                                                                                                                                                                                                  |
| Вид → Трассировка линий связи                     | Включает/отключает алгоритм автоматического определения координат промежуточных точек для линий связи                                                                                                                                                                                                               |
| Вид → Цвет линий...                               | Установка цвета линий по умолчанию                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Вид → Цвет заливки...                             | Установка цвета заливки по умолчанию                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Вид → Шрифт текста...                             | Установка шрифта текста по умолчанию                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Вид → Панели инструментов                         | В данном пункте меню расположены команды управления видимостью отдельных частей <i>панели инструментов</i>                                                                                                                                                                                                          |
| Вид → Вид по умолчанию                            | Восстановление вида <i>главного окна</i> по умолчанию                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Масштаб → Увеличить в 2 раза / Уменьшить в 2 раза | Увеличение/уменьшение масштаба изображения в 2 раза                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Масштаб → Показать все                            | Вписывание структурной схемы в размеры <i>схемного окна</i>                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Масштаб → Стандартный масштаб (1:1)               | Установка стандартного масштаба изображения 1:1                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Вставка → Повтор вставки блока, F6                | Вставка на схему последнего ранее вставленного объекта                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Вставка → Режим замены блоков                     | При включенном режиме новый вставляемый на схему блок будет заменять предварительно выделенный на схеме блок. Все линии связи при этом останутся на схеме без изменений (при условии совпадения количества портов входа-выхода у блоков). После осуществления замены режим замены блоков сбрасывается автоматически |
| Вставка → Синхронизировать свойства при замене    | Сохранение значений однотипных свойств заменяемых объектов                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Поиск → Поиск блока..., Ctrl+F                    | Поиск произвольного графического объекта на схеме в соответствии с заданными критериями                                                                                                                                                                                                                             |
| Поиск → Поиск в память – из памяти..., Ctrl+Alt+F | Поиск блоков типа «В память» и «Из памяти» по имени переменной                                                                                                                                                                                                                                                      |

Таблица 2.1 (окончание)

| Пункт: команда, сочетание клавиш            | Описание                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Поиск → Поиск в базе данных                 | Поиск объекта в базе данных                                                                                                                |
| Сервис → Сигналы...                         | Вызов редактора сигналов проекта                                                                                                           |
| Сервис → Скрипт...                          | Вызов редактора глобальных параметров страницы, схемы (в нем можно записывать и графические операции)                                      |
| Сервис → Скриншот в буфер                   | Копирование в буфер обмена видимой на экране части <i>схемного окна</i>                                                                    |
| Расчёт → Инициализация                      | Инициализация расчета текущего проекта                                                                                                     |
| Расчёт → Пуск, F9                           | Запуск расчета текущего проекта                                                                                                            |
| Расчёт → Сделать шаг                        | Выполнение расчета на один шаг интегрирования                                                                                              |
| Расчёт → Пауза                              | Приостановка расчета текущего проекта                                                                                                      |
| Расчёт → Стоп, Shift+F9                     | Полная остановка расчета текущего проекта                                                                                                  |
| Расчёт → Параметры расчёта                  | Вызов окна для установки параметров проекта                                                                                                |
| Инструменты → Подпись объектов...           | Создание подписи для объекта <i>схемного окна</i>                                                                                          |
| Инструменты → Информация о файле проекта... | Вывод окна с информацией о файле проекта                                                                                                   |
| Инструменты → Графический редактор...       | Вызов окна графического редактора                                                                                                          |
| Инструменты → Калькулятор                   | Вызов калькулятора SimInTech                                                                                                               |
| Окно → Показать все                         | Отображение всех <i>схемных окон</i>                                                                                                       |
| Окно → Скрыть все                           | Минимизирование всех <i>схемных окон</i>                                                                                                   |
| Справка → Содержание, F1                    | Вызов главного файла справки программы                                                                                                     |
| Справка → Контекстная справка, Ctrl+F1      | Вызов контекстной справки для выделенного блока на схеме                                                                                   |
| Справка → Поиск обновлений                  | Поиск, загрузка и установка обновления из Интернета. Для поиска обновлений вызывается программа update.exe                                 |
| Справка → Написать в службу поддержки...    | Вызов диалогового окна отправки сообщения разработчикам SimInTech, с автоматической вставкой в тело письма отладочной информации о системе |
| Справка → О программе...                    | Вывод заставки программы                                                                                                                   |
| Справка → Портал SimInTech                  | Открытие страницы в Интернете <a href="http://3v-services.com">http://3v-services.com</a>                                                  |

На рис. 2.9 на фоне *схемного окна* представлено *дополнительное командное меню*, содержащее 10 интерфейсных опций, дублирующих часть команд *главного командного меню* и предоставляющих доступ к дополнительным процедурам графического редактора среды SimInTech. Подробное описание опций графического интерфейса *схемного окна* приведено в справочной системе SimInTech.

## 2.4. Панели инструментов главного окна и схемных окон

*Панель инструментов главного окна* (см. рис. 2.8) имеет командные кнопки, описание которых представлено в табл. 2.2.



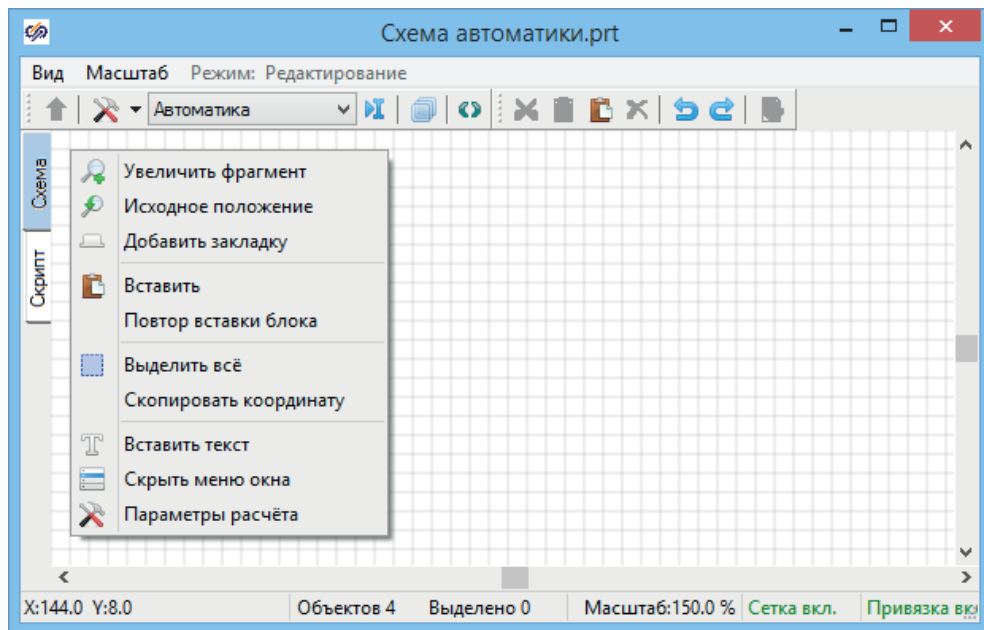


Рис. 2.9. Схемное окно с дополнительным командным меню

Таблица 2.2. Командные кнопки панели инструментов главного окна

| Кнопка                                                                                                       | Панель инструментов | Описание                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Новый проект           | Файл                | Создание нового <i>схемного окна</i> (проекта)                                                                                                                                                                             |
| <br>Открыть... (Ctrl+F3)  | Файл                | При нажатии на пиктограмму с изображением папки открывается диалоговое окно для загрузки нового проекта из файла. По нажатии на изображение стрелки справа от папки происходит вывод списка последних открываемых проектов |
| <br>Сохранить проект      | Файл                | Сохранение текущего проекта в файл                                                                                                                                                                                         |
| <br>Сохранить все проекты | Файл                | Сохранить все открытые окна проектов в соответствующие файлы                                                                                                                                                               |
| <br>Вырезать              | Редактирование      | Удаление выделенных объектов в буфер обмена                                                                                                                                                                                |
| <br>Копировать            | Редактирование      | Копирование образов выделенных объектов в буфер обмена                                                                                                                                                                     |

Таблица 2.2 (продолжение)

| Кнопка                                                                                                                       | Панель инструментов | Описание                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Вставка                                 | Редактирование      | Вставка объектов из буфера обмена в <i>схемное окно</i>                                                                              |
| <br>Удалить                                 | Редактирование      | Удаление выделенных объектов                                                                                                         |
| <br>Отмена действий                         | Редактирование      | Отмена выполненного действия                                                                                                         |
| <br>Возврат отмены                          | Редактирование      | Выполнение отмененного действия                                                                                                      |
| <br>Свойства                                | Редактирование      | Изменение свойств выделенного объекта или общих свойств (по типу и названию) нескольких выделенных объектов                          |
| <br>Включить объекты                        | Редактирование      | Включение выделенных на схеме объектов в расчетную схему                                                                             |
| <br>Исключить объекты                       | Редактирование      | Исключение выделенных на схеме объектов из расчетной схемы                                                                           |
| <br>Поиск в память – из памяти (Ctrl+Alt+F) | Редактирование      | Поиск блоков типа «В память» и «Из памяти» по имени переменной                                                                       |
| <br>Поиск блока (Ctrl+F)                    | Редактирование      | Поиск произвольного графического объекта на схеме в соответствии с заданными критериями                                              |
| <br>Увеличить в 2 раза                     | Масштаб             | Увеличение масштаба изображения в 2 раза                                                                                             |
| <br>Уменьшить в 2 раза                    | Масштаб             | Уменьшение масштаба изображения в 2 раза                                                                                             |
| <br>Увеличить фрагмент                    | Масштаб             | Увеличение выделенного фрагмента изображения во все окно (для увеличения сначала нажать кнопку, затем выделить фрагмент изображения) |
| <br>Исходное положение                    | Масштаб             | Установка координат изображения по исходному положению (положение окна на момент загрузки проекта)                                   |
| <br>Инициализация                         | Расчёт              | Инициализация расчета текущего проекта                                                                                               |
| <br>Пуск (F9)                             | Расчёт              | Запуск расчета текущего проекта                                                                                                      |

**Таблица 2.2** (окончание)

| Кнопка                                                                                                    | Панель инструментов | Описание                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Сделать шаг          | Расчёт              | Выполнение расчета на один шаг интегрирования                                                                                                                                                          |
| <br>Пауза                | Расчёт              | Приостановка расчета текущего проекта                                                                                                                                                                  |
| <br>Стоп (Shift+F9)      | Расчёт              | Полная остановка расчета текущего проекта                                                                                                                                                              |
| <br>Менеджер данных      | Расчёт              | Вызов менеджера данных текущего проекта                                                                                                                                                                |
| <br>Инспектор параметров | Расчёт              | Вызов окна выбора параметров объекта                                                                                                                                                                   |
| <br>Параметры расчёта    | Расчёт              | Вызов окна для установки параметров проекта                                                                                                                                                            |
| <br>Содержание (F1)      | Справка             | Нажатие на пиктограмму с изображением знака вопроса приводит к открытию главного файла справки программы. По нажатии на изображение стрелки справа происходит вывод команды открытия портала SimInTech |

Описание командных кнопок и опций *панели инструментов схемного окна* (см. рис. 2.9) приведено в табл. 2.3.

**Таблица 2.3.** Командные кнопки и опции *панели инструментов схемного окна*

| Вид кнопки<br>Подсказка                                                                                             | Панель инструментов | Описание                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Возврат из субмодели         | Слои                | Осуществляет возврат из субмодели, т. е. переход с уровня открытой субмодели проекта на уровень выше, вплоть до основного <i>схемного окна</i> проекта                                                                 |
| <br>Параметры расчёта            | Слои                | Нажатие на пиктограмму с изображением инструментов (отвертки и молотка) вызывает окно для установки параметров проекта. По нажатии на изображение стрелки справа происходит вывод списка команд для работы с решателем |
| <br>Выбор решателя               | Слои                | Отображение выбранного решателя                                                                                                                                                                                        |
| <br>Индикация/<br>Редактирование | Слои                | Переключение между режимами функционирования<br><b>Индикация/Редактирование</b>                                                                                                                                        |

Таблица 2.3 (окончание)

| Вид кнопки<br>Подсказка                                                                                                | Панель<br>инструментов | Описание                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Визуальные слои                   | Слои                   | Настройка визуальных слоев проекта                                                                          |
| <br>Показать значения на линиях связи | Слои                   | Включает отображение числовых значений на линиях связи                                                      |
| <br>Скрыть значения на линиях связи   | Слои                   | Отключает отображение числовых значений на линиях связи                                                     |
| <br>Вырезать                          | Правка                 | Удаление выделенных объектов в буфер обмена                                                                 |
| <br>Копировать                        | Правка                 | Копирование образов выделенных объектов в буфер обмена                                                      |
| <br>Вставка                           | Правка                 | Вставка объектов из буфера обмена в <i>схемное окно</i>                                                     |
| <br>Удалить                           | Правка                 | Удаление выделенных объектов                                                                                |
| <br>Отмена действий                   | Правка                 | Отмена выполненного действия                                                                                |
| <br>Возврат отмены                   | Правка                 | Выполнение отмененного действия                                                                             |
| <br>Свойства объекта                | Правка                 | Изменение свойств выделенного объекта или общих свойств (по типу и названию) нескольких выделенных объектов |

## 2.5. Палитра компонентов

В среде SimInTech библиотека типовых блоков состоит из *общетехнической* и ряда *специализированных* библиотек. Доступ к библиотекам осуществляется из *палитры компонентов* (см. рис. 2.8).

*Палитра компонентов* состоит из отдельных каталогов (библиотек), переключение которых осуществляется однократным щелчком *левой* клавиши мыши в поле «закладки» с соответствующим названием. Учитывая, что все «закладки» не умещаются по длине *палитры компонентов*, в ее правом верхнем углу предусмотрены специальные кнопки  , однократный щелчок *левой* клавишей мыши по которым смещает «закладки» влево-вправо на одну позицию.

Компоненты библиотеки, которые не вмещаются по длине *палитры компонентов*, могут быть «прокручены» влево-вправо щелчками *левой* клавиши мыши по специальным кнопкам  и  (в начале и конце *палитры компонентов*). Также возможен доступ к неотображаемым компонентам библиотеки через выпадающий список при нажатии кнопки , расположенной справа от последнего отображаемого компонента на палитре.

*Палитра компонентов* состоит из отдельных библиотек, сгруппированных по функциональному признаку.

*Общетеchnическая* библиотека блоков включает в себя 16 библиотек (групп блоков, объединенных по какому-либо общему признаку и размещенных на отдельных вкладках в *палитре компонентов главного окна*), содержит около 300 различных блоков и входит в стандартную поставку ПО SimInTech.

Состав *общетеchnической* библиотеки:

1. «Источники». К данной библиотеке отнесены типовые блоки, которые имитируют различные управляющие и возмущающие воздействия, действующие на систему. Для своей работы блоки этого типа не нуждаются во входных сигналах, поэтому не имеют портов входа.
2. «Операторы». Блоки библиотеки предназначены для реализации в процессе моделирования простейших математических операций с сигналами.
3. «Векторные». В библиотеку включены типовые блоки, обеспечивающие в процессе моделирования векторные преобразования потоков информации.
4. «Функции». Типовые блоки библиотеки реализуют функциональные преобразования входных сигналов.
5. «Динамические». В библиотеку включены типовые блоки, динамика которых описывается обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями, системами уравнений в переменных состояния и в форме Коши (линейными или нелинейными).
6. «Нелинейные». Библиотека содержит основные нелинейные звенья, несколько вариантов блоков сохранения минимума и максимума, звено переменного запаздывания, а также ряд других блоков, условно отнесенных к этой библиотеке.
7. «Субструктуры». Блоки библиотеки предназначены: во-первых, для создания и функционирования многоуровневых структурных схем; во-вторых, для организации передачи данных посредством механизма *глобальных* переменных; в-третьих, для формирования именованных областей памяти;
8. «Данные». В библиотеку включены блоки, предназначенные для реализации ряда операций с данными моделирования (расчета).
9. «Исследования». Блоки библиотеки применяются для проведения операций частотного анализа и оптимизации схем и алгоритмов.
10. «Ключи». Блоки библиотеки предназначены для реализации операций типа замкнут/разомкнут в линиях связи структурной схемы проекта (задачи).

11. «Логические». В библиотеку включены блоки, реализующие обработку потоков данных с использованием алгоритмов, основанных на математической логике. Ряд блоков отнесен к этой библиотеке условно.
12. «Триггеры». Блоки библиотеки реализуют различные триггеры.
13. «Задержки и импульсы». В библиотеку включены блоки, предназначенные для создания разнообразных задержек сигналов и импульсных сигналов.
14. «Релейные». Блоки библиотеки выполнены в виде субмоделей, при помощи блоков «В память» и «Из памяти» и триггеров. Алгоритм работы блоков можно просмотреть, заходя «внутрь» каждого блока (фактически внутрь субмодели). Блоки реализуют элементы реле: катушки и контакты.
15. «Дискретные». В библиотеку включены типовые блоки, динамика которых описывается дискретными передаточными функциями и линейными разностными (т. е. дискретными во времени) уравнениями состояния.
16. «Статистика». Библиотека предназначена для статистического анализа расчетных данных.

Подробное описание блоков *общетехнической* библиотеки и их математических моделей приведено в справочной системе SimInTech (подразделе 3.1 «Общетехническая библиотека блоков»).

В стандартную поставку SimInTech включены также некоторые *специализированные* библиотеки типовых блоков. В состав данных библиотек входят группы блоков, разработанных для какого-либо конкретного прикладного применения или проекта. В *палитре компонентов* каждая *специализированная* библиотека блоков размещена на отдельной вкладке.

## 2.6. Краткое описание процедур и этапов работы в среде SimInTech

В данном подразделе рассматриваются только основные процедуры работы, освоение которых является *обязательным условием* для самостоятельной работы в среде SimInTech.

Команды и опции выполняются посредством *командного меню главного окна* (см. п. 2.3, табл. 2.1) или *схемного окна* (см. п. 2.3, рис. 2.9), *командных кнопок панели инструментов главного окна* (см. рис. 2.8, табл. 2.2), а также с помощью *дополнительной панели инструментов схемного окна* (см. рис. 2.9, табл. 2.3), *дополнительного командного меню* (см. рис. 2.9) и контекстных меню.

Многие команды продублированы в *панелях инструментов* соответствующими командными кнопками. Формирование, редактирование структурной схемы САР, ввод параметров блоков, начальных условий, выбор метода и параметров интегрирования проводятся с использованием как специальных графических процедур, так и посредством пунктов меню и/или командных кнопок.

Структурную схему исследуемой САР рекомендуется предварительно изобразить на черновике примерно в том же виде, в каком вы желаете видеть ее на экране монитора.

Формирование структурной схемы и ее параметров, выбор метода, параметров интегрирования и т. п. целесообразно проводить в следующей последовательности:

- используя *палитру компонентов* (см. п. 2.5), заполните *схемное окно* необходимыми блоками примерно так же, как они должны быть расположены в структурной схеме;
- с помощью процедур «перетаскивания» блоков, изменения ориентации блоков и их размеров придайте структурной схеме «осмысленный» вид;
- используя манипулятор типа «мышь», соедините блоки линиями связи;
- двигаясь слева направо и сверху вниз (по блокам в *схемном окне*), задайте свойства блоков на структурной схеме (коэффициенты усиления, постоянные времени, начальные условия и т. д.);
- используя кнопку **Параметры расчёта**, задайте конечное время интегрирования, выберите необходимый метод интегрирования и другие параметры расчета;
- сохраните набранную структурную схему (проект) под оригинальным именем на жесткий диск (например, **Proba.prt** или с использованием русского шрифта **Проба.prt**);
- запустите задачу на счет, смотрите текущие данные в *графических окнах* и анализируйте полученные результаты.

*Рекомендуется выполнять процедуру сохранения на жесткий диск не в конце ввода всех условий задачи, а после каждого из вышеперечисленных этапов.*

Первый этап – ввод структурной схемы (заполнение *схемного окна* типовыми блоками) – можно начинать сразу после запуска SimInTech в *чистое схемное окно* (создав его *однократным* щелчком *левой* клавиши мыши по командной кнопке **Новый проект** и выбрав там пункт **Схема автоматики**).

## Контрольные вопросы и задания

1. В каком виде вводят исходные данные при моделировании САР в среде SimInTech?
2. Какова методика составления структурной схемы моделирования САР?
3. Как задают параметры интегрирования при моделировании САР с помощью среды SimInTech?
4. Как задают шаг вывода результатов при моделировании САР в среде SimInTech?
5. Как можно осуществить пуск ПО SimInTech?
6. Каково назначение *панелей инструментов*?
7. Для чего предназначена *палитра компонентов*?
8. Какова последовательность процедур и этапов при работе с SimInTech?

## Работа 1. Изучение ПО SimInTech на примерах моделирования отдельных элементов САР

### Цели работы:

- изучить возможности среды SimInTech;
- освоить процедуры формирования структурной схемы моделирования, выбора метода и параметров интегрирования, ввода свойств блоков, вывода данных расчета (на примере моделирования переходных процессов типовых звеньев и звена общего вида).

**Теоретический материал, необходимый для выполнения работы:** знать понятия структурных схем элементов и САР, типовых воздействий, переходных характеристик, типовых (элементарных) звеньев и их классификацию, а также принципы и методики моделирования САР.

### Последовательность выполнения лабораторной работы:

- на простейшем демонстрационном примере моделирования типового звена освоить и приобрести навыки самостоятельной работы в среде SimInTech;
- по заданному варианту самостоятельно подготовить исходные данные для моделирования типового звена (табл. 3.1) и звена общего вида (табл. 3.2), выполнить на компьютере все процедуры, необходимые при их моделировании, по аналогии с демонстрационным примером.

Демонстрационный пример построен применительно к типовому колебательному звену, передаточная функция которого:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{T^2 s^2 + 2bTs + 1}, \quad (3.1)$$

где  $X(s)$  и  $Y(s)$  – изображения по Лапласу соответственно входной и выходной величин при нулевых начальных условиях;

$k$ ,  $T$  и  $b$  – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и коэффициент затухания ( $k = 1$ ,  $T = 1$  с,  $b = 0,5$ ).

Структурная схема колебательного звена, соответствующая его передаточной функции, показана на рис. 3.1.



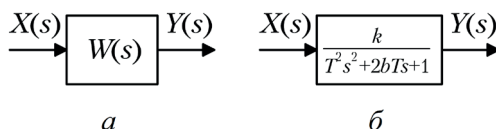


Рис. 3.1. Структурная схема колебательного звена:  
а – в общем виде; б – с раскрытием передаточной функции  
и отображением изображений входной и выходной величин  $X$  и  $Y$

Задача моделирования звена заключается в получении графика переходного процесса выходной величины  $Y(t)$  при нулевых начальных условиях и ступенчатом входном воздействии:

$$Y(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ A & \text{при } t \geq 0, \end{cases}$$

т. е. в получении его переходной функции (кривой разгона).

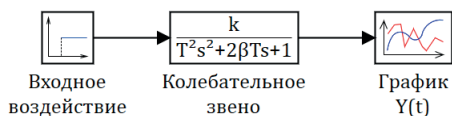


Рис. 3.2. Структурная схема моделирования колебательного звена, изображенная с использованием блоков библиотеки SimInTech

Исходные данные для демонстрационного примера подготовлены в виде структурной схемы моделирования (рис. 3.2) и следующих параметров интегрирования:

- конечное время расчета (время интегрирования) 20 с (на один-два порядка больше постоянной времени  $T = 1$  с);
- максимальный шаг интегрирования 0,1 с (на порядок меньше постоянной времени  $T = 1$  с);
- минимальный шаг интегрирования 0,01 с (на один-два порядка меньше максимального шага интегрирования);
- шаг синхронизации задачи (шаг вывода результатов) 0,1 с;
- относительная и абсолютная ошибка 0,001.

Принят метод интегрирования «Адаптивный 1».

**Пуск SimInTech, ввод структурной схемы и исходных данных.** Запустите программу, используя рекомендации, приведенные в п. 2.2. Ввод структурной схемы и исходных данных в соответствии с п. 2.6 выполните последовательно по этапам.

**Этап 1. Заполнение *схемного окна* необходимыми типовыми блоками.** Переместите курсор на кнопку  **Новый проект** и сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши, выберите в отображенном списке команд пункт **Схема автоматике** – откроется чистое *схемное окно*. Переместите курсор на вкладку **Источники палитры компонентов** и щелкните один раз *левой* клавишей мыши. Вы инициализировали соответствующую библиотеку типовых блоков. Переместите курсор

на блок *Ступенька* и сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши – фон блока на *палитре компонентов* изменился. Это означает, что блок можно переносить в *схемное окно*. Переместите курсор в верхний левый угол *схемного окна* и щелкните один раз *левой* клавишей мыши – в поле *схемного окна* появился переносимый блок.

Переместите курсор на вкладку **Динамические**, инициализируйте ее, перенесите требуемый блок (*Колебательное звено*) в *схемное окно* по вышеописанной процедуре приблизительно на желаемое место. Переместите курсор на вкладку **Данные**, инициализируйте данную библиотеку типовых блоков, перенесите блок *Временной график* в *схемное окно* примерно на желаемое место.

В результате выполнения этапа 1 *схемное окно* примет вид, показанный на рис. 3.3.

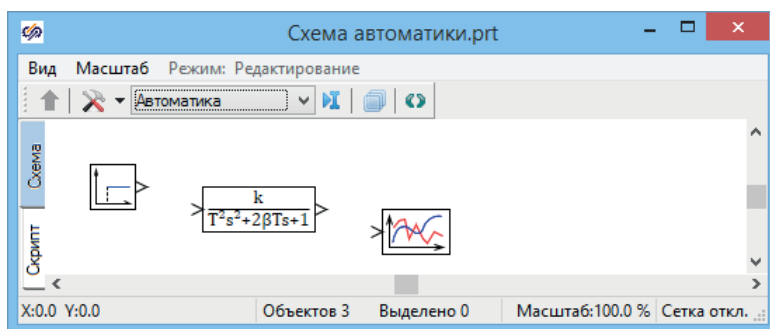


Рис. 3.3. Схемное окно, заполненное типовыми блоками

**Этап 2. Позиционирование блоков, проведение линий связи на структурной схеме.** Переместите курсор на блок *Ступенька*, нажмите на левую клавишу мыши и, не отпуская ее, перетяните этот блок так, чтобы его выходной порт (в дальнейшем просто выход) по горизонтали был на одном уровне с входным портом (в дальнейшем просто вход) блока *Колебательное звено*.

Упростить процедуру позиционирования блоков в *схемном окне* можно, включив опцию **Сетка** через *командное меню* данного окна путем выбора соответствующей команды в пункте меню **Вид** при активированной привязке по сетке (**Вид: Привязка**). Управление отображением сетки в *схемном окне* также осуществляется через строку состояния, расположенную в нижней части окна. Для включения/отключения опции **Сетка** требуется произвести однократный клик *левой* клавишей мыши по области с надписью «Сетка откл.» / «Сетка вкл.» в строке состояния *схемного окна*.

Далее переместите курсор на выходной порт блока *Ступенька*, сделайте щелчок *левой* клавишей мыши и, отпустив ее, протяните горизонтальную линию связи к входному порту блока *Колебательное звено*, где снова сделайте щелчок *левой* клавишей – на входе появится типичная входная стрелка. Если вы сделали щелчок раньше, чем проводимая связь вошла в притяжение входного порта,

дотяните линию связи до соответствующего входного порта и сделайте щелчок *левой* клавишей мыши. В области притяжения порта или линии связи меняется отображение указателя мыши – он принимает вид направленной вверх стрелки ↑.

Выполните аналогичные операции с блоком *Временной график*, расположите его на одном уровне с блоками *Ступенька* и *Колебательное звено*.

Переместите курсор на выход блока *Колебательное звено*, сделайте щелчок *левой* клавишей мыши и, отпустив клавишу, протяните горизонтальную линию ко входу блока *Временной график*, где снова сделайте щелчок *левой* клавишей. Если в процессе формирования структурной схемы возникает необходимость прервать процедуру проведения линии связи (например, по причине неудовлетворительного внешнего вида), сделайте щелчок *правой* клавишей мыши – линия оборвется. Далее эту линию можно удалить. Для этого установите курсор на линию связи и сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши. Линия будет выделена на схеме красным цветом. Удалите ее, нажав клавишу **Delete** на клавиатуре. Эти и другие подобные процедуры набора схемы моделирования упрощаются с помощью опций контекстного меню (пункт **Действия**), которое вызывается однократным щелчком *правой* клавиши мыши для выделенной линии связи.

Удаление предварительно выделенных блоков или фрагмента схемы проводят с помощью клавиши **Delete** на клавиатуре или командной кнопки **Удалить** (пиктограмма ) *панелей инструментов главного окна и схемного окна*. Для выделения блока установите на него курсор и однократно щелкните *левой* клавишей мыши, после чего внешний контур блока станет красным. Выделение нескольких блоков или фрагмента схемы происходит при перемещении курсора с нажатой *левой* клавишей мыши. Блоки, находящиеся (полностью при движении курсора слева направо или частично при движении курсора справа налево) в прямоугольной зоне, обозначенной при перемещении курсора, выделяются на схеме красным цветом.

Выделенный фрагмент схемы моделирования (блоки с линиями связи) можно перетаскивать внутри *схемного окна*. Для этого установите курсор на одном из выделенных объектов, нажмите *левую* клавишу мыши и, не отпуская ее, перетащите в желаемое место выделенный фрагмент схемы.

Для отмены выделения (линии связи, блока или фрагмента схемы) сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши в свободной части *схемного окна* или нажмите клавишу **Esc**.

С помощью *панелей инструментов (Редактирование главного окна и Правка схемного окна)*, используя командные кнопки **Вырезать**, **Копировать**, **Вставить**, **Удалить**, редактируют структурные схемы моделирования как в *главных*, так и в *субмодельных схемных окнах* (см. п. 2.4).

Сохраните введенную часть задачи. Для этого откройте меню **Файл** в *главном окне*, однократным щелчком *левой* клавишей мыши выполните команду **Сохранить проект как...** – в появившемся диалоговом окне инициализируйте строку *Имя файла*. Наберите в ней оригинальное имя вашей задачи, например «Проба», а в строке *Тип файла* укажите **Проекты (\*.prt)**. Закройте окно *Сохранение про-*

екта, однократно щелкнув *левой* клавишей мыши по кнопке **Сохранить**. Вашему проекту (файлу) будет присвоено имя **Проба.prt**.

После выполнения этапа 2 *схемное окно* примет вид, показанный на рис. 3.4. Сравнив рис. 3.3 и 3.4, обратите внимание на изменившееся имя файла (в верхней части оформления *схемного окна*).

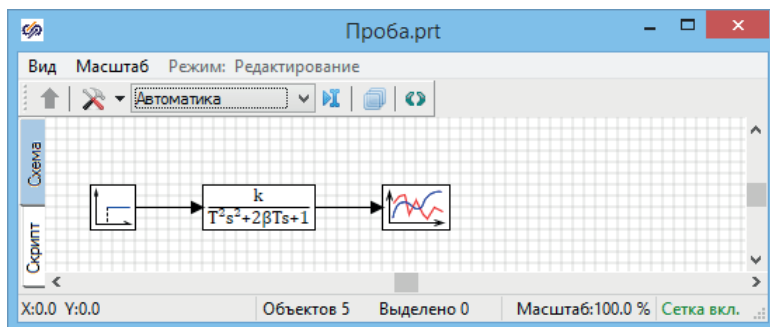


Рис. 3.4. Схемное окно с введенной структурной схемой

Сетка в *схемном окне* для дальнейшей работы не нужна, и ее можно убрать, воспользовавшись соответствующей областью строки состояния **Сетка вкл.**

(**Сетка откл.**).

**Этап 3. Ввод параметров структурной схемы.** Переместите курсор на блок *Ступенька* и сделайте двукратный щелчок *левой* клавишей мыши – откроется диалоговое окно этого блока. В результате выполнения этих операций на мониторе должно появиться *схемное окно* с диалоговым окном блока *Ступенька* (рис. 3.5).

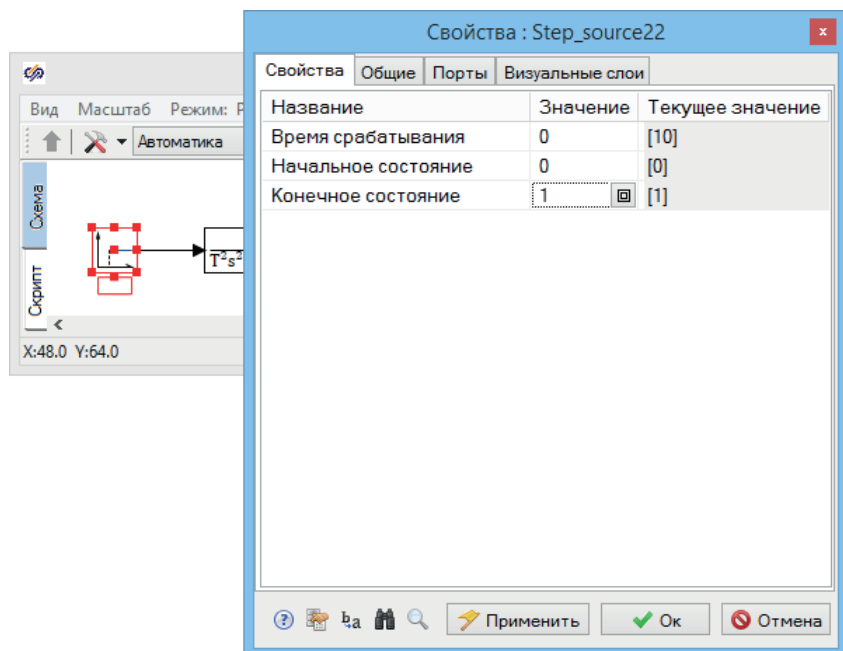
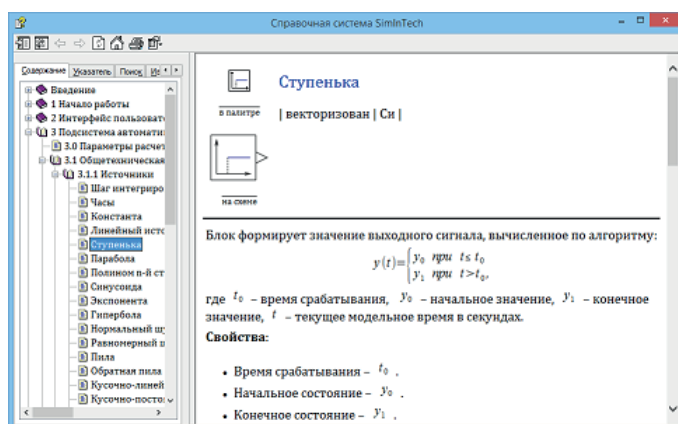
Откройте *Справку* о правилах ввода свойств блока (см. рис. 3.6), однократно щелкнув *левой* клавишей мыши по кнопке **Справка для объекта** в диалоговом окне блока *Ступенька* (рис. 3.5). Изучив правила ввода, закройте файл справочной системы SimInTech, однократно щелкнув *левой* клавишей мыши по кнопке **Заккрыть** в правом верхнем углу окна.

В диалоговом окне блока (см. рис. 3.5) в соответствующие диалоговые строки введите значения параметров единичного ступенчатого воздействия:

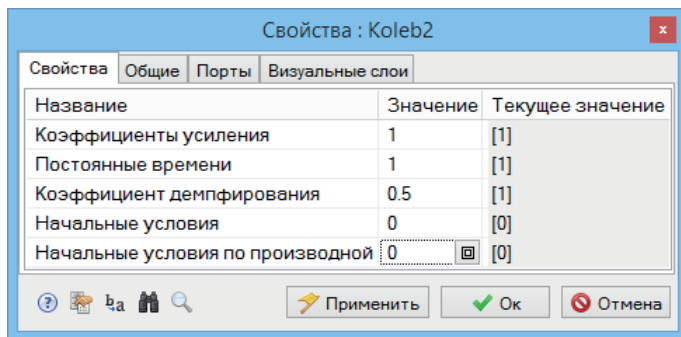
- *Время срабатывания* 0;
- *Начальное состояние* 0;
- *Конечное состояние* 1.

После ввода свойств блока нажмите на кнопку **ОК**.

Аналогичные процедуры выполните для блока *Колебательное звено* (рис. 3.4) и введите в его диалоговое окно значения  $k$ ,  $T$ ,  $b$  и начальных условий (рис. 3.7). С правилами ввода свойств блока можно ознакомиться в справочной системе SimInTech.

Рис. 3.5. Схемное окно с диалоговым окном блока *Ступенька*Рис. 3.6. Фрагмент описания блока *Ступенька* из справочной системы SimInTech

**Справка:** в качестве разделителя целой и дробной частей числа в среде SimInTech используется точка (знак «.»).

Рис. 3.7. Диалоговое окно блока *Колебательное звено*

Закройте диалоговое окно и снова сохраните задачу, щелкнув по командной кнопке **Сохранить проект**.

**Справка:** диалоговое окно любого типового блока можно открыть и другими способами. Выделите редактируемый блок, переместите на него курсор и выполните однократный щелчок *правой* клавишей мыши – появится контекстное меню блока, щелчок *левой* клавишей мыши по строке «Свойства объекта» ( **Свойства объекта**) вызывает диалоговое окно блока. Для открытия диалогового окна блока можно воспользоваться кнопкой **Свойства**, расположенной на *панели инструментов Редактирование главного окна*, или кнопкой **Свойства объекта** *панели инструментов Правка схемного окна*.

**Этап 4. Установка параметров интегрирования.** Переместите курсор на командную кнопку **Параметры расчёта** и сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши – откроется диалоговое окно **Параметры проекта** с активной вкладкой **Параметры расчёта**. Выберите численный метод интегрирования, например «Адаптивный 1». Далее введите значения параметров (без указания их размерностей):

- *Конечное время расчёта* **20 (с)**;
- *Максимальный шаг* **0.1 (с)**;
- *Минимальный шаг* **0.01 (с)**;
- *Шаг синхронизации задачи* **0.1 (с)**;
- *Относительная/Абсолютная ошибка* **0.001**.

Для ускорения процесса получения графика переходного процесса следует отключить синхронизацию расчета с реальным временем на вкладке **Синхронизация** диалогового окна **Параметры проекта**.

Закройте диалоговое окно, щелкнув *левой* клавишей мыши по кнопке **ОК**. Снова сохраните задачу (кнопка **Сохранить проект**).

**Этап 5. Оформление поясняющих подписей.** Выполните оформление структурной схемы моделирования, как это сделано на рис. 3.2.

Переместите курсор под блок *Ступенька*, ближе к середине блока. Когда появится указатель курсора мыши с вопросительным знаком , сделайте двукратный щелчок *левой* клавишей мыши – появится временное окно для ввода текста. Переместите курсор в это окно, сделайте щелчок *левой* клавишей мыши и затем введите текст подписи данного блока (в одну или несколько строк). Переместите курсор на свободное место в *схемном окне* и сделайте щелчок *левой* клавишей мыши – временное окно закроется, и под блоком появится желаемая подпись.

При выделении блока автоматически происходит выделение его подписи красной рамкой, как показано на рис. 3.5 (при отсутствии текста подписи) и 3.10 (при введенном тексте подписи) для блока *Ступенька*.

На вкладке **Общие** в диалоговом окне блока имеются расширенные настройки для редактирования и форматирования подписи блока. Более подробно данные настройки рассматриваются в лабораторной работе 2.

Сохраните введенные изменения, используя командную кнопку  **Сохранить проект**.

**Этап 6. Открытие графического окна и его настройка.** Переместите курсор на блок *Временной график* (рис. 3.4) и выделите его однократным щелчком *левой* клавиши мыши. Для открытия диалогового окна блока нажмите кнопку  **Свойства**, расположенную на *панели инструментов Редактирование главного окна*, или кнопку  **Свойства объекта панели инструментов Правка схемного окна**.

На вкладке **Свойства** диалогового окна блока *Временной график* имеется только одна диалоговая строка «Количество входных портов» (рис. 3.8). Данное свойство не требует редактирования, поскольку введенное по умолчанию значение равно **1**.

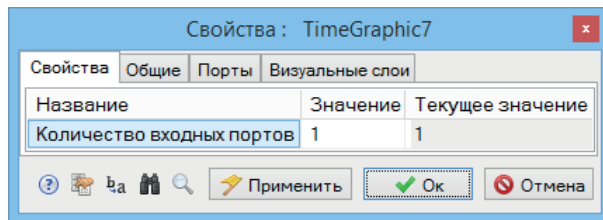


Рис. 3.8. Диалоговое окно блока *Временной график*

Закройте диалоговое окно блока *Временной график* (щелчок по кнопке **ОК**) и выполните двукратный щелчок *левой* клавишей мыши по изображению этого блока в *схемном окне* – откроется *графическое окно* с заголовком «Временной график» (рис. 3.9).

Перемещение и изменение размеров *графического окна* осуществляются стандартными средствами операционной системы Windows. Придайте *графическому окну* необходимый размер.

Установку других настроек *графического окна* следует выполнять после завершения процесса моделирования переходных процессов.

Сохраните введенные изменения, используя командную кнопку  **Сохранить проект**.

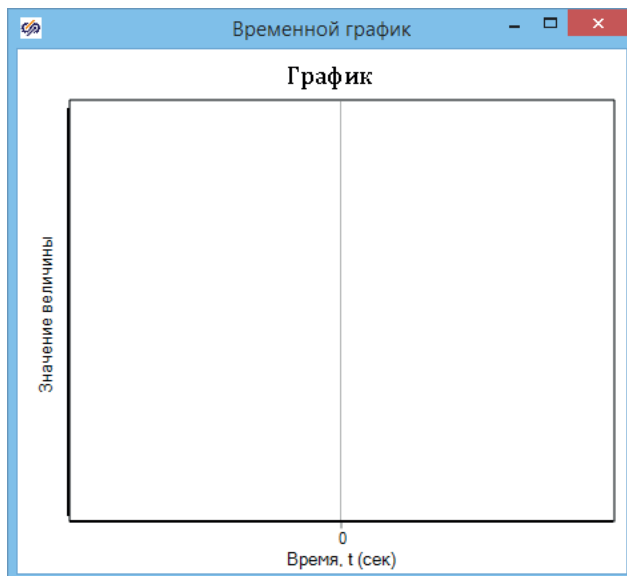


Рис. 3.9. Графическое окно блока Временной график

**Этап 7. Моделирование переходных процессов и вариантыные расчеты.** Откройте *графическое окно* двукратным щелчком *левой* клавиши мыши по блоку *Временной график* – это позволит наблюдать за построением графика в процессе расчета. Переместите курсор на командную кнопку  **Пуск** и щелкните *левой* клавишей мыши – вы запустили созданную задачу на счет. Запустить расчет можно также нажатием клавиши **F9** на клавиатуре.

По окончании расчета в нижней части *схемного окна* появится специальное окно сообщений, в котором будет выведен следующий текст: **[Информация]: «Конечное время достигнуто (time=20)»** (см. рис. 3.10).

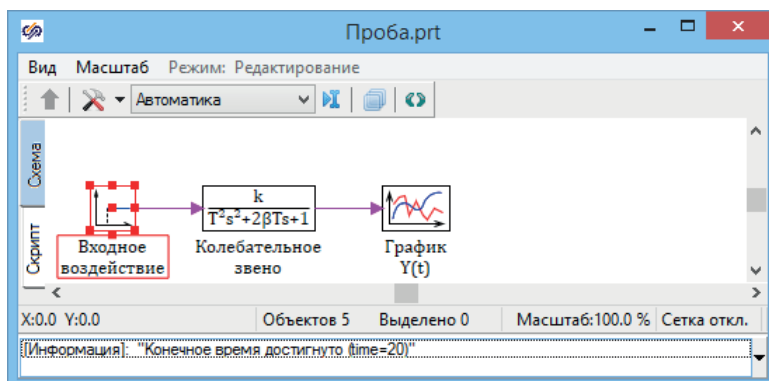


Рис. 3.10. Вывод информации в окне сообщений



Опция **Окно сообщений** служит для дополнительного информирования пользователя о текущем состоянии проекта в *схемном окне*: о наличии ошибок при выполнении проекта, о статусе расчета проекта и т. д. Для включения опции в *схемном окне* проекта следует включить в пункте меню **Вид** переключатель «Окно сообщений» (☒ Окно сообщений).

Полученный в процессе моделирования на данном этапе график переходного процесса представлен на рис. 3.11.

Пользовательский интерфейс среды SimInTech имеет широкие возможности редактирования *графического окна* с графиком переходного процесса (см. п. Ж.6 приложения Ж).

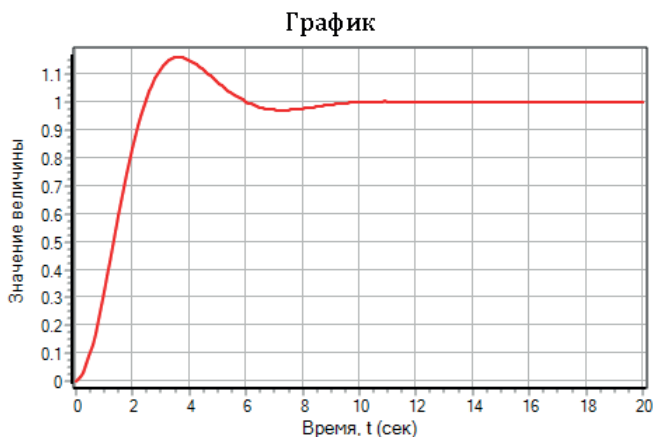


Рис. 3.11. График переходного процесса колебательного звена при коэффициенте демпфирования  $b = 0,5$

Проведите моделирование переходного процесса колебательного звена с коэффициентом демпфирования  $b = 0,2$  (рис. 3.12).

Проведите анализ численных значений переходного процесса по вызванной в *графическое окно* таблице с результатами расчетов (см. рис. 3.13). Для этого после моделирования переходного процесса переместите курсор в рабочую область *графического окна* и сделайте однократный щелчок *правой* клавишей мыши – появится контекстное меню, в котором сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши по строке «Таблица» (☐ Таблица). Вместо графика будет показана таблица с результатами расчета переходного процесса. «Механизм прокрутки» справа позволяет последовательно просмотреть в *графическом окне* всю таблицу.

Для возвращения к графику эти операции следует повторить: переместите курсор в область *графического окна* и сделайте однократный щелчок *правой* клавишей мыши, в появившемся контекстном меню сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши по строке «График» (☐ График). Вместо таблицы в окне появится график переходного процесса.

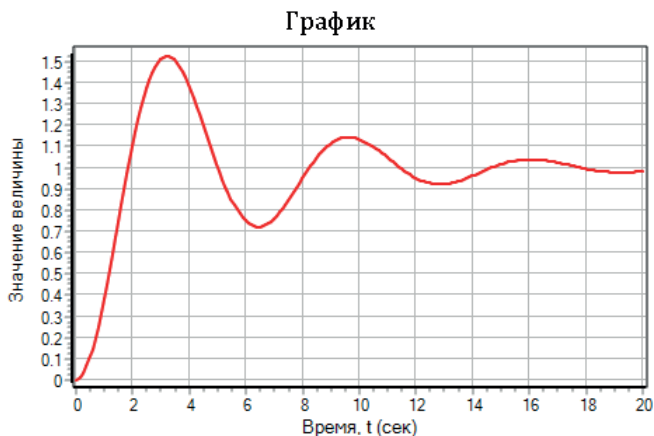


Рис. 3.12. График переходного процесса колебательного звена при коэффициенте демпфирования  $b = 0,2$

**График**

| №  | График - X | График - Y  |
|----|------------|-------------|
| 1  | 0          | 0           |
| 2  | 0.17       | 0.013278568 |
| 3  | 0.27       | 0.033700892 |
| 4  | 0.37       | 0.062786281 |
| 5  | 0.47       | 0.099910136 |
| 6  | 0.57       | 0.14439362  |
| 7  | 0.67       | 0.19551245  |
| 8  | 0.77       | 0.25250574  |
| 9  | 0.87       | 0.31458493  |
| 10 | 0.97       | 0.38094255  |
| 11 | 1.07       | 0.45076092  |
| 12 | 1.17       | 0.52322051  |
| 13 | 1.27       | 0.59750806  |
| 14 | 1.37       | 0.67282433  |
| 15 | 1.47       | 0.74844907  |
| 16 | 1.57       | 0.82351655  |

Рис. 3.13. Графическое окно с фрагментом таблицы результатов расчета переходного процесса колебательного звена при коэффициенте демпфирования  $b = 0,2$

**Выполнение индивидуального задания.** Для заданных элементов (см. табл. 3.1) и типового звена общего вида (см. табл. 3.2) подготовьте исходные данные и проведите моделирование переходного процесса при единичном ступенчатом входном воздействии в такой последовательности:

- подготовьте чертеж структурной схемы моделирования, используя библиотеку SimInTech (приложение Ж);

- исходя из числовых значений параметров передаточной функции элемента, определите параметры интегрирования: метод, шаг, время интегрирования, шаг синхронизации задачи – и задайтесь требуемой точностью расчетов;
- введите исходные данные и выполните моделирование по аналогии с рассмотренным демонстрационным примером;
- перепишите данные расчета из *графического окна* и постройте по ним графики переходных процессов или воспользуйтесь непосредственно копиями графиков *графического окна*.

**Содержание отчета.** В отчете должны быть принципиальные и структурные схемы исследуемых элементов и звеньев, структурные схемы моделирования и графики переходных процессов, построенные по результатам моделирования, а также необходимые выводы по работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Что такое структурная схема элемента САР?
2. Как составляют структурную схему САР?
3. Какие виды типовых воздействий используют в автоматике?
4. Что такое переходная функция (кривая разгона)?
5. Что такое типовое (элементарное), безынерционное (пропорциональное, идеальное, усилительное) звено?
6. Что представляют собой аperiodическое звено первого порядка, аperiodическое звено второго порядка, колебательное звено, интегрирующее звено, дифференцирующее звено, звено запаздывания?
7. Что понимают под терминами «математическая модель» и «математическое моделирование»?
8. Каковы цели математического моделирования САР?
9. В чем сущность структурного моделирования САР?
10. В чем сущность компьютерного моделирования САР с помощью ПО SimInTech?
11. Чем отличается структурная схема моделирования САР от ее исходной структурной схемы?
12. Как выбирают шаг интегрирования?
13. Как выбирают время интегрирования?
14. Как выбирают метод интегрирования?
15. Как задают шаг синхронизации задачи?

Таблица 3.1. Варианты индивидуальных заданий для моделирования элементов автоматических систем

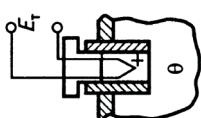
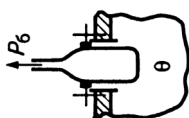
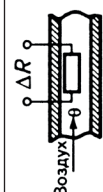
| Вари-<br>ант | Наимено-<br>вание<br>элемента                    | Принципиальная<br>схема                                                             | Входная величина.<br>Выходная величина                                                       | Передаточная функция                                                                                                                                                                     |
|--------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1            | Термопара,<br>помещенная<br>в защитный<br>кожух  |  | Температура $\theta$ объекта<br>измерения.<br>ЭДС $E_T$ на зажимах термопары                 | $W(s) = \frac{E_T(s)}{\theta(s)} = \frac{k}{Ts + 1},$<br>где $k = 0,0005...0,001 \text{ В}/^\circ\text{C}$ – коэффициент передачи;<br>$T = 3...10 \text{ с}$ – постоянная времени        |
| 2            | Термобаллон                                      |  | Температура $\theta$ объекта<br>измерения.<br>Давление $P_6$ в термобаллоне                  | $W(s) = \frac{P_6(s)}{\theta(s)} = \frac{k}{Ts + 1},$<br>где $k = 0,001...0,01 \text{ МПа}/^\circ\text{C}$ – коэффициент передачи;<br>$T = 0,001...0,002 \text{ с}$ – постоянная времени |
| 3            | Трубка<br>Бурдона для<br>измерения<br>давления   |  | Давление $P$ в объекте измерения.<br>Перемещение $S$ свободного конца<br>трубки Бурдона      | $W(s) = \frac{P_6(s)}{\theta(s)} = \frac{k}{Ts + 1},$<br>где $k = 0,5...1,0 \text{ мм}/\text{МПа}$ – коэффициент передачи;<br>$T = 0,005...0,01 \text{ с}$ – постоянная времени          |
| 4            | Термодатчик<br>(термометр<br>сопротивле-<br>ния) |  | Температура $\theta$ воздуха или газа.<br>Изменение сопротивления $\Delta R$<br>термодатчика | $W(s) = \frac{\Delta R(s)}{\theta(s)} = \frac{k}{Ts + 1},$<br>где $k = 1...10 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$ – коэффициент передачи;<br>$T = 3...10 \text{ с}$ – постоянная времени          |

Таблица 3.1 (продолжение)

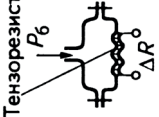
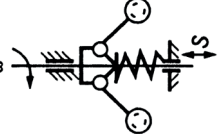
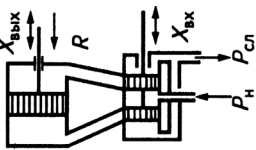
| 1 | 2                                | 3                                                                                                               | 4                                                                                                                      | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | Тензометрический датчик давления | <p><b>Тензорезистор</b></p>  | <p>Давление <math>P_6</math> в объекте измерения.<br/>Изменение сопротивления <math>\Delta R</math> тензорезистора</p> | $W(s) = \frac{\Delta R(s)}{P_6(s)} = k,$ <p>где <math>k = 50 \dots 100</math> Ом/МПа – коэффициент передачи</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 6 | Центробежный тахометр            |                              | <p>Частота вращения <math>\omega</math>.<br/>Перемещение <math>S</math> тяги тахометра</p>                             | $W(s) = \frac{S(s)}{\omega(s)} = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\varepsilon Ts + 1},$ <p>где <math>k = 0,05 \dots 0,1</math> м·с/рад – коэффициент передачи;<br/><math>T = 0,01 \dots 0,015</math> с – постоянная времени;<br/><math>\varepsilon = 0,1 \dots 0,8</math> – коэффициент демпфирования</p>                                                                                                                                                                  |
| 7 | Гидроусилитель                   |                              | <p>Перемещение <math>X_{вх}</math> золотника.<br/>Перемещение <math>X_{вых}</math> поршня</p>                          | <p>1. Для САР с большим быстродействием</p> $W(s) = \frac{X_{вых}(s)}{X_{вх}(s)} = \frac{k}{s(T^2 s^2 + 2\varepsilon Ts + 1)},$ <p>где <math>k = 5 \dots 10</math> – коэффициент передачи;<br/><math>T = 0,005 \dots 0,015</math> с – постоянная времени;<br/><math>\varepsilon = 0,2 \dots 0,5</math> – коэффициент демпфирования.</p> <p>2. Для САР с малым быстродействием</p> $W(s) = \frac{X_{вых}(s)}{X_{вх}(s)} = \frac{k}{s} \quad \text{при } T = 0$ |

Таблица 3.1 (продолжение)

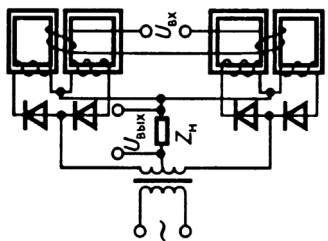
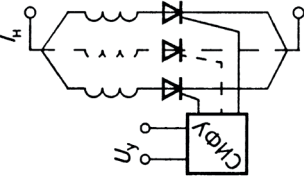
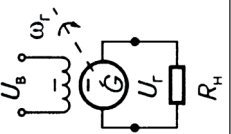
| 1  | 2                                                                  | 3                                                                                    | 4                                                                                                                                      | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8  | Магнитный усилитель                                                |   | <p>Напряжение <math>U_{вх}</math> на входе усилителя.</p> <p>Напряжение <math>U_{вых}</math> на выходе усилителя</p>                   | $W(s) = \frac{U_{вых}(s)}{U_{вх}(s)} = \frac{k}{Ts + 1},$ <p>где <math>k = 10...50</math> – коэффициент передачи;<br/> <math>T = 0,01...0,1</math> с – постоянная времени</p>                                                                                                                           |
| 9  | Управляемый тиристорный преобразователь двигателя постоянного тока |   | <p>Напряжение <math>U_y</math> на входе в систему импульсно-фазового управления (СИФУ).</p> <p>Сила тока <math>I_n</math> нагрузки</p> | <p>1. Для САР с большим быстродействием</p> $W(s) = \frac{I_n(s)}{U_y(s)} = k,$ <p>где <math>k = 5...10</math> А/В – коэффициент передачи.</p> <p>2. Для САР с малым быстродействием</p> $W(s) = \frac{I_n(s)}{U_y(s)} = ke^{-cs},$ <p>где <math>\tau = 0,009...0,015</math> с – время запаздывания</p> |
| 10 | Генератор постоянного тока с независимым возбуждением              |  | <p>Напряжение <math>U_в</math> на обмотке возбуждения.</p> <p>Напряжение <math>U_r</math> на зажимах генератора</p>                    | $W(s) = \frac{U_r(s)}{U_в(s)} = \frac{k}{Ts + 1},$ <p>где <math>k = 2...5</math> – коэффициент передачи;<br/> <math>T = 0,05...0,8</math> с – постоянная времени</p>                                                                                                                                    |

Таблица 3.1 (продолжение)

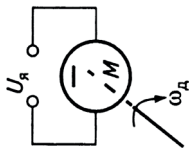
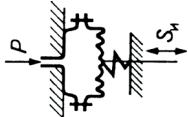
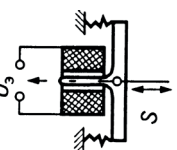
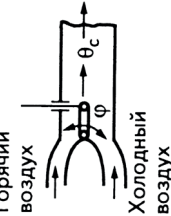
| 1  | 2                                                            | 3                                                                                   | 4                                                                                            | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11 | Электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением |  | Напряжение $U_d$ на зажимах якоря.<br>Частота $\omega_d$ вращения вала двигателя             | $W(s) = \frac{\omega_d(s)}{U_a(s)} = \frac{k}{T_\Sigma T_M s^2 + T_M s + 1},$ <p>где <math>k = 5...10</math> (рад/с)/В – коэффициент передачи;<br/> <math>T_\Sigma = 0,002...0,005</math> с – электромагнитная постоянная времени;<br/> <math>T_M = 0,015...0,02</math> с – механическая постоянная времени</p> |
| 12 | Пневматический исполнительный элемент                        |  | Давление $P$ в мембранной камере.<br>Перемещение $S_H$ тяги                                  | $W(s) = \frac{S_H(s)}{P(s)} = \frac{k}{T_s^2 s^2 + 2\varepsilon T_s s + 1},$ <p>где <math>k = 0,5...1,0</math> мм/МПа – коэффициент передачи;<br/> <math>T = 0,005...0,01</math> с – постоянная времени;<br/> <math>\varepsilon = 0,1...0,4</math> – коэффициент демпфирования</p>                              |
| 13 | Электромагнит (электромагнитный исполнительный механизм)     |  | Напряжение $U_\Sigma$ , подаваемое на электромагнит.<br>Перемещение $S$ якоря электромагнита | $W(s) = \frac{S(s)}{U_\Sigma(s)} = \frac{k}{T_\Sigma s^2 + 1},$ <p>где <math>k = 0,05...0,1</math> мм/В – коэффициент передачи;<br/> <math>T_\Sigma = 0,001...0,0015</math> с – электромагнитная постоянная времени;<br/> <math>T_M = 0,005...0,01</math> с – механическая постоянная времени</p>               |
| 14 | Камера смешивания горячего и холодного воздуха               |  | Угол $\phi$ поворота заслонки.<br>Температура $\theta_c$ воздуха в камере смешения           | $W(s) = \frac{\theta_c(s)}{\phi(s)} = \frac{k}{T_s s + 1},$ <p>где <math>k = 50...100</math> °С/рад – коэффициент передачи;<br/> <math>T = 0,01...0,03</math> с – постоянная времени</p>                                                                                                                        |

Таблица 3.1 (окончание)

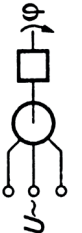
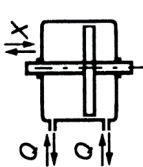
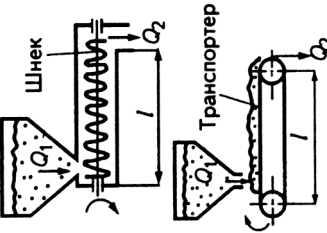
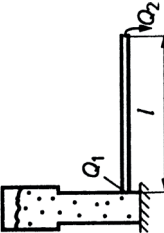
| 1  | 2                                                            | 3                                                                                   | 4                                                                                                      | 5                                                                                                                                      |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15 | Электродвигательный исполнительный механизм                  |  | Напряжение $U$ на статорной обмотке электродвигателя.<br>Угол $\phi$ поворота вала редуктора           | $W(s) = \frac{\phi(s)}{U(s)} = \frac{k}{s}$ ,<br>где $k = 2...8$ (рад/с)/В – коэффициент передачи                                      |
| 16 | Поршневой гидравлический исполнительный механизм             |  | Расход жидкости (масла) $Q$ подаваемой в гидроцилиндр.<br>Перемещение $X$ штока гидроцилиндра          | $W(s) = \frac{X(s)}{Q(s)} = \frac{k}{s}$ ,<br>где $k = 0,003...0,008$ см/см <sup>2</sup> – коэффициент передачи                        |
| 17 | Шнековый (транспортерный) исполнительный механизм – питатель |  | Расход $Q_1$ сыпучего материала на входе в шнек.<br>Расход $Q_2$ сыпучего материала на выходе из шнека | $W(s) = \frac{Q_2(s)}{Q_1(s)} = e^{-\tau s}$ ,<br>где $\tau$ – время транспортного запаздывания, с.<br>Ориентировочно $\tau = 2...8$ с |
| 18 | Протяженный водопровод                                       |  | Расход $Q_1$ воды из водонапорной башни.<br>Расход $Q_2$ воды на выходе из водопровода                 | $W(s) = \frac{Q_2(s)}{Q_1(s)} = e^{-\tau s}$ ,<br>где $\tau$ – время транспортного запаздывания, с.<br>Ориентировочно $\tau = 1...3$ с |



Таблица 3.2. Варианты индивидуальных заданий для моделирования звеньев общего вида

| Вариант | Передаточная функция                                                                       | Значения параметров передаточных функций                                                                                                                                    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | $W(s) = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$ | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2; a_3 = 0,9 \text{ с}^3; a_4 = 0,5 \text{ с}^4; b_0 = 1; b_1 = 3 \text{ с}; b_2 = 0,8 \text{ с}^2; b_3 = 0,3 \text{ с}^3$ |
| 2       | $W(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$                     | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2; a_3 = 0,9 \text{ с}^3; b_0 = 1; b_1 = 3 \text{ с}; b_2 = 0,8 \text{ с}^2$                                               |
| 3       | $W(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$                                         | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2; b_0 = 1; b_1 = 3 \text{ с}$                                                                                             |
| 4       | $W(s) = \frac{b}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$                               | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2; a_3 = 0,9 \text{ с}^3; a_4 = 0,5 \text{ с}^4; b = 10$                                                                   |
| 5       | $W(s) = \frac{b}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$                                         | $a_0 = 1; a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2; a_3 = 0,9 \text{ с}^3; b = 10$                                                                                          |
| 6       | $W(s) = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s}$       | $a_1 = 5 \text{ с}; a_2 = 1,2 \text{ с}^2; a_3 = 0,9 \text{ с}^3; a_4 = 0,5 \text{ с}^4; b_0 = 1; b_1 = 3 \text{ с}; b_2 = 0,8 \text{ с}^2; b_3 = 0,3 \text{ с}^3$          |
| 7       | $W(s) = \frac{T_0 s + 1}{T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$                               | $T_0 = 2 \text{ с}; T_1 = 4 \text{ с}; T_2 = 1,1 \text{ с}; T_3 = 0,9 \text{ с}$                                                                                            |
| 8       | $W(s) = \frac{T_0 s + 1}{T_4^4 s^4 + T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + s}$                           | $T_0 = 2 \text{ с}; T_2 = 4 \text{ с}; T_3 = 1,1 \text{ с}; T_4 = 0,9 \text{ с}$                                                                                            |
| 9       | $W(s) = \frac{k}{T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$                                       | $k = 10; T_1 = 4 \text{ с}; T_2 = 1,1 \text{ с}; T_3 = 0,9 \text{ с}$                                                                                                       |
| 10      | $W(s) = \frac{k}{T_4^4 s^4 + T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + s}$                                   | $k = 10; T_2 = 4 \text{ с}; T_3 = 1,1 \text{ с}; T_4 = 0,9 \text{ с}$                                                                                                       |
| 11      | $W(s) = \frac{T_0 s + 1}{T_5^5 s^5 + T_4^4 s^4 + T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$       | $T_0 = 0,7 \text{ с}; T_1 = 3 \text{ с}; T_2 = 1,2 \text{ с}; T_3 = 0,9 \text{ с}; T_4 = 0,8 \text{ с}; T_5 = 0,5 \text{ с}$                                                |
| 12      | $W(s) = \frac{k}{T_5^5 s^5 + T_4^4 s^4 + T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$               | $k = 10; T_1 = 3 \text{ с}; T_2 = 1,2 \text{ с}; T_3 = 0,9 \text{ с}; T_4 = 0,8 \text{ с}; T_5 = 0,5 \text{ с}$                                                             |

## Работа 2. Изучение программного обеспечения SimInTech на примерах моделирования линейных САР

### Цели работы:

- изучить инструментарий среды SimInTech для моделирования САР;
- освоить процедуры формирования структурной схемы моделирования, выбора метода и параметров интегрирования, ввода свойств блоков, вывода данных расчета.

**Теоретический материал, необходимый для выполнения работы.** Помимо сведений, необходимых для выполнения лабораторной работы 1, следует знать

принципы работы САР, понятия их устойчивости и качества (п. 1.3.2), а также методику подготовки данных для моделирования в среде SimInTech (п. 2.1).

### **Последовательность выполнения лабораторной работы:**

- на демонстрационном примере моделирования линейной САР освоить и приобрести навыки самостоятельной работы в среде SimInTech;
- для заданной САР (приложение Б) или для САР, рассмотренной в демонстрационном примере, по варианту индивидуального задания (см. табл. 3.3) подготовить исходные данные для моделирования;
- выполнить на компьютере все процедуры, необходимые при моделировании, по аналогии с демонстрационным примером;
- по результатам моделирования проанализировать устойчивость и качество системы в соответствии с п. 1.3.2.

В качестве **демонстрационного примера** рассмотрим САР напряжения синхронного генератора, описание которой приведено в п. 2.1. Данная система автоматического регулирования предназначена для стабилизации напряжения на выходах синхронного генератора при изменении тока нагрузки.

Значения параметров передаточных функций (2.1)–(2.6) САР:  $k_{OP} = 30$ ;  $k_{ОВ} = 1,64 \text{ В/А}$ ;  $k_{ВО} = 0,001$ ;  $k_{ПО} = 2,34$ ;  $k_1 = 1 \dots 35$ ;  $k_2 = 2$ ;  $k_{ИО} = 2$ ;  $T_O = 1,2 \text{ с}$ ;  $T_2 = 0,15 \text{ с}$ ;  $T_{ИО} = 0,5 \text{ с}$ ;  $b = 1,17$ .

Входные воздействия САР:

- задающее воздействие  $U_0$  определяем путем его подбора в процессе моделирования таким, чтобы напряжение на выходе синхронного генератора было равно номинальному значению  $U_H = 6,3 \text{ кВ}$  при номинальном токе нагрузки  $I_H = 688 \text{ А}$ ;
- максимальное возмущающее воздействие – скачкообразное изменение тока нагрузки от  $I_{ХХ} = 0$  до  $I_H = 688 \text{ А}$ .

Исходные данные, необходимые для моделирования САР, подготовим с учетом рекомендаций, приведенных в п. 2.1 (**этап 1**) и приложении Ж.

Составим структурную схему моделирования САР посредством замены каждого звена исходной структурной схемы (см. рис. 2.4) соответствующим блоком из *общетехнической* библиотеки SimInTech.

Для формирования задающего воздействия  $U_0$  используем блок *Константа*, а возмущающего воздействия (изменения тока нагрузки  $I$ ) – блок *Ступенька* из библиотеки «Источники».

Из библиотеки «Данные» для регистрации переходных процессов на выходе САР выберем блок *Временной график*. Соединив выбранные блоки в соответствии с исходной структурной схемой, получим структурную схему для моделирования САР (рис. 3.14).

Для определения исходных числовых данных, которые необходимо задавать при моделировании САР, воспользуемся п. 2.1 (**этап 2**):

- примем метод интегрирования «Адаптивный 1»;
- изменим параметры точности интегрирования (относительная ошибка  $1e - 3$  и абсолютная ошибка  $1e - 1$ );

- максимальный шаг интегрирования определим на основе анализа постоянных времени ( $T_O = 1,2$  с;  $T_2 = 0,15$  с;  $T_{ИО} = 0,5$  с). Минимальное значение имеет постоянная времени  $T_2 = 0,15$  с, поэтому максимальный шаг интегрирования примем  $0,015$  с (в десять раз меньше значения  $T_2$ );
- минимальный шаг интегрирования зададим в 100 раз меньше его максимального значения, т. е. равным  $1,5e - 4$  с;
- исходя из наибольшей постоянной времени  $T_O = 1,2$  с, примем конечное время расчета равным 20 с;
- зададим шаг синхронизации задачи равным максимальному шагу интегрирования  $0,015$  с.

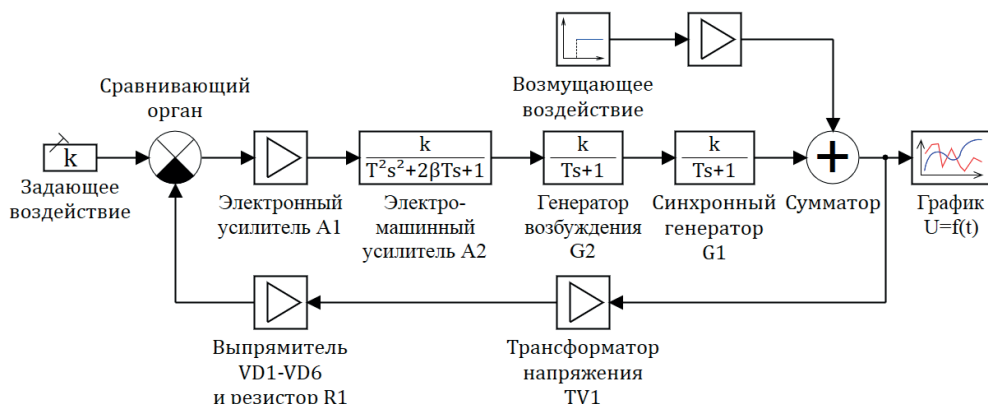


Рис. 3.14. Структурная схема моделирования САП

**Ввод структурной схемы и исходных данных.** Ввод структурной схемы (см. рис. 3.14) и подготовленных числовых данных в компьютер выполняется после запуска программы SimInTech (п. 2.2) поэтапно (см. п. 2.6).

**Этап 1. Заполнение схемного окна необходимыми типовыми блоками.** Создайте новый файл проекта с помощью кнопки **Новый проект**. Сохраните созданный файл проекта на носителе информации ПК, используя для этого кнопку **Сохранить проект**. При этом присвойте имя файлу типа \*.prt, например «Синхронный генератор». В результате вашему проекту (файлу) будет присвоено имя **Синхронный генератор.prt**.

Переместите курсор на вкладку **Источники палитры компонентов** и перенесите с помощью мыши блок *Константа* в чистое схемное окно. Из данной вкладки также перенесите блок *Ступенька* в желаемое место схемного окна.

Инициализируйте библиотеку «Операторы» (одноименная вкладка *Палитры компонентов*). Из нее в свободное место схемного окна перенесите блоки *Сравнивающее устройство* и *Сумматор*, необходимый для суммирования выходных сигналов объекта регулирования. Из этой же библиотеки перенесите четыре блока *Усилитель*. Перенесите в свободное место схемного окна два блока *Инерционное звено 1-го порядка* и один блок *Колебательное звено* из библиотеки «Динамические».

Переместите курсор на вкладку **Данные** и из данной библиотеки типовых блоков перенесите блок *Временной график* в *схемное окно* примерно на желаемое место.

Результаты выполнения первого этапа представлены на рис. 3.15.

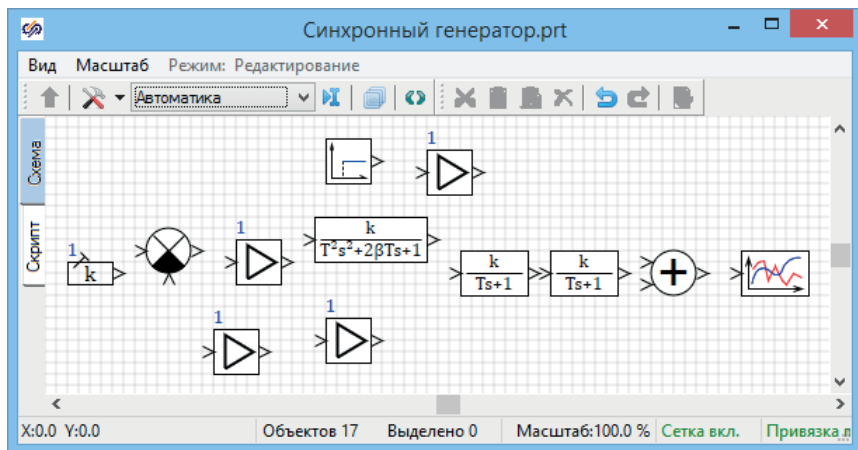


Рис. 3.15. Схемное окно, заполненное типовыми блоками

**Этап 2. Позиционирование блоков, проведение линий связи на структурной схеме.** При создании структурной схемы моделирования САР с целью рационального использования рабочей области *схемного окна* или улучшения удобочитаемости схемы может потребоваться изменение исходной ориентации блоков и расположения их входов и выходов.

Ориентация блоков может быть любая – это не имеет принципиального значения. Для изменения позиционирования и ориентации блоков в среде SimInTech предусмотрен ряд команд, доступных через контекстное меню для выделенных объектов (рис. 3.16).

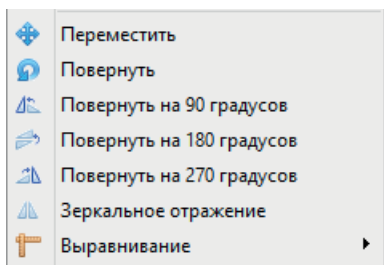


Рис. 3.16. Команды контекстного меню для позиционирования и ориентирования выделенных в *схемном окне* объектов

Установите курсор на блок *Сумматор* и двукратным щелчком *левой* клавиши мыши откройте диалоговое окно этого блока. Перейдите на вкладку **Порты** (рис. 3.17). Выделите в списке портов блока третий элемент **3: PORT2**, в параметрах порта из выпадающего списка установите расположение **Сверху**. Таким образом можно изменять расположение портов блока.

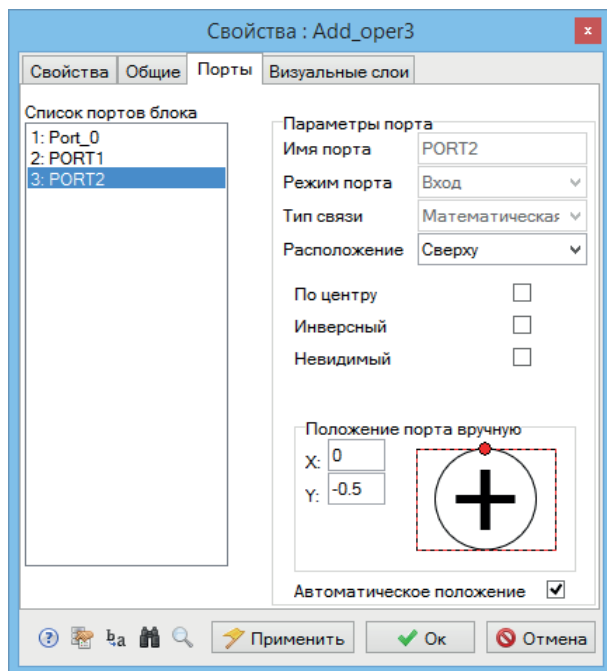


Рис. 3.17. Вкладка **Порты** диалогового окна блока *Сумматор*

Установите курсор на блок *Сравнивающее устройство*, нажмите на *левую* клавишу мыши и, не отпуская ее, перетащите этот блок так, чтобы было удобно соединить его первый входной порт, расположенный слева, с выходным портом блока *Константа*. Для удобства позиционирования блоков и проведения линий связи между ними рекомендуется использовать опцию **Сетка**.

Далее переместите курсор на выходной порт блока *Константа*, сделайте щелчок *левой* клавишей мыши и, отпустив клавишу, «протяните» горизонтальную линию связи к левому входному порту блока *Сравнивающее устройство*.

---

**Справка:** проведение линий связи возможно и в обратном направлении – от входного порта к выходному.

---

С использованием аналогичных процедур уточните расположение блоков в цепи структурной схемы, используя процедуру «перетаскивания» блоков в *схемном окне*, и проведите линии связи.

Если требуется сделать поворот в линии связи, то при ее проведении выполните щелчок *левой* клавишей мыши в точке поворота и продолжайте проведение линии связи в новом направлении. В данном случае (см. рис. 3.14) требуется проведение линии связи от выходного порта блока *Усилитель* ко второму входному порту (расположенному сверху) блока *Сумматор*: направо – вниз. Проведите направо от выходного порта блока *Усилитель* горизонтальную линию связи на необходимое расстояние до точки поворота вниз, в которой следует щелкнуть *левой* клавишей мыши и продолжать проведение вертикальной линии связи вниз к верхнему входному порту блока *Сумматор*. Снова сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши – на верхнем входе появится типичная входная стрелка.

Переместите блок *Временной график*, сделайте ответвление от линии связи между блоками *Сумматор* и *Усилитель* (звено «Трансформатор напряжения TV1»), продлите «ответвление» от этой линии связи до входа в блок *Временной график* (см. рис. 3.14). Для этого переместите курсор на линию связи, нажмите на клавиатуре клавишу **Alt** и, не отпуская ее, сделайте щелчок *левой* клавишей мыши (на линии связи появится узловая точка); отпустив клавишу **Alt**, проведите линию связи ко входу блока *Временной график* и сделайте щелчок *левой* клавишей мыши. Данное ответвление также можно выполнить следующим образом. Переместите курсор ко входу блока *Временной график* и сделайте щелчок *левой* клавишей мыши, подведите курсор к линии связи между блоками *Сумматор* и *Усилитель* и, когда он войдет в область «притяжения», сделайте щелчок *левой* клавишей мыши. В результате появится требуемое ответвление.

Дополнительные команды для редактирования линий связи доступны через контекстное меню, представленное на рис. 3.18.

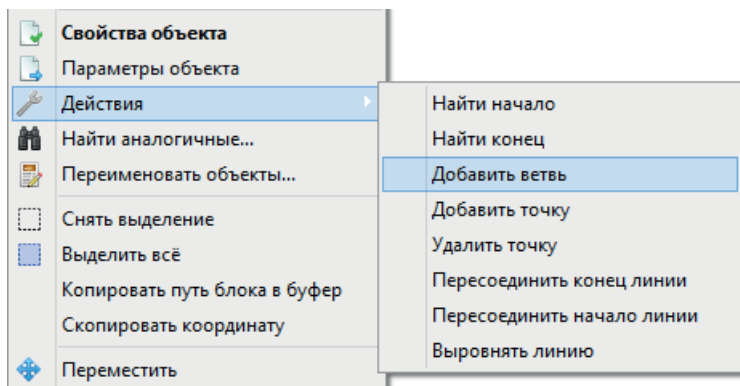


Рис. 3.18. Команды контекстного меню для редактирования линий связи

Отключите опцию **Сетка** в *схемном окне*.

Результаты проделанных операций отображены на рис. 3.19.

При необходимости для отображения всей структурной схемы моделирования в рабочей области *схемного окна* можно изменить размеры окна. Это осуществляется стандартными средствами Windows. Для изменения размеров рабочей обла-

сти *схемного окна* предусмотрена команда **Задать размеры рабочей области окна** в меню окна **Масштаб**.

Если набранная структурная схема не «вписалась» в размеры *схемного окна*, можно воспользоваться командой **Показать все** из меню **Масштаб**. При этом произойдет перемасштабирование структурной схемы, и она станет полностью наблюдаемой в *схемном окне*.

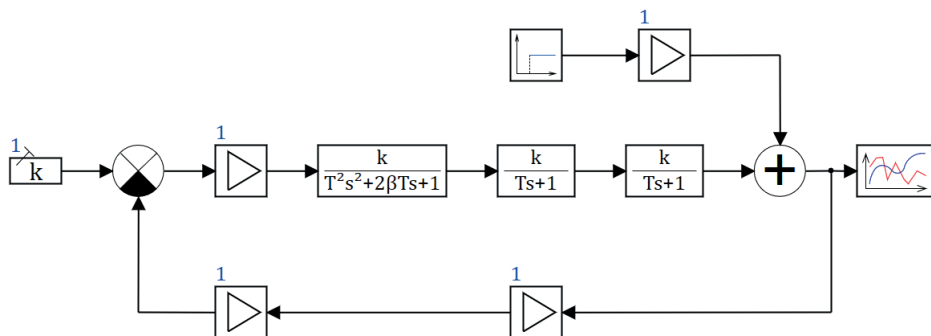


Рис. 3.19. Проведение линий связи структурной схемы моделирования САР

Сохраните введенные изменения, используя командную кнопку **Сохранить проект**.

**Этап 3. Ввод параметров структурной схемы.** Рассмотрим ввод свойств блоков структурной схемы на примере блока *Ступенька*.

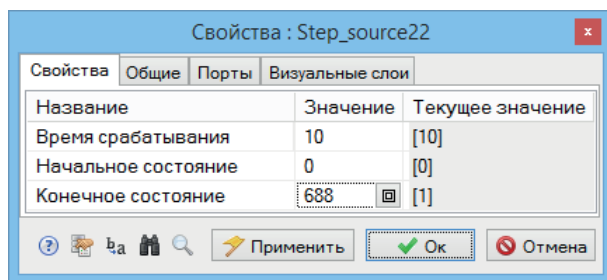


Рис. 3.20. Вкладка **Свойства** диалогового окна блока *Ступенька*

Переместите курсор на блок *Ступенька* и сделайте двукратный щелчок *левой клавишей мыши* – откроется диалоговое окно этого блока (рис. 3.20) с активной вкладкой **Свойства**. В соответствующие диалоговые строки введите значения свойств возмущающего ступенчатого воздействия:

- *Время срабатывания* **10**;
- *Начальное состояние* **0**;
- *Конечное состояние* **688**.

После ввода свойств блока нажмите на кнопку **ОК**.

Это означает, что ступенчатое возмущающее воздействие 688 А будет подано через 10 секунд после начала расчета. До этого момента времени возмущение отсутствовало (0 – нулевые начальные условия).

Вкладка **Порты** позволяет изменять расположение входных, выходных портов типового блока, делать их невидимыми, а также инвертировать сигналы портов (см. рис. 3.17).

Проведите аналогичные процедуры с каждым блоком и введите его свойства. На рис. 3.21–3.25 показаны диалоговые окна с введенными свойствами блоков структурной схемы, изображенной на рис. 3.14.

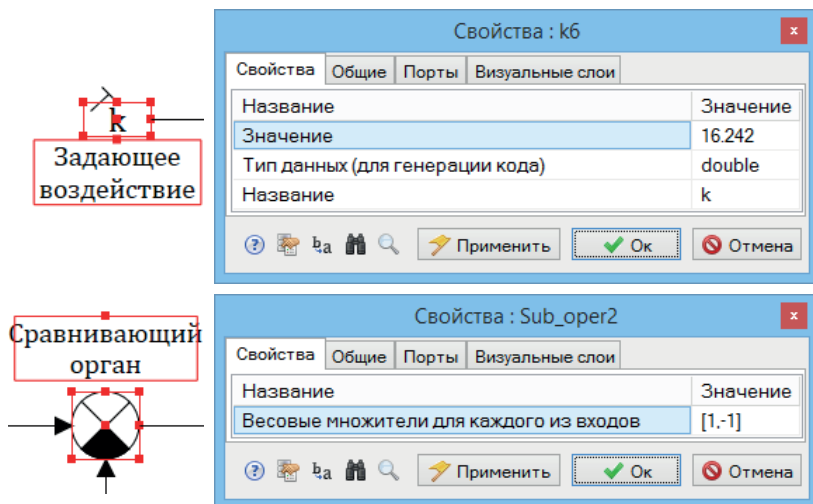


Рис. 3.21. Диалоговые окна с заданными свойствами блоков «Задающее воздействие», «Сравнивающий орган»

Откройте диалоговое окно блока *Сравнивающее устройство*, в котором осуществляется сравнение задающего воздействия и сигнала главной обратной связи САР, и убедитесь, что в диалоговой строке уже введены (по умолчанию) необходимые свойства: **[1,-1]** (весовой множитель для первого входа равен плюс 1, для второго – минус 1). При ориентации блока слева направо необходимо подать главную обратную связь на нижний вход, если свойства блока введены по умолчанию (плюс 1 и минус 1). Это необходимо для создания отрицательной главной обратной связи САР.

В диалоговом окне блока *Сумматор*, в котором должны быть просуммированы без изменения знаков выходные сигналы объекта регулирования (от регулирующего и возмущающего воздействий), необходимо ввести (через запятую, в квадратных скобках) свойства: **[1,1]** (плюс 1 и плюс 1). Эти значения весовых множителей для двух исходных входов данного блока используются по умолчанию.



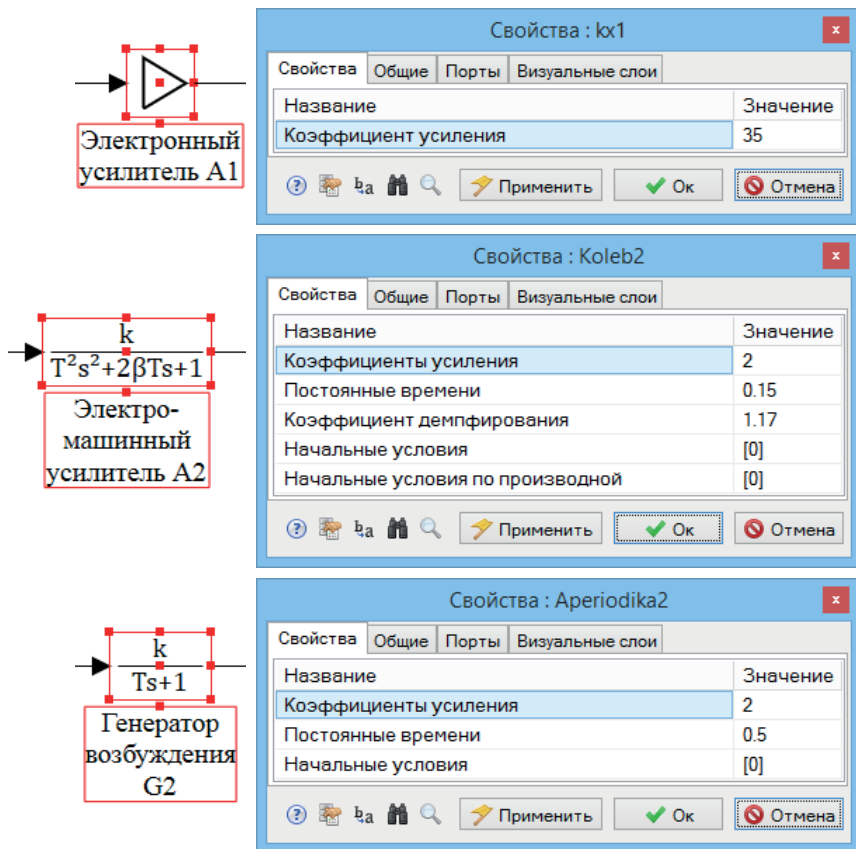


Рис. 3.22. Диалоговые окна с заданными свойствами блоков «Электронный усилитель A1», «Электромашинный усилитель A2», «Генератор возбуждения G2»

**Справка:** если блок *Сумматор* используется для алгебраического сложения трех сигналов, например с весовыми коэффициентами 0,8, -1,2 и 2,5, то в строке ввода их значений необходимо ввести соответствующие свойства через запятую, в квадратных скобках (для удобочитаемости можно использовать пробел после запятой): **[0.8, -1.2, 2.5]**. При закрытии диалогового окна произойдет «перерисовка» этого блока, и он будет иметь 3 входных порта, где верхний входной порт (при ориентации блока слева направо) – для 1-го сигнала (коэффициент равен 0,8), средний вход – для 2-го сигнала (коэффициент равен -1,2) и нижний вход – для 3-го сигнала (коэффициент равен 2,5). Аналогично поступают при большем количестве суммируемых сигналов.

Изменение ориентации блока приводит к соответствующему изменению положения входных портов. Так, при ориентации снизу вверх бывший верхний входной порт (для 1-го сигнала с коэффициентом 0,8) станет первым слева; при ориентации справа налево бывший верхний входной порт (для 1-го сигнала с коэффициентом 0,8) станет нижним. Во всех случаях запись в диалоговой строке блока остается неизменной: **[0.8, -1.2, 2.5]**. Изменение и однозначное определение расположения входных и выходных портов блока возможны в его диалоговом окне на вкладке **Порты** (рис. 3.17).

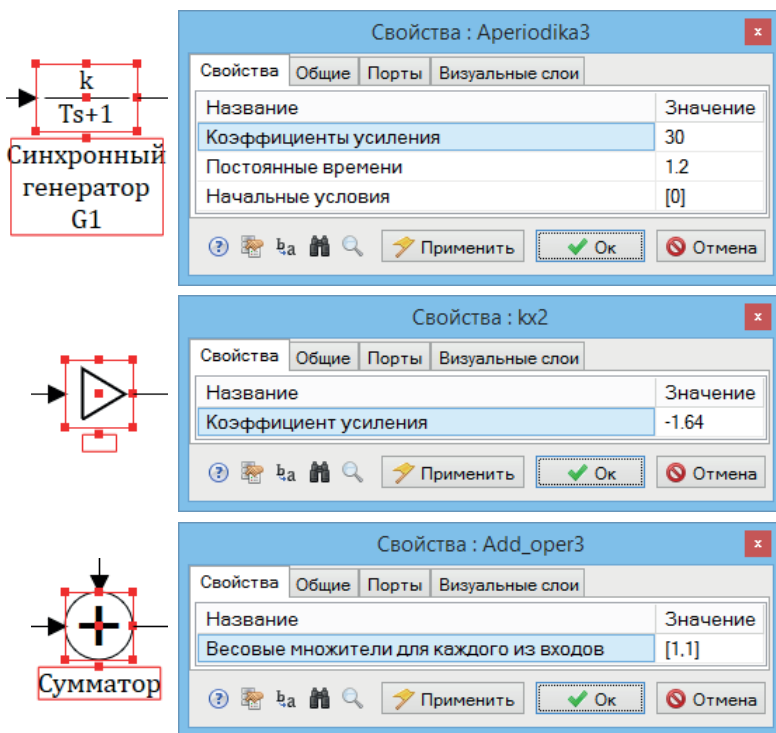


Рис. 3.23. Диалоговые окна с заданными свойствами блоков объекта регулирования

Выделите блок *Временной график* и, используя кнопку  **Свойства**, расположенную на панели инструментов **Редактирование** главного окна, проконтролируйте свойства блока *Временной график*, введенные по умолчанию (см. рис. 3.25).

Снова сохраните задачу, щелкнув *левой* клавишей мыши по кнопке  **Сохранить проект**.

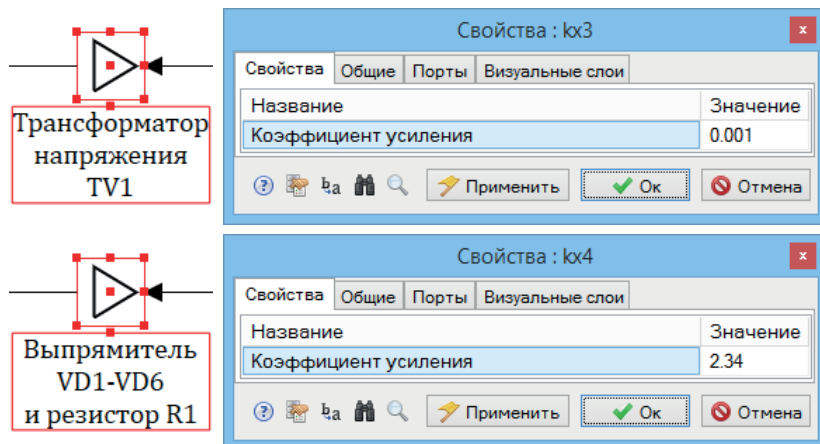


Рис. 3.24. Диалоговые окна с заданными свойствами блоков главной обратной связи

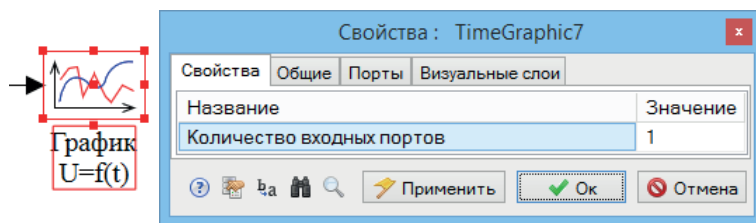


Рис. 3.25. Диалоговое окно с заданными свойствами блока *Временной график*

**Этап 4. Установка параметров интегрирования.** С помощью командной кнопки  **Параметры расчёта** откройте диалоговое окно **Параметры проекта** с активной вкладкой «Параметры расчёта». Задайте численный метод интегрирования «Адаптивный 1». Далее введите значения параметров (без указания их размерностей):

- Конечное время расчёта **20 (с)**;
- Максимальный шаг **0.015 (с)**;
- Минимальный шаг  **$1.5e-4$  (с)**;
- Шаг синхронизации задачи **0.015 (с)**;
- Относительная ошибка  **$1e-3$** ;
- Абсолютная ошибка  **$1e-1$** .

Время интегрирования должно быть не меньше времени регулирования, поэтому оно ориентировочно выбирается на один-два порядка больше, чем наибольшая постоянная времени исходной САР. В процессе моделирования время интегрирования (конечное время расчёта) уточняется с учетом времени подачи возмущающего воздействия.

Отключите синхронизацию расчета с реальным временем на вкладке **Синхронизация** диалогового окна **Параметры проекта** (см. рис. 3.26).

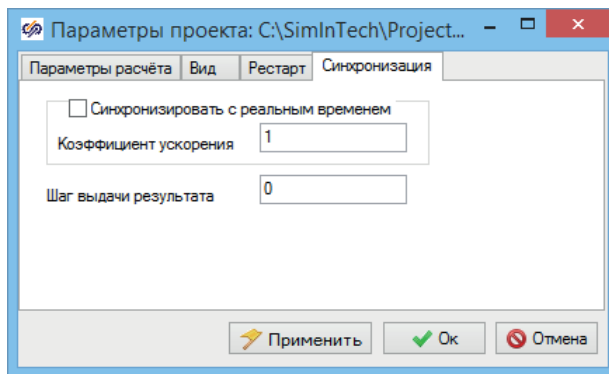


Рис. 3.26. Вкладка **Синхронизация** диалогового окна **Параметры проекта**

Нажмите кнопку **Применить**, закройте диалоговое окно **Параметры проекта**. Снова сохраните задачу (кнопка  **Сохранить проект**).

**Этап 5. Оформление поясняющих подписей.** Выполните оформление структурной схемы моделирования, как это сделано на рис. 3.14.

Переместите курсор под блок *Константа*, ближе к середине блока. Когда появится указатель курсора мыши с вопросительным знаком , сделайте двукратный щелчок *левой* клавишей мыши – появится временное окно для ввода текста. Переместите курсор в это окно, сделайте щелчок *левой* клавишей мыши и затем введите текст подписи данного блока в две строки. Переместите курсор на свободное место в *схемном окне* и сделайте щелчок *левой* клавишей мыши – временное окно закроется, и под блоком появится желаемая подпись «Задающее воздействие».

Редактирование имеющейся подписи блока можно произвести после двукратного щелчка *левой* клавишей мыши по тексту подписи, после которого будет открыто временное поле для ввода текста.

Если подпись блока получилась «некачественной» (с ошибками), снова откройте временное окно для ввода текста и, используя клавиши редактирования (**Backspace**, **Delete** и др.), скорректируйте подпись.

Подпись под блоком можно выполнить также другим способом, используя диалоговое окно блока. Рассмотрим эту возможность на примере блока *Сравнивающее устройство*.

Переместите курсор на блок *Сравнивающее устройство* и сделайте двукратный щелчок *левой* клавишей мыши. В появившемся диалоговом окне блока откройте вкладку **Общие**. В представленном на данной вкладке списке свойств блока *Сравнивающее устройство* найдите диалоговую строку **Подпись блока**. Введите требуемый текст в поле **Значение** данной строки. Текст подписи блока может со-

держат одну или несколько строк. Для ввода следующей строки текста следует использовать сочетание клавиш **Ctrl** и **Enter** на клавиатуре. Для удобства ввода подписи можно воспользоваться редактором текста, окно которого вызывается нажатием кнопки  в поле ввода подписи, при его выделении.

На вкладке **Общие** в диалоговом окне блока можно изменять выравнивание поясняющей подписи (относительно точки привязки или середины блока), ее шрифт (тип, размер, цвет, начертание и др.).

Для того чтобы изменения вступили в силу без закрытия диалогового окна блока, следует нажать кнопку **Применить**. Если подпись блока имеет желаемый вид, то можно закрыть диалоговое окно блока.

Используя вкладку **Общие** в диалоговом окне блока, также можно осуществить точное позиционирование блока и его подписи, изменить цвет фона блока, его размеры и угол поворота и пр.

Заголовки, пояснения, надписи в *схемном окне* выполняются с помощью блока *Заметка* из библиотеки «Субструктуры» (см. п. Ж.5 приложения Ж). При использовании процедуры «перетаскивания» блоков в *схемном окне* следует помнить, что созданные таким образом надписи не связаны с блоками и требуют при необходимости отдельного от блоков перемещения.

Выполнив вышеописанные процедуры для всех блоков, придайте введенной вами структурной схеме вид, близкий к рис. 3.14.

Сохраните изменения, используя кнопку  **Сохранить проект**.

**Этап 6. Открытие *графического окна* и изменение свойств графика.** Выполните двукратный щелчок *левой* клавишей мыши по изображению этого блока в *схемном окне* – откроется *графическое окно* с заголовком «Временной график». Сделайте однократный щелчок *правой* клавишей мыши – появится контекстное меню, в котором сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши по строке «Задать размеры рабочей области окна». В открывшемся диалоговом окне **Размеры окна** введите требуемые значения (рис. 3.27). После ввода этих данных закройте окно **Размеры окна** нажатием на кнопку **ОК**.

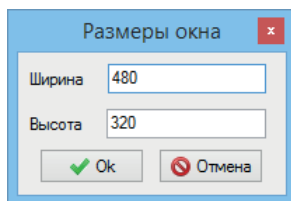
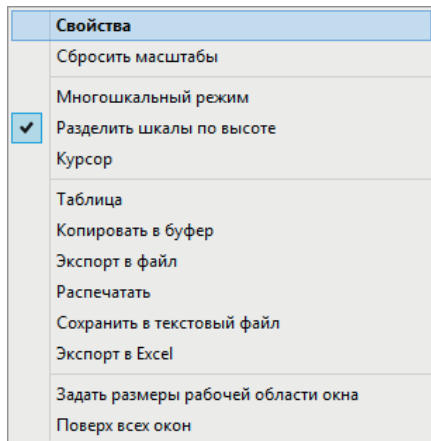


Рис. 3.27. Диалоговое окно  
**Размеры окна**

Рис. 3.28. Контекстное меню *графического окна*

Изменение настроек *графического окна* (заголовка графика, легенды, цвета и стиля для линии и точек, параметров осей координат и др.) производится в специальном диалоговом окне **Свойства графика**. Для его открытия воспользуйтесь контекстным меню *графического окна* (рис. 3.28), вызов которого осуществляется нажатием *правой* клавиши мыши при расположении ее курсора в рабочей области окна.

Сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши по строке «Свойства» – откроется специальное диалоговое окно **Свойства графика** (рис. 3.29). Для увеличения площади координатной плоскости удалите подпись заголовка и измените названия осей в соответствии с рис. 3.29. Остальные настройки *графического окна* следует оставить исходными. Примените изменения настроек и закройте окно **Свойства графика** нажатием на кнопку **ОК**.

Другие настройки *графического окна* установим после моделирования переходных процессов.

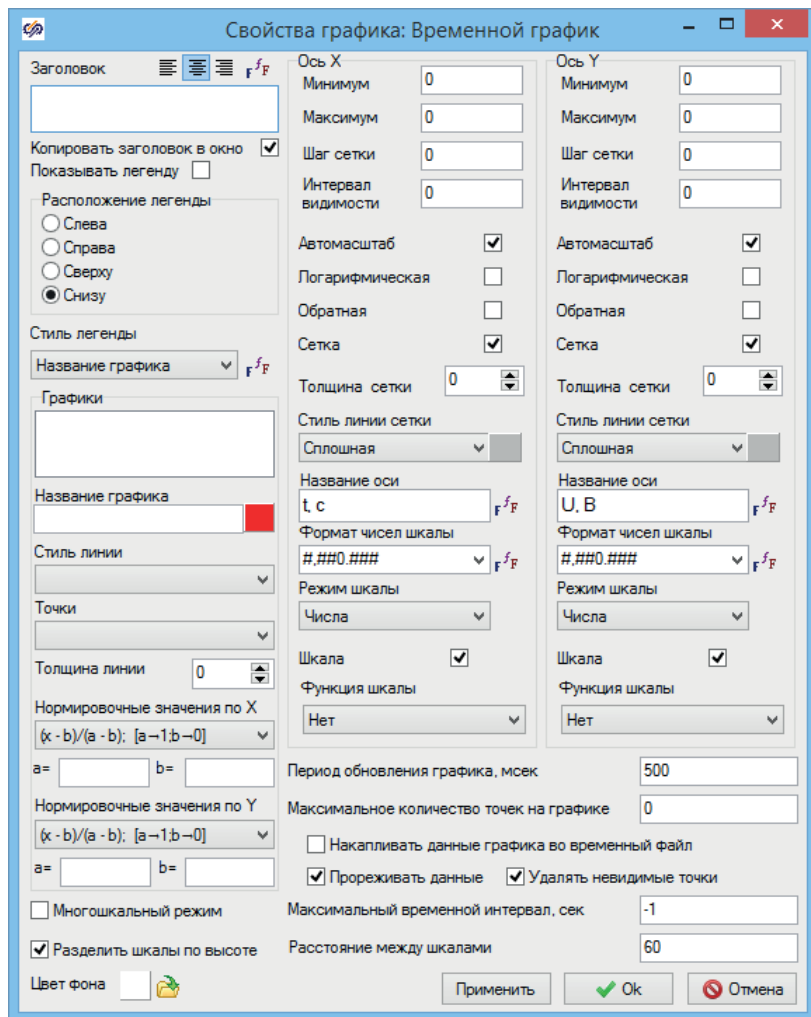
Закройте *графическое окно* блока *Временной график*. Сохраните изменения в файле проекта.

**Этап 7. Моделирование переходных процессов и вариантыные расчеты.** Откройте *графическое окно* двукратным щелчком *левой* клавиши мыши по блоку *Временной график*. Переместите курсор на командную кнопку  **Пуск** и щелкните *левой* клавишей мыши – вы запустили созданную задачу на счет.

В открытом *графическом окне* можно наблюдать за построением графика в процессе расчета (рис. 3.30). После завершения расчета в окне сообщений появится текст: **[Информация]: «Конечное время достигнуто (time=20)»**.

Данные расчета свидетельствуют, что при  $k_1 = 35$  исходная САР неустойчива и переходный процесс расходящийся (рис. 3.30).

Путем подбора величины коэффициента усиления  $k_1$  определено его критическое значение  $k_{1\text{кр}} \approx 28,959$ , при котором САР находится на границе устойчивости, а график переходного процесса имеет вид незатухающих колебаний (см. рис. 3.31).

Рис. 3.29. Специальное диалоговое окно **Свойства графика**

После завершения процесса моделирования можно продолжить настройку *графического окна* блока *Временной график*.

Откройте специальное диалоговое окно **Свойства графика** (рис. 3.29). Переместите курсор в поле ввода заголовка графика (в верхней левой части окна) и введите текст: «График переходного процесса при  $k_1=28,959$ ». Первые три кнопки над этим полем предназначены для «привязки» текста заголовка (☰ – по левому краю, ☷ – по центру, ☶ – по правому краю), четвертая (fF) – для задания параметров шрифта заголовка графика.

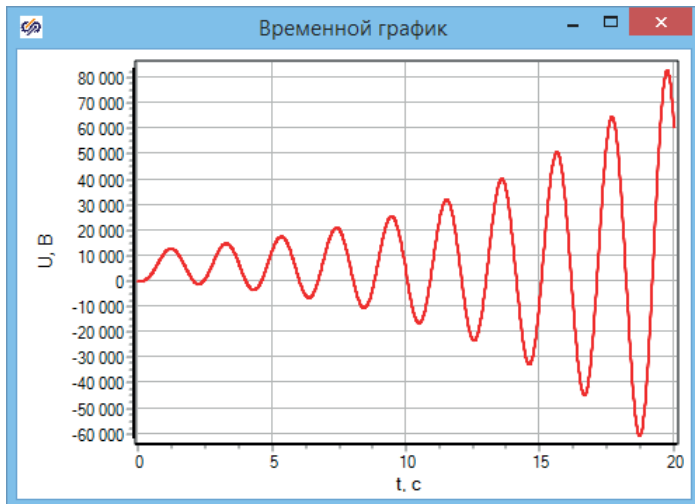


Рис. 3.30. Графическое окно с результатами расчета

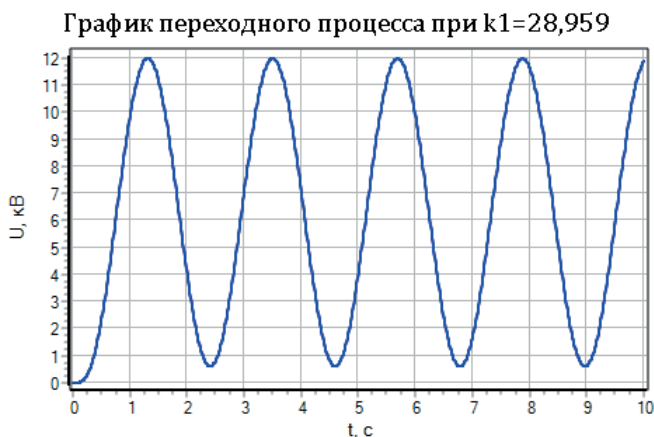


Рис. 3.31. График переходного процесса для САР, находящейся на границе устойчивости ( $k_1 = k_{1\text{кр}} \approx 28,959$ ;  $U_0 = 16,5549$  В; конечное время расчета 10 с)

Измените цвет кривой графика. Для этого нажмите на кнопку **Цвет линии**, расположенную справа от поля ввода названия графика, и в открывшемся диалоговом окне **Цвет** из набора основных цветов выберите синий. Подтвердите изменение цвета нажатием кнопки **ОК**. После закрытия данного окна кнопка **Цвет линии** изменит свой цвет с красного на синий.

Для отображения напряжения в киловольтах установите для оси Y значение масштабного коэффициента  **$a = 1000$**  (для исходной нормировочной функции). После этого откорректируйте название оси Y: **U, кВ**.



Посредством диалогового окна **Свойства графика** можно изменять широкий спектр настроек *графического окна* (см. справочную систему SimInTech и п. Ж.6 приложения Ж).

Результаты проделанных операций представлены на рис. 3.31.

Введите значения  $k_1 = 7,240$  и  $U_0 = 23,2908$  В. Измените название графика на «График переходного процесса при  $k_1=7,240$ ». Повторите процесс моделирования. В результате будет получен переходный процесс, график которого приведен на рис. 3.32.



Рис. 3.32. График переходного процесса САР при  $k_1 = 7,240$

Если необходим анализ численных значений переходного процесса, то можно воспользоваться табличной формой представления результатов расчетов. Для этого вызовите контекстное меню *графического окна* (рис. 3.28) и сделайте однократный щелчок *левой* клавишей мыши по строке «Таблица» (Таблица). Обратный переход также осуществляется через контекстное меню кликом по строке «График» (График).

**Выполнение индивидуального задания.** По заданию преподавателя для САР, рассмотренной в демонстрационном примере, по варианту табл. 3.3 или для одной из САР, приведенных в приложении Б, подготовьте необходимые исходные данные и выполните ее моделирование.

При моделировании САР путем изменения коэффициента усиления электронного усилителя А1 определите его критическое значение, т. е. значение, за пределами которого САР переходит в неустойчивый режим. Затем для значения коэффициента усиления в 4...5 раз меньше критического по переходным функциям определите основные показатели качества системы: статическое отклонение (статическую ошибку), время регулирования, перерегулирование, число перерегулирований и степень затухания. Эти показатели качества следует определить по переходным функциям по задающему и возмущающему воздействиям, используя рекомендации, приведенные в п. 1.3.2.

Таблица 3.3. Параметры передаточных функций САР напряжения синхронного генератора

| Вариант | $k_1$  | $k_2$ | $T_2, \text{с}$ | $b$  | $k_{ио}$ | $T_{ио}, \text{с}$ | $k_{ор}$ | $T_o, \text{с}$ | $k_{ов}, \text{В/А}$ | $k_{во}$ | $k_{по}$ |
|---------|--------|-------|-----------------|------|----------|--------------------|----------|-----------------|----------------------|----------|----------|
| 1       | 1...31 | 2,5   | 0,17            | 1,19 | 1,8      | 0,45               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |
| 2       | 1...29 | 3,0   | 0,19            | 1,21 | 1,6      | 0,40               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |
| 3       | 1...28 | 3,5   | 0,21            | 1,23 | 1,4      | 0,35               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |
| 4       | 1...29 | 4,0   | 0,23            | 1,25 | 1,2      | 0,30               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |
| 5       | 1...31 | 4,5   | 0,25            | 1,27 | 1,0      | 0,25               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |
| 6       | 1...15 | 5,0   | 0,27            | 1,25 | 1,8      | 0,45               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |
| 7       | 1...16 | 5,5   | 0,29            | 1,23 | 1,6      | 0,40               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |
| 8       | 1...17 | 6,0   | 0,31            | 1,21 | 1,4      | 0,35               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |
| 9       | 1...18 | 6,5   | 0,33            | 1,19 | 1,2      | 0,30               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |
| 10      | 1...20 | 7,0   | 0,35            | 1,17 | 1,0      | 0,25               | 30       | 1,2             | 1,64                 | 0,001    | 2,34     |

При максимальном возмущающем воздействии  $I = 688 \text{ А}$  допустимая статическая ошибка для САР напряжения синхронного генератора не должна превышать 10 %.

**Содержание отчета.** В отчете должны быть исходная структурная схема исследуемой САР, структурная схема ее моделирования, графики переходных процессов, полученные в процессе моделирования, расчетные показатели качества системы, а также выводы по работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Каковы принципы построения и работы САР?
2. Поясните понятия динамического и статического режимов САР.
3. Что такое устойчивый и неустойчивый режим работы САР?
4. Что представляют собой динамические и статические характеристики САР?
5. Что такое передаточная функция элемента (объекта регулирования) САР?
6. Как составляются функциональные и структурные схемы САР?
7. Что такое переходная функция элемента и САР?
8. Дайте определение понятия качества САР. Какова сущность оценки качества САР по переходным функциям (кривым разгона)?
9. Какой вид могут иметь переходные функции в реальных САР?
10. Что называют статическим отклонением?
11. Что такое время регулирования?
12. Что представляет собой перерегулирование?
13. Что такое число перерегулирований?
14. Что называют логарифмическим декрементом затухания?
15. Что такое критический коэффициент усиления усилительного органа САР?
16. Что представляет собой типовое (элементарное) звено? Приведите классификацию типовых звеньев.
17. Что такое математическая модель САР? Каковы формы представления математических моделей САР?
18. В чем сущность математического моделирования САР с помощью ПО Sim-

InTech?

19. Каков порядок составления структурной схемы моделирования САР?
20. Как выбирают шаг интегрирования?
21. Каким принимают время интегрирования?
22. Как задают шаг вывода результатов?

## Работа 3. Исследование корректирующих элементов САР

### Цели работы:

- освоить отдельные понятия и вопросы теории автоматического регулирования (корректирующие элементы, структурно-неустойчивые системы, жесткие и гибкие обратные связи в качестве корректирующих элементов, введение в закон регулирования производных и интегралов, применение астатических звеньев в качестве корректирующих элементов);
- закрепить навыки работы в среде SimInTech.

**Теоретический материал, необходимый для выполнения работы.** Следует знать принципы и методику моделирования САР с помощью ПО SimInTech (см. раздел 2), а также понятия коррекции САР и законы регулирования (см. раздел 1, п. 1.3.3).

---

**Примечание:** в лабораторной работе 2 для моделирования САР в качестве входных воздействий использовались ступенчатые воздействия в поименованных физических величинах. В теории автоматического регулирования при исследованиях САР, наряду с таким способом задания входных воздействий, применяют входные воздействия в виде единичных ступенчатых сигналов [6–11, 13–15]. Он пригоден для моделей САР в виде структурных схем с единичной обратной связью. В таком случае все переменные САР рассматриваются как относительные безразмерные величины: как отношение фактического значения величины к ее номинальному значению, соответствующему заданному значению регулируемой величины. В данной работе целесообразно использовать способ задания входных воздействий в виде единичных ступенчатых входных сигналов.

---

**Объект исследования.** В качестве объекта исследования взята структурная модель САР напряжения синхронного генератора (рис. 2.4, п. 2.1). Для удобства исследования различных корректирующих элементов (устройств) на основе схемы (рис. 3.14, работа 2) подготовлена универсальная структурная схема (рис. 3.33), позволяющая моделировать различные варианты коррекции САР.

Вариация подключения различных корректирующих элементов в схеме, представленной на рис. 3.33, осуществляется с помощью блоков *Ключ ручной управляемый* (блоки 13–15, 20 и 21).

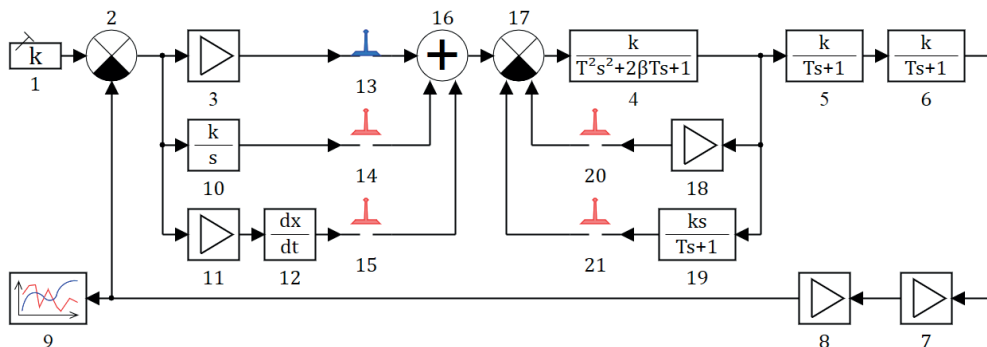
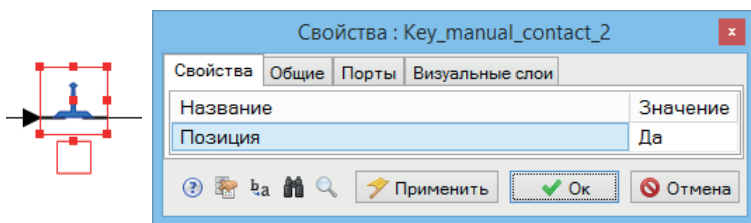
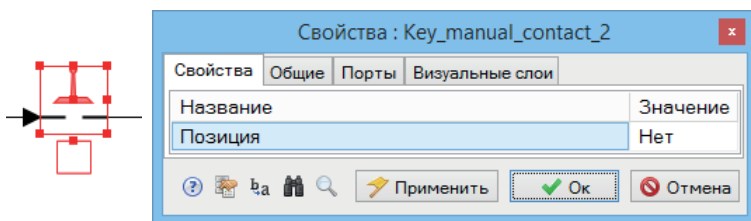


Рис. 3.33. Универсальная структурная схема моделирования САР



а



б

Рис. 3.34. Значения свойства *Позиция* блока *Ключ ручной управляемый*, соответствующие замкнутому (а) и разомкнутому (б) состояниям ключа

Исходное состояние ключа (до инициализации проекта) задается свойством *Позиция* блока *Ключ ручной управляемый*. Замкнутому ключу соответствует значение **Да** (рис. 3.34а) свойства *Позиция*, разомкнутому – **Нет** (рис. 3.34б). Блок *Ключ ручной управляемый* является «интерактивным», т. е. состоянием ключа можно управлять в процессе расчета (моделирования) путем однократного нажатия левой кнопкой мыши по блоку.

При формировании универсальной структурной модели САР (рис. 3.33) все необходимые состояния ключей должны задаваться не в процессе моделирования, а при подготовке данных для конкретного варианта исследуемого корректирующего

щего устройства путем изменения свойства *Позиция* блока *Ключ ручной управляемый* (см. рис. 3.34).

При выполнении работы используйте числовые значения параметров элементов САР (рис. 3.14) из табл. 3.3 по варианту, заданному преподавателем.

### Последовательность выполнения лабораторной работы:

- введите в *схемное окно* проекта в среде SimInTech универсальную структурную схему, представленную на рис. 3.33 (исходное положение ключей: ключ 13 включен, остальные – отключены), выполните моделирование исходной САР напряжения синхронного генератора (рис. 3.14) по заданному варианту табл. 3.3 на основе подготовленных исходных данных в лабораторной работе 2 при отсутствии возмущения ( $I = 0$ ) и  $U_0 = 1(t)$  и проанализируйте полученные результаты моделирования;
- с помощью моделирования САР определите критический коэффициент усиления  $k_{1\text{КР}}$  электронного усилителя  $A1$  и период  $T_{\text{КР}}$  незатухающих гармонических колебаний;
- оцените влияние величины коэффициента усиления  $k_1$  (при  $k_1 \leq k_{1\text{КР}}$ ) на качественные показатели процесса регулирования САР и на основе анализа результатов моделирования определите практическую целесообразность использования *П-закона регулирования* в рассматриваемой САР;
- исследуйте влияние различных методов коррекции на процессы регулирования в САР, выполнив представленные ниже этапы 1–5.

**Этап 1. Введение в закон регулирования производной** от сигнала рассогласования (использование *ПД-закона регулирования*) посредством включения в исходную САР (рис. 2.2) корректирующего элемента (рис. 3.35) в виде идеального дифференцирующего звена на основе операционного усилителя с использованием инвертирующего входа (см. табл. 1.1).

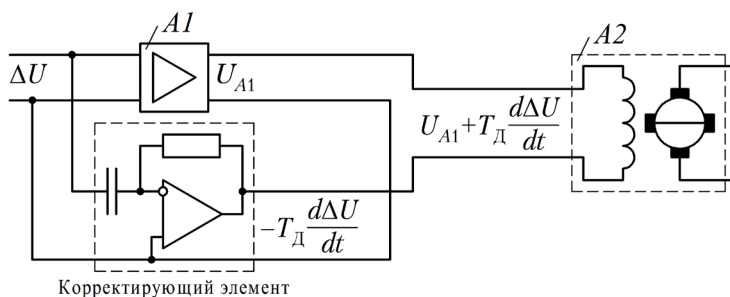


Рис. 3.35. Фрагмент принципиальной схемы САР напряжения синхронного генератора с корректирующим элементом в виде идеального дифференцирующего звена

Структурная схема САР с *ПД-законом регулирования* приведена на рис. 3.36, где:  $k_{\text{П}} = k_1$  – передаточный коэффициент пропорционального звена;  $k_{\text{Д}}$  – передаточный коэффициент дифференцирующего звена, равный постоянной времени дифференцирования  $T_{\text{Д}}$ . Для моделирования данной САР в универсальной схеме,

изображенной на рис. 3.33, ключи 13 и 15 должны быть включены, остальные – отключены (см. рис. 3.37).

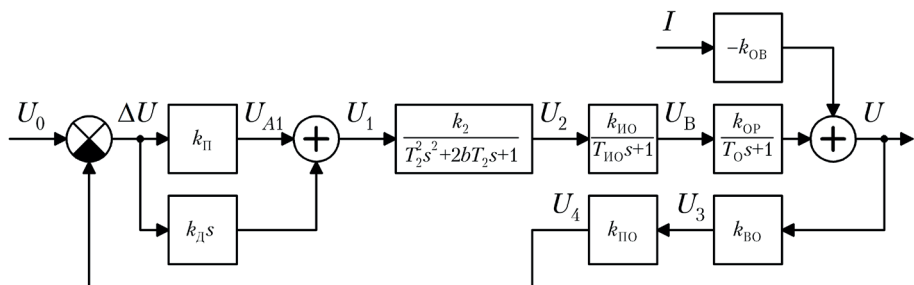


Рис. 3.36. Структурная схема САР с ПД-законом регулирования

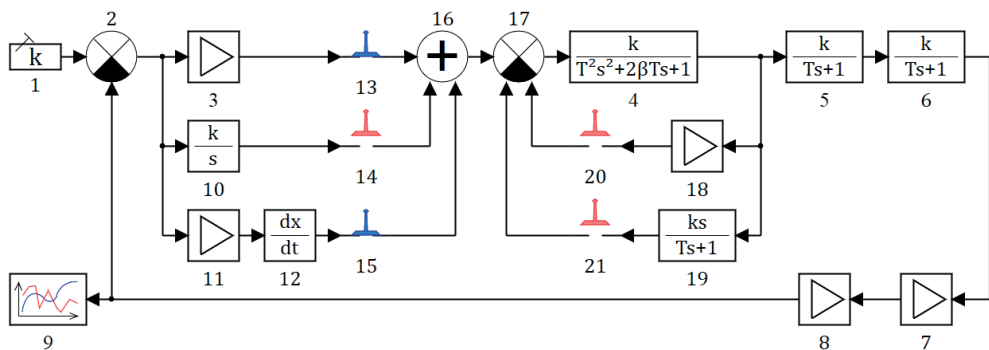


Рис. 3.37. Универсальная структурная схема моделирования САР с ПД-законом регулирования

Целевое назначение данного этапа: определить влияние коэффициента  $k_d$  на процесс регулирования САР при его вариациях. Для достижения этой цели выполните следующее:

- используя метод Циглера-Никольса (п. 1.3.3), определите стартовое значение коэффициента  $k_d$  (от которого в процессе моделирования следует варьировать его величиной);
- приняв  $k_P = 0,6 k_{Пкр}$  и изменяя  $k_d$  (увеличивая или уменьшая его от стартового значения), добейтесь наилучших показателей процесса регулирования (обратите внимание на величину статической ошибки);
- приняв  $k_P = 1,1 k_{Пкр}$  и изменяя  $k_d$ , добейтесь наилучших показателей процесса регулирования, выполните сравнительную оценку статических ошибок для данного и предыдущего случаев.

**Этап 2. Введение в закон регулирования интеграла** от сигнала рассогласования (использование ПИИ-закона регулирования). Для этого используйте коррек-

тирующий элемент (рис. 3.38) – интегратор на основе операционного усилителя с инвертирующим входом (см. табл. 1.1), включенный в исходную САР (рис. 2.2).

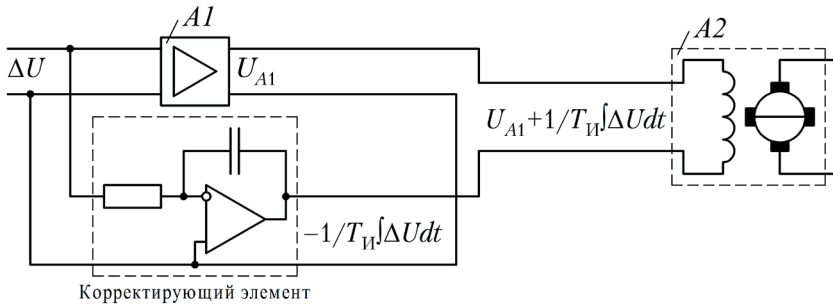


Рис. 3.38. Фрагмент принципиальной схемы САР напряжения синхронного генератора с корректирующим элементом в виде идеального интегрирующего звена

Структурная схема САР с *ПИ*-законом регулирования приведена на рис. 3.39, где  $k_{\text{И}}$  – передаточный коэффициент интегрирующего звена, определяемый через постоянную времени интегрирования  $T_{\text{Д}}$  ( $k_{\text{И}} = 1/T_{\text{И}}$ ). Для моделирования данной САР в универсальной схеме, изображенной на рис. 3.33, ключи 13 и 14 должны быть включены, остальные – отключены (см. рис. 3.40).

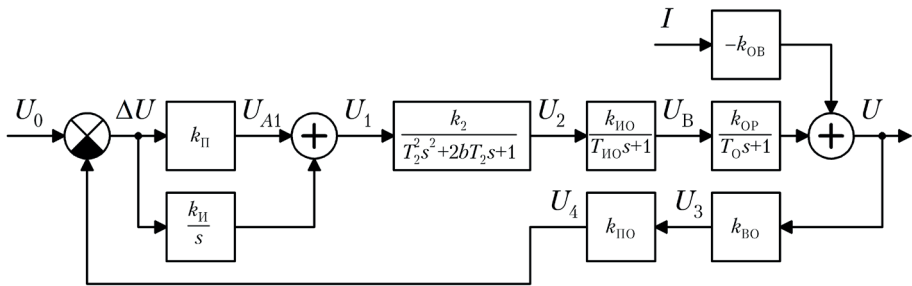


Рис. 3.39. Структурная схема САР с *ПИ*-законом регулирования

Целевое назначение данного этапа: определить влияние коэффициента  $k_{\text{И}}$  на процесс регулирования САР при его вариациях. Для достижения этой цели выполните следующее:

- используя метод Циглера-Никольса (п. 1.3.3), определите стартовое значение коэффициента  $k_{\text{И}}$ ;
- приняв  $k_{\text{П}} = 0,45 k_{\text{ПКР}} = \text{const}$  и изменяя  $k_{\text{И}}$  (увеличивая или уменьшая его от стартового значения), добейтесь наилучших из возможных показателей качества процесса регулирования (обратите внимание на статическую ошибку и время регулирования);

- исключите из схемы (рис. 3.39) пропорциональную составляющую *ПИИ*-закона регулирования, приняв  $k_{\text{П}} = 0$  или отключив ключ 14 (рис. 3.40), исследуйте переходные процессы САР при *И*-законе регулирования, варьируя коэффициентом  $k_{\text{И}}$  от его стартового значения (обратите внимание на статическую ошибку и время регулирования).

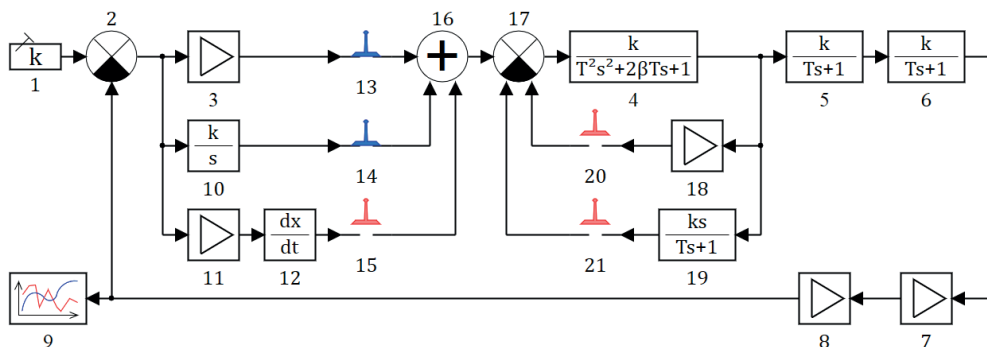


Рис. 3.40. Универсальная структурная схема моделирования САР с ПИ-законом регулирования

**Этап 3. Введение в закон регулирования производной и интеграла** от сигнала рассогласования (применение *ПИД*-закона регулирования) посредством совместного использования корректирующих элементов на основе операционных усилителей, реализующих идеальное дифференцирующее и интегрирующее звенья по аналогии с этапами 1 и 2 (рис. 3.41).

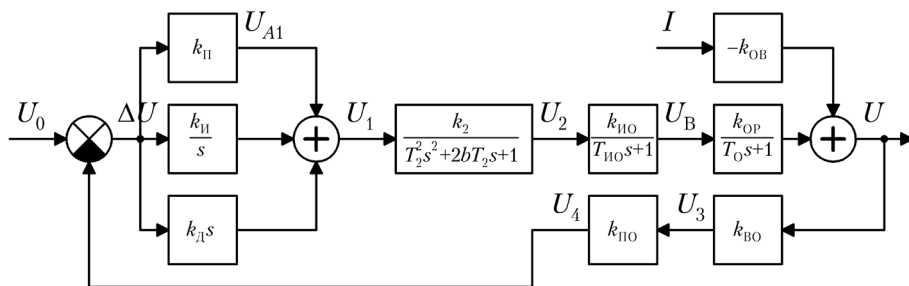


Рис. 3.41. Структурная схема САР с ПИД-законом регулирования

Для моделирования САР с *ПИД*-законом регулирования необходимо, чтобы ключи 13, 14 и 15 были включены, остальные – отключены (см. рис. 3.42).

Целевое назначение данного этапа: определить совместное влияние коэффициентов  $k_{\text{И}}$  и  $k_{\text{Д}}$  на процесс регулирования САР при их вариациях. Для достижения данной цели выполните следующее:



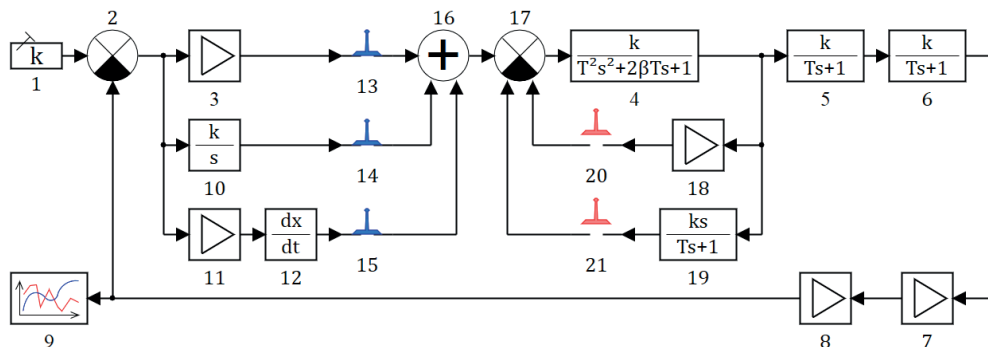


Рис. 3.42. Универсальная структурная схема моделирования САР с ПИД-законом регулирования

- на основе метода Циглера-Никольса (п. 1.3.3) вычислите стартовые значения  $k_I$  и  $k_D$ ;
- приняв  $k_P = 0,6 k_{P_{кр}}$  и  $k_{P_{кр}} = \text{const}$  и варьируя  $k_I$  и  $k_D$ , добейтесь следующих показателей качества процесса регулирования:
  - статическая ошибка  $\Delta U_{СТ} \leq 5\%$ ;
  - время регулирования при пятипроцентной «трубке»  $t_p \leq 5$  с;
  - перерегулирование  $\sigma \leq 20\%$ ;
  - количество перерегулирований  $n \leq 2$ ;
  - степень затухания  $\phi \geq 75\%$ .

**Этап 4. Использование жесткой отрицательной обратной связи (рис. 3.43).**

Такой корректирующий элемент представляет собой безынерционное (пропорциональное, идеальное) звено с передаточной функцией

$$W_{K1}(s) = k_{OC1}, \quad (3.2)$$

где  $k_{OC1}$  – коэффициент обратной связи, который зависит от положения подвижного контакта резистора R2: в верхнем крайнем положении  $k_{OC1} = 1$ , в нижнем –  $k_{OC1} = 0$ .

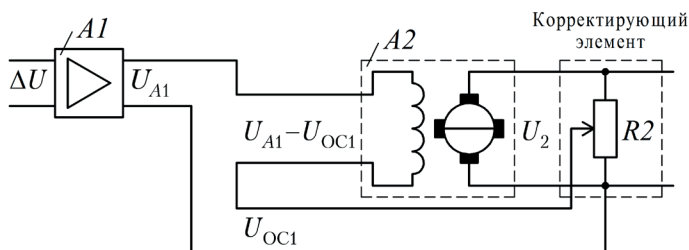


Рис. 3.43. Фрагмент принципиальной схемы САР напряжения синхронного генератора с корректирующим элементом в виде жесткой отрицательной обратной связи

Структурная схема скорректированной САР показана на рис. 3.44. Положение ключей (рис. 3.45) следующее: ключи 13, 20 включены, остальные – отключены.



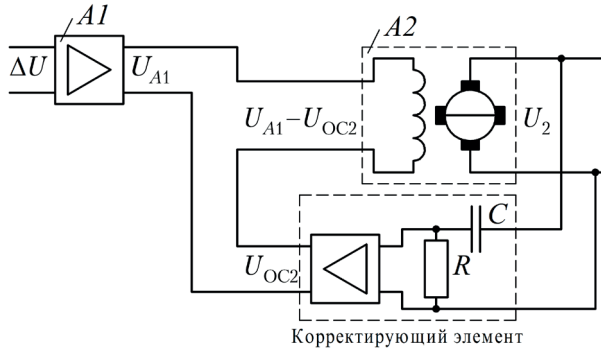


Рис. 3.46. Фрагмент принципиальной схемы САР напряжения синхронного генератора с корректирующим элементом в виде гибкой отрицательной обратной связи

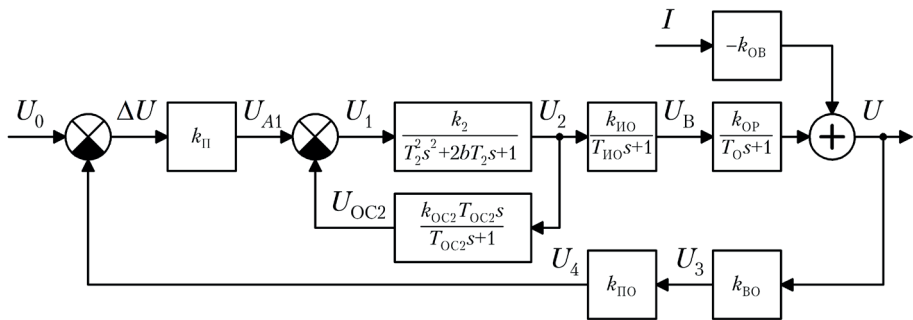


Рис. 3.47. Структурная схема САР с корректирующим элементом в виде гибкой отрицательной обратной связи

Для моделирования данного варианта коррекции САР (рис. 3.47) приведите универсальную схему моделирования в соответствии с рис. 3.48 (ключи 13, 21 включены, остальные – отключены).

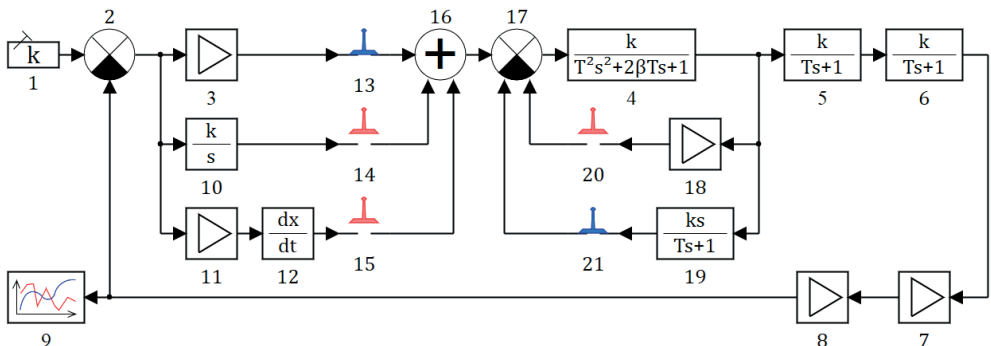


Рис. 3.48. Универсальная структурная схема моделирования САР с корректирующим элементом в виде гибкой отрицательной обратной связи

В процессе выполнения работы используйте рекомендации, приведенные в разделе 2, и практические примеры поэтапной работы с SimInTech, рассмотренные в лабораторных работах 1 и 2.

**Содержание отчета.** В отчете должны быть исходная структурная схема исследуемой САР, универсальная структурная схема моделирования, графики переходных процессов, построенные по результатам моделирования, необходимые расчеты и результаты обработки графиков, а также содержательные выводы по работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Что представляет собой структурно устойчивая САР?
2. Что такое структурно неустойчивая САР?
3. Какую обратную связь называют жесткой и какую – гибкой?
4. Изобразите схему пассивного реального дифференцирующего элемента на основе резистора и конденсатора.
5. Изобразите схему активного реального RC-дифференцирующего элемента.
6. Изобразите схему пассивного дифференцирующего элемента на основе трансформатора.
7. Изобразите схему активного дифференцирующего элемента на основе трансформатора.
8. Какой вид имеет передаточная функция идеального дифференцирующего звена?
9. Какой вид имеет передаточная функция реального дифференцирующего звена?
10. Что представляет собой пропорционально-дифференциальный регулятор (*ПД-регулятор*)?
11. Что такое пропорционально-интегральный регулятор (*ПИ-регулятор*)?
12. Что такое пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (*ПИД-регулятор*)?
13. Каким образом статическую САР можно преобразовать в астатическую? Что такое интегральный регулятор (*И-регулятор*)?
14. Как определить параметры расчета для моделирования САР в среде SimInTech: конечное время расчета; минимальный и максимальный шаги интегрирования; шаг вывода результатов расчета?
15. Какова сущность эмпирического метода синтеза типовых законов регулирования Циглера-Никольса?

## Работа 4. Параметрическая оптимизация САР

### Цели работы:

- освоить отдельные понятия и вопросы теории автоматического регулирования (оптимальное управление, оптимальный переходный процесс, критерий оптимальности, интегральные методы оценки качества систем);

- закрепить навыки работы с программным обеспечением SimInTech и освоить с его помощью методику параметрической оптимизации САР на примерах линейных систем.

**Теоретический материал, необходимый для выполнения работы.** Следует знать особенности параметрической оптимизации САР (см. п. 1.3.4), функциональные возможности ПО SimInTech и основные этапы работы в его среде (см. п. 2.6, лабораторные работы 1 и 2).

**Последовательность выполнения лабораторной работы:**

- освоить методику параметрической оптимизации САР с помощью ПО SimInTech на базе демонстрационного примера;
- по заданному варианту индивидуального задания самостоятельно оптимизировать САР посредством компьютерного моделирования.

**Демонстрационный пример.** Для демонстрационного примера взята САР с интегральным регулятором, структурные схемы которой показаны на рис. 3.49 и 3.50.

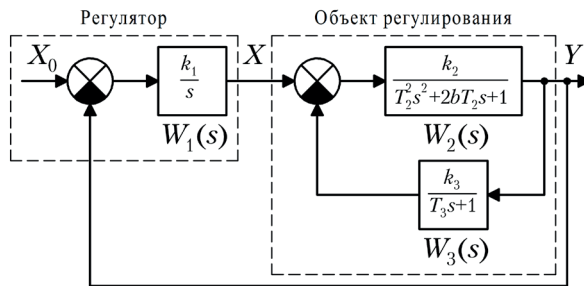


Рис. 3.49. Структурная схема САР с И-регулятором

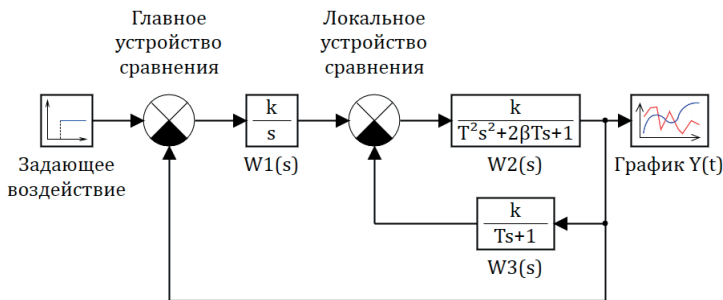


Рис. 3.50. Структурная схема моделирования САР с И-регулятором

Объект регулирования описывается двумя передаточными функциями  $W_2(s)$  и  $W_3(s)$ , параметры которых имеют следующие значения:  $k_2 = 1$ ;  $T_2 = 1$  с;  $b = 0,5$ ;  $k_3 = 0,6$ ;  $T_3 = 5$  с.

Коэффициент усиления (передачи)  $k_1$  интегрального регулятора является варьируемой величиной, оптимальное значение которого необходимо определить в процессе моделирования САР при нулевых начальных условиях и ступенчатом входном воздействии  $X_0(t) = 0,8 \cdot 1(t)$  с учетом следующих ограничений:

- заданное значение отклонения  $\Delta$  регулируемой величины  $Y$  должно быть не более 5%, т. е.  $\Delta = \pm 0,8 \cdot 0,05 = \pm 0,04$ ;
- время переходного процесса не более 17 с;
- перерегулирования не должно быть (т. е.  $Y_{\max} \leq 0,8$ ).

Исходные данные для моделирования САР (рис. 3.49) следующие:

- структурная схема моделирования в среде SimInTech (рис. 3.50);
- максимальный шаг интегрирования 0,1 с;
- минимальный шаг интегрирования 0,001 с;
- конечное время расчета 40 с;
- шаг синхронизации задачи 0,1 с;
- относительная ошибка  $1e - 3$ ;
- абсолютная ошибка  $1e - 4$ .

Поэтапно выполнить все процедуры, рекомендованные в лабораторных работах 1 и 2, а также дополнительные этапы, необходимые при работе с блоком *Оптимизация параметров модели* в среде SimInTech (см. далее).

При дальнейшем изложении методики и последовательности выполнения демонстрационно-ознакомительного примера можно было бы ограничиться только этапами, выполнение которых обязательно для оптимизации варьируемого параметра, не рассматривая изученных ранее этапов ввода структурной схемы, исходных данных и непосредственно моделирования переходных процессов. Однако с целью закрепления навыков выполнения этих этапов их описание приводится повторно в кратком изложении.

**Этап 1. Заполнение схемного окна необходимыми типовыми блоками.** Создайте новый файл проекта с помощью кнопки  **Новый проект**. Сохраните созданный файл проекта на носителе информации ПК, используя для этого кнопку  **Сохранить проект**. При этом присвойте имя файлу типа \*.prt, например «Оптимизация 1». В результате вашему проекту (файлу) будет присвоено имя **Оптимизация 1.prt**.

Переместите курсор на вкладку **Источники палитры компонентов** и перенесите с помощью мыши блок *Ступенька* в чистое схемное окно. Инициализируйте библиотеку «Операторы» (одноименная вкладка *палитры компонентов*). Из нее в свободное место *схемного окна* перенесите два блока *Сравнивающее устройство*, необходимых для создания главной и локальной обратных связей. Перенесите в свободное место *схемного окна* по одному блоку *Интегратор*, *Колебательное звено* и *Инерционное звено 1-го порядка* из библиотеки «Динамические».

Переместите курсор на вкладку **Данные** и из данной библиотеки типовых блоков перенесите блок *Временной график* в *схемное окно* примерно на желаемое место.

**Этап 2. Позиционирование блоков, проведение линий связи на структурной схеме.** Для удобства позиционирования блоков и проведения линий связи между ними воспользуйтесь опцией **Сетка**.

При создании структурной схемы моделирования САР в среде SimInTech с целью рационального использования рабочей области *схемного окна* или улучшения удобочитаемости схемы может потребоваться изменение исходной ориентации блоков и расположения их входов и выходов.

Посредством контекстного меню для блока *Инерционное звено 1-го порядка* выполните команду **Повернуть порты на 180 градусов** (см. рис. 3.51).

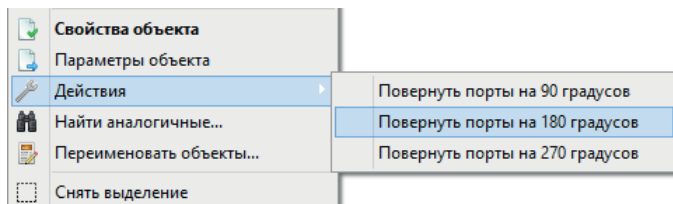


Рис. 3.51. Команды контекстного меню для поворота портов блоков, выделенных в *схемном окне*

Уточните расположение блоков в цепи структурной схемы, используя процедуру перетаскивания блоков в *схемном окне*, и проведите линии связи.

Для поворота линии связи при ее проведении необходимо выполнить щелчок *левой* клавишей мыши в точке поворота и продолжить проведение линии связи в новом направлении.

При создании ответвления линии связи переместите курсор на линию связи, нажмите на клавиатуре клавишу **Alt** и, не отпуская ее, сделайте щелчок *левой* клавишей мыши (на линии связи появится узловая точка); отпустив клавишу **Alt**, проведите линию связи ко входу или к выходу блока и сделайте щелчок *левой* клавишей мыши. Данное ответвление также можно выполнить проведением линии связи от входа или выхода блока к существующей линии связи. Переместите курсор ко входу блока и сделайте щелчок *левой* клавишей мыши, подведите курсор к существующей линии связи в требуемом месте и, когда он войдет в область притяжения, сделайте щелчок *левой* клавишей мыши. В результате появится требуемое ответвление.

Редактирование линии связи можно осуществить через команды контекстного меню (см. рис. 3.18).

При необходимости измените размеры *схемного окна* стандартными средствами Windows или с помощью команд меню окна **Масштаб**.

Нелишним будет периодическое сохранение изменений в проекте, например с помощью командной кнопки  **Сохранить проект**. Прodelайте эту операцию на данной стадии разработки проекта.

**Этап 3. Ввод параметров структурной схемы.** Осуществите ввод свойств блоков структурной схемы моделирования, представленной на рис. 3.50. Для блока *Интегратор* введите «прикидочное» значение коэффициента усиления, равное 1. При задании свойств блоков можно ориентироваться на рис. 3.52–3.55.

Свойства блоков *Сравнивающее устройство* и *Временной график* не требуют редактирования.

При вводе числовых значений свойств блоков следует помнить, что разделителем целой и дробной частей числа в среде SimInTech является точка.

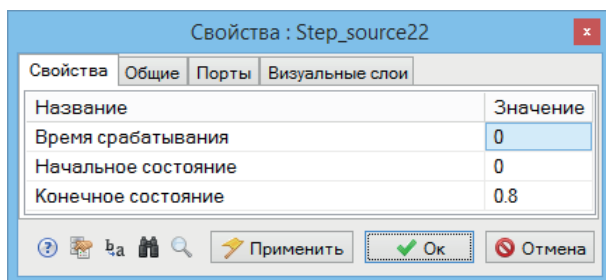


Рис. 3.52. Диалоговое окно с заданными свойствами блока «Задающее воздействие»

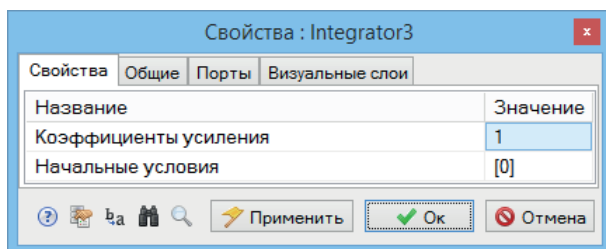


Рис. 3.53. Диалоговое окно с заданными свойствами блока «W1(s)»

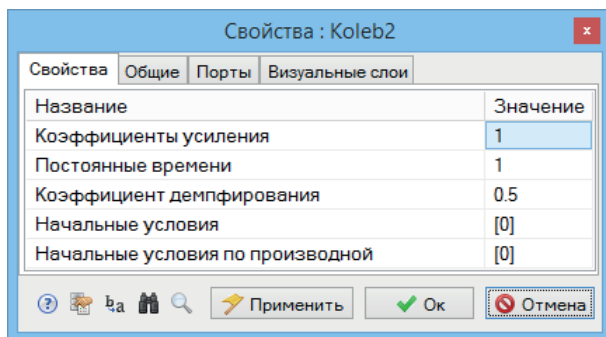


Рис. 3.54. Диалоговое окно с заданными свойствами блока «W2(s)»



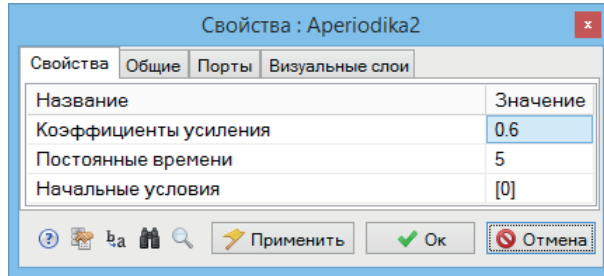


Рис. 3.55. Диалоговое окно с заданными свойствами блока «W3(s)»

После ввода свойств для всех блоков выполните сохранение проекта.

**Этап 4. Установка параметров интегрирования.** Откройте диалоговое окно **Параметры проекта** с помощью командной кнопки **Параметры расчёта**. На вкладке **Параметры расчёта** выберите численный метод интегрирования «RK45 (модифицированный)». Далее введите значения параметров (без указания их размерностей):

- Конечное время расчёта **40** (с);
- Максимальный шаг **0.1** (с);
- Минимальный шаг **0.001** (с);
- Шаг синхронизации задачи **0.1** (с);
- Относительная ошибка **1e-3**;
- Абсолютная ошибка **1e-4**.

Отключите синхронизацию расчета с реальным временем на вкладке **Синхронизация** диалогового окна **Параметры проекта** (см. рис. 3.26). Закройте диалоговое окно, щелкнув *левой* клавишей мыши по кнопке **ОК**. Снова выполните сохранение файла проекта.

**Этап 5. Оформление поясняющих подписей.** Выполните оформление структурной схемы моделирования в соответствии с рис. 3.50.

Чтобы изменить расположение подписи блока, необходимо изменить позиционирование точки привязки для нее, которая находится над текстом подписи (см. рис. 3.56). Эта операция возможна только после ввода текста подписи. Рассмотрим данную процедуру для блока «Главное устройство сравнения».

Переместите курсор под блок *Сравнивающее устройство* (расположенный после блока *Ступенька*), ближе к середине блока. Когда появится указатель курсора мыши с вопросительным знаком , сделайте двукратный щелчок *левой* клавишей мыши – появится временное окно для ввода текста. Переместите курсор в это окно, сделайте щелчок *левой* клавишей мыши и затем введите текст подписи «Главное устройство сравнения» в три строки. Переместите курсор за пределы временного окна для ввода текста и сделайте щелчок *левой* клавишей мыши – временное окно закроется, и под блоком появится желаемая подпись (см. рис. 3.56a).

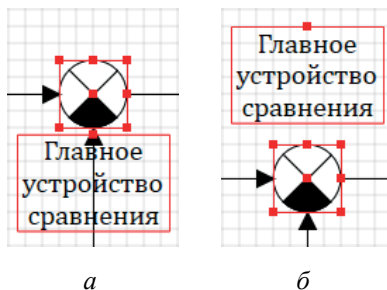


Рис. 3.56. Изменение расположения подписи блока «Главное устройство сравнения»:  
а – исходная позиция; б – положение после перемещения

Выделите блок «Главное устройство сравнения», кликнув *левой* клавишей мыши по нему или имеющей подписи. Переместите курсор к точке привязки подписи, которая расположена над текстом подписи по центру, в области второго входного порта (рис. 3.56а). Когда указатель курсора мыши примет вид  или , нажмите *левую* клавишу мыши и, удерживая ее, перетащите подпись в желаемое место над блоком. Отпустите *левую* клавишу мыши – расположение подписи блока будет зафиксировано (рис. 3.56б).

Для удобства позиционирования подписей блока рекомендуется использование опции **Сетка** с включенной привязкой по сетке. Точное задание положения подписи блока возможно путем изменения значений координат точки привязки. Для этого на вкладке **Общие** в диалоговом окне блока в строке «Координаты точек» необходимо ввести требуемые значения последней паре координат. Так, для блока *Ступенька*, центр которого расположен в начале координат рабочей области *схемного окна*, запись в строке «Координаты точек» имеет следующий вид:  $[(0, 0), (16, 0), (0, -16), (0, 19.2)]$ , где  $(0, 19.2)$  – исходные координаты точки привязки подписи блока.

После оформления всех поясняющих надписей сделайте очередное сохранение проекта.

**Этап 6. Открытие графического окна и изменение свойств графика.** Выполните двукратный щелчок *левой* клавишей мыши по изображению блока *Временной график*. С помощью команды **Задать размеры рабочей области окна** контекстного меню установите открывшемуся *графическому окну* заданные размеры: ширина – 480; высота – 240.

Через специальное диалоговое окно **Свойства графика**, вызов которого осуществляется посредством контекстного меню, измените следующие настройки *графического окна*:

- удалите заголовок графика;
- установите синий цвет линии для графика;
- введите новые названия осей: ось X – **Время t, с**; ось Y – **Значение величины Y**.

Закройте окно **Свойства графика** с помощью кнопки **ОК**. Сохраните изменения в файле проекта.

**Этап 7. Моделирование переходных процессов и варианты расчеты.** Кнопкой  **Пуск** запустите созданную задачу на счет. Полученная кривая разгона в *графическом окне* (рис. 3.57а) показывает, что для САР при  $k_1 = 1$  переходный процесс является расходящимся, т. е. исходная САР неустойчива.

Измените значение  $k_1$  на 0,2. Повторите процесс моделирования. Полученные данные свидетельствуют, что хотя перерегулирование и отсутствует, но время переходного процесса значительно превышает 17 с (рис. 3.57б).

Снова измените значение  $k_1$  на 0,4. Повторите вышеописанные процедуры. Анализ полученных данных показывает, что при  $k_1 = 0,4$  получены требуемые характеристики переходного процесса: перерегулирование – отсутствует; время входа в 5% «трубку» не превышает 17 с (рис. 3.57в).

Выполните сохранение проекта с последними изменениями. Затем создайте копию файла данного проекта с новым именем **Оптимизация 2.prt**, используя команду **Сохранить проект как...** из меню **Файл**. Для последующего выполнения лабораторной используйте проект **Оптимизация 2**.

**Параметрическая оптимизация САР.** При параметрической оптимизации САР в среде SimInTech необходимо выполнить следующие этапы:

- задать варьируемый(е) параметр(ы) как *глобальную(ые)* переменную(ые) (точнее – сигнал проекта), используя соответствующие интерфейсные процедуры;
- сформировать локальные критерии качества (оптимизации), которые необходимы для решения основной задачи оптимизации;
- поместить на схему блок *Оптимизация параметров модели* и ввести требуемые значения его настроек:
  - имена варьируемых параметров, пределы их изменения и погрешность расчета;
  - имена локальных критериев и допустимые пределы их значений;
  - расчетный метод оптимизации и его настройки;
- запустить задачу на счет и ожидать результатов.

Описанные выше этапы в конспективной форме подробно будут рассмотрены далее по тексту.

Для демонстрационного примера выполните параметрическую оптимизацию в последовательности, приведенной ниже.

**Задание варьируемого параметра как глобального сигнала проекта.** Процедура задания *глобальных* сигналов выполняется в специальном окне *редактора сигналов проекта*. Для вызова данного окна в меню **Сервис** необходимо выбрать пункт **Сигналы...** (рис. 3.58).

Список сигналов проекта позволяет создать список переменных, которые используются в процессе моделирования во всех субмоделях проекта и обеспечивая доступ к данным переменным по их имени. Переменные данного списка (сигналы) могут быть использованы в качестве свойств блоков структурной схемы моделирования, чем мы и воспользуемся.

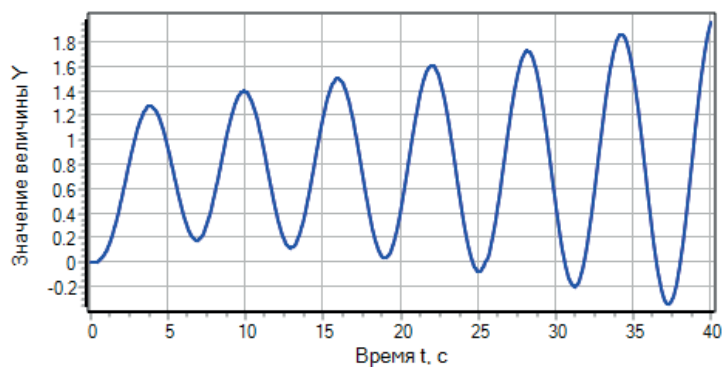
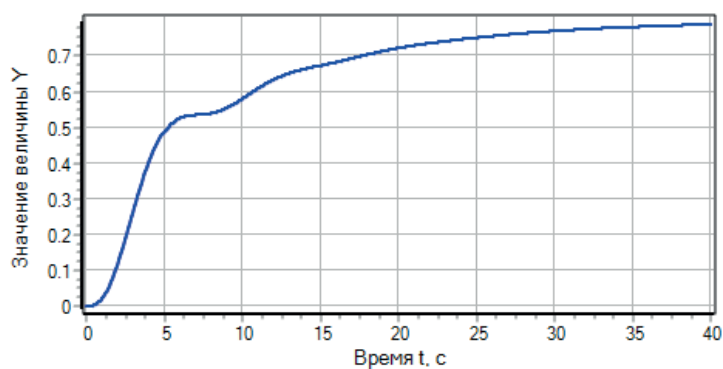
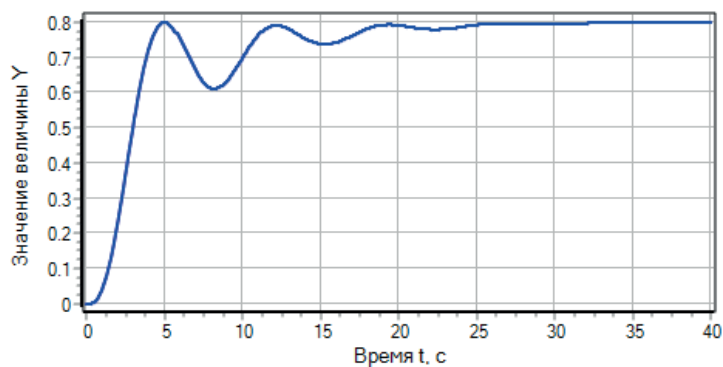
*a**б**в*

Рис. 3.57. Графики переходных процессов САР:  
а – при  $k_1 = 1$ ; б – при  $k_1 = 0,2$ ; в – при  $k_1 = 0,4$

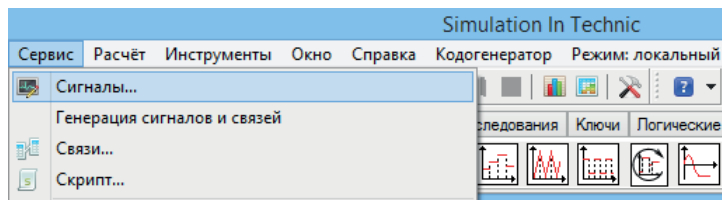


Рис. 3.58. Меню вызова окна редактора сигналов проекта

В диалоговом окне редактора сигналов проекта в нижней части нажмите на кнопку  **Добавить сигнал**. После этого в списке сигналов появляется новый сигнал, и пользователь получает возможность задать его имя и атрибуты (рис. 3.59).

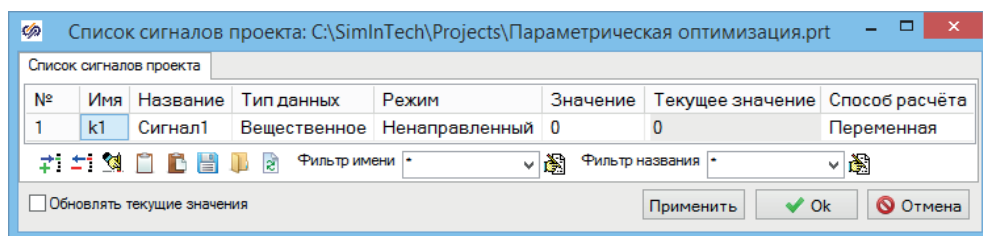


Рис. 3.59. Диалоговое окно редактора сигналов проекта

Задайте новому сигналу проекта имя **k1** и введите его атрибуты в соответствии с рис. 3.59:

- Тип данных **Вещественное**;
- Режим **Ненаправленный**;
- Значение **0**;
- Способ расчёта **Переменная**.

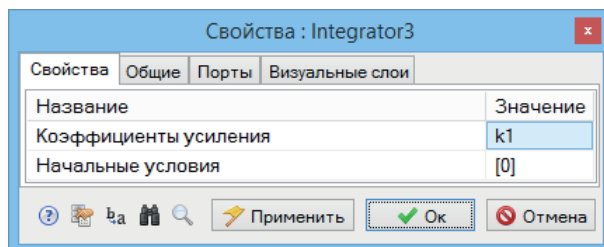


Рис. 3.60. Диалоговое окно блока «W1(s)» с введенным значением свойства Коэффициент усиления в символьной форме

Созданная глобальная переменная **k1** будет использована в качестве варьируемого параметра – коэффициента усиления  $k_1$  *И-регулятора*.

Откройте диалоговое окно блока *Интегратор* и введите значение его свойства *Коэффициент усиления* в символьной форме **k1** (рис. 3.60). Закройте диалоговое окно, используя кнопку **ОК**.

**Формирование локальных критериев оптимизации.** Для расчета параметров переходного процесса воспользуемся новой субмоделью, в которой будет создана расчетная схема.

В основное *схемное окно* проекта под блок «График  $Y(t)$ » (рис. 3.50) поместите блок *Субмодель* (из библиотеки «Субструктуры») и осуществите двойной клик левой клавишей мыши на нем для входа в субмодель. В открывшемся *субмодельном схемном окне* создайте структурную схему, приведенную на рис. 3.61. Для этого поместите на схему следующие блоки:

- *Порт входа* и *Порт выхода* (элементы 1 и 10) из библиотеки «Субструктуры»;
- *Нижний или верхний предел* и *Задержка на шаг интегрирования* (элементы 2 и 8) из библиотеки «Нелинейные»;
- *Константа* и *Часы* (элементы 3 и 6) из библиотеки «Источники»;
- *Сумматор* и *Абсолютное значение* (элементы 4 и 5) из библиотеки «Операторы»;
- *Ключ-3* (элемент 7) из библиотеки «Ключи»;
- *Мультиплексор* (элемент 9) из библиотеки «Векторные».

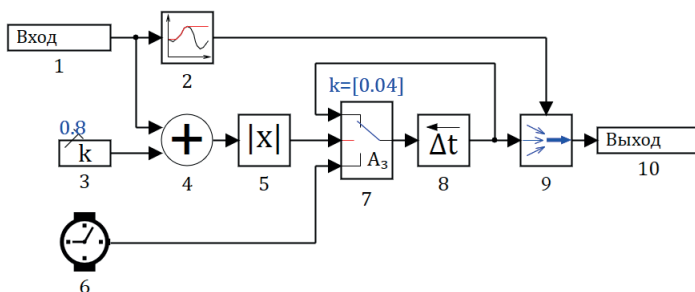


Рис. 3.61. Структурная схема для расчета параметров переходного процесса

Проведите все линии связи, как изображено на рис. 3.61. Оформление подписей для блоков не требуется.

Свойства блоков *Порт входа*, *Абсолютное значение*, *Часы*, *Задержка на шаг интегрирования*, *Мультиплексор* и *Порт выхода* (элементы 1, 5, 6, 8, 9 и 10) следует оставить установленными по умолчанию. Настройки остальных блоков следует задать в соответствии с табл. 3.4.

Структурная схема для расчета параметров переходного процесса (рис. 3.61) функционирует следующим образом.

**Таблица 3.4.** Свойства блоков *Нижний или верхний предел*, *Константа*, *Сумматор* и *Ключ-3* структурной схемы рис. 3.61

| Блок | Свойство                                | Значение |
|------|-----------------------------------------|----------|
| 2    | Тип операции                            | Максимум |
| 3    | Значение                                | 0.8      |
|      | Тип данных (для генерации кода)         | double   |
|      | Название                                | k        |
| 4    | Весовые множители для каждого из входов | [1,-1]   |
| 7    | Значения уставок                        | 0.04     |
|      | Тип управляющего сигнала                | Скаляр   |

На вход субмодели через блок *Порт входа* подается регулируемая величина  $Y$ . Максимальное значение регулируемой величины (перерегулирование)  $Y_{\max}$  за время расчета, выделенное блоком *Нижний или верхний предел*, подается на первый вход блока *Мультиплексор*.

Формируемая блоком *Константа* постоянная 0,8 является заданным значением регулируемой величины  $Y$ . Блок *Сумматор* осуществляет расчет отклонения  $\Delta$  регулируемой величины  $Y$  от заданного значения, модуль которого с выхода блока *Абсолютное значение* подается на второй (управляющий) вход блока *Ключ-3*. Если абсолютное значение отклонения  $\Delta$  превышает допустимый предел 0,04 (5% от 0,8), то на выходе блока *Ключ-3* будет значение модельного времени, поступающего на третий вход элемента 7, иначе значение на выходе ключа изменяться не будет за счет обратной связи через его первый вход и блок *Задержка на шаг интегрирования*. Таким образом, происходит фиксация момента времени, когда управляемая величина  $Y$  входит в пределы допустимого отклонения  $\Delta = 0,04$ , т. е. производится измерение времени регулирования.

Блок *Мультиплексор* на своем выходе формирует векторный сигнал, первым элементом которого является перерегулирование  $Y_{\max}$ , вторым – время регулирования. Данные величины используем в качестве локальных критериев оптимизации и передаем их в векторном сигнале на выход субмодели через блок *Порт выхода*.

Закройте субмодель, выполнив двукратный щелчок *левой* клавишей мыши в свободном месте *субмодельного схемного окна* или нажав на кнопку  **Возврат из субмодели**. Выполните сохранение проекта.

**Использование блока *Оптимизация параметров модели*.** Дополните исходную структурную схему моделирования (рис. 3.50) блоками *Оптимизация параметров модели* (библиотека «Исследования») и *Запись в список сигналов* (библиотека «Данные»), проведите линии связи и оформите подписи блоков в соответствии с рис. 3.62.

В свойствах блока «Варьируемый параметр» для параметра *Имена сигналов* введите значение **k1**, остальные настройки данного блока оставьте по умолчанию.

Таким образом, на вход блока *Оптимизация параметров модели* поступают локальные критерии оптимизации в векторном сигнале (перерегулирование и время

регулирования), а его выход связан с варьируемым параметром коэффициентом усиления  $k_1$  *И-регулятора*.

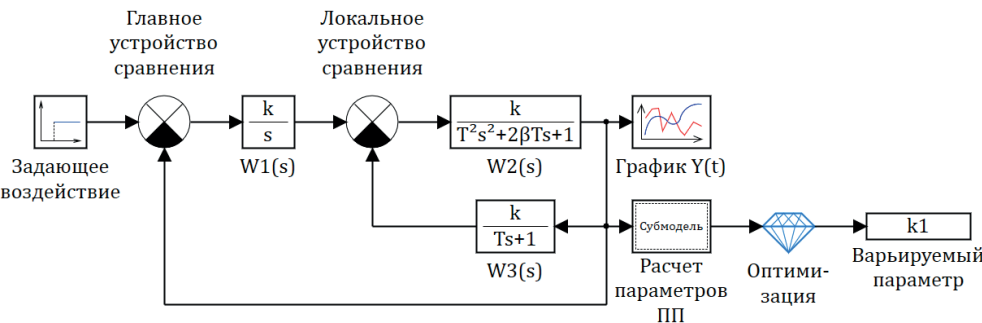


Рис. 3.62. Структурная схема моделирования САП для оптимизации коэффициента усиления *И-регулятора*

Перед настройкой блока *Оптимизация параметров модели* настоятельно рекомендуется внимательно ознакомиться с информацией по данному блоку в справочной системе SimInTech. Для этого выделите блок «Оптимизация» и вызовите контекстную справку нажатием сочетания клавиш **Ctrl** и **F1** на клавиатуре. После изучения материала закройте файл справки.

Откройте диалоговое окно блока *Оптимизация параметров модели* и произведите его настройку (см. рис. 3.5).

Таблица 3.5. Свойства блока *Оптимизация параметров модели*

| Блок        | Свойство                                                                                    | Значение                        |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Оптимизация | Режим оптимизации параметров                                                                | По полному переходному процессу |
|             | Периодичность анализа критериев оптимизации при расчёте в динамике, сек                     | 1                               |
|             | Начальное приближение выходов блока                                                         | 0.2                             |
|             | Минимальные значения выходов блока                                                          | 0.2                             |
|             | Максимальные значения выходов блока                                                         | 1                               |
|             | Абсолютная точность подбора значений выходов                                                | 0.001                           |
|             | Начальное приращение выходов                                                                | 0.001                           |
|             | Минимальные значения входных критериев оптимизации                                          | [0.76,0]                        |
|             | Максимальные значения входных критериев оптимизации                                         | [0.8,17]                        |
|             | Тип суммарного критерия оптимизации                                                         | Аддитивный                      |
|             | Метод оптимизации                                                                           | Поиск-2                         |
|             | Максимальное количество повторных моделирований при расчёте по полному переходному процессу | 500                             |
|             | Выдача информации о процессе оптимизации                                                    | Да                              |



Поскольку в качестве параметров оптимизации используются перерегулирование и время переходного процесса за все время расчета, то оптимизация должна производиться по всему переходному процессу.

Варьирование оптимизируемого параметра (коэффициента усиления  $k_1$ ) ограничено диапазоном от 0,2 до 1, исходя из результатов предварительных расчетов (см. рис. 3.57). В качестве начального значения варьировемого параметра принят его нижний предел, т. е. значение **0.2**.

В соответствии с требованиями к показателям качества регулирования допустимый диапазон значений локальных критериев оптимизации ограничен по перерегулированию от 0,76 до 0,8 и по времени переходного процесса от 0 до 17 с.

С целью уточнения установившегося значения регулируемой величины  $Y$  увеличьте конечное время расчета до 80 с.

После применения введенных настроек блока *Оптимизация параметров модели* сохраните изменения в проекте.

Для запуска процесса параметрической оптимизации нажмите кнопку . **Пуск** и ожидайте результатов. При работе блока *Оптимизация параметров модели* в режиме «Оптимизации по полному переходному процессу» процесс моделирования производится несколько раз до получения оптимального результата. После завершения оптимизации в окне сообщений появится строка: **[Информация]: «Конечное время достигнуто (time=80)»**. В предшествующей строке будут отражены результаты оптимизации: информация об оптимизированном параметре и достигнутых критериях оптимизации (рис. 3.63).

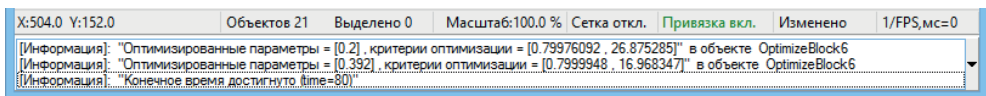


Рис. 3.63. Окно сообщений с информацией о результатах оптимизации

В результате проведенной параметрической оптимизации найдено оптимальное значение коэффициента усиления  $k_1$  *И-регулятора*, равное 0,392, при котором перерегулирование отсутствует ( $Y_{\max} = 0,800$ ) и время регулирования составляет 16,97 с, что меньше допустимой величины 17 с. График переходного процесса при оптимальной настройке *И-регулятора* можно наблюдать в *графическом окне* блока «График  $Y(t)$ » (рис. 3.64).

**Индивидуальные задания.** По заданию преподавателя для САР напряжения синхронного генератора, рассмотренной в лабораторной работе 2, по варианту табл. 3.3 или для одной из САР, приведенных в приложении Б, выполните параметрическую оптимизацию одного из типовых идеальных законов регулирования по каналу задающего воздействия, приняв возмущающее воздействие равным нулю.

Для САР напряжения синхронного генератора и статических систем из приложения Б примените *ПИД-закон регулирования*. Для астатических САР приложения Б (систем, содержащих интегрирующее звено) используйте *ПД-закон регулирования*.

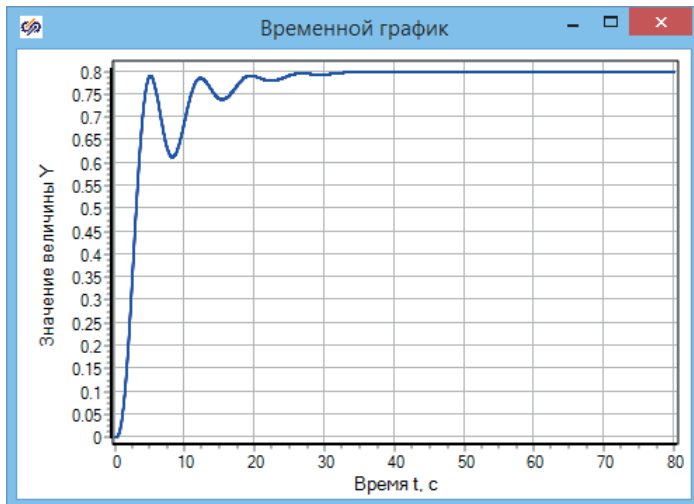


Рис. 3.64. Графическое окно блока «График Y(t)» при  $k_1 = 0,392$

В качестве оптимизируемых параметров для *ПИД-закона* примите коэффициенты  $k_P$ ,  $k_I$  и  $k_D$ , а для *ПД-закона* – коэффициенты  $k_P$  и  $k_D$  (1.64).

Для определения критериев оптимальности необходимо руководствоваться следующими условиями:

- заданное значение отклонения  $\Delta$  регулируемой величины должно быть не более 5% (пятипроцентная «трубка»);
- перерегулирование  $\sigma \leq 20\%$ ;
- время переходного процесса должно быть соизмеримо с  $T_{\text{КР}}$  (п. 1.3.3). В процессе оптимизации оно может изменяться и уточняться. Такой подход приемлем для учебных целей, при решении оптимизационных задач реальных САР время переходных процессов задают, исходя из технологических требований к автоматизируемому процессу (объекту).

**Порядок выполнения индивидуального задания** (рассмотрен применительно к демонстрационному примеру лабораторной работы 2) следующий:

- в структурную схему исходной САР (рис. 2.4) вместо электронного усилителя (звена с передаточной функцией  $W_{y1}(s) = k_1$ ) введите структурную схему *ПИД-закон регулирования* (рис. 1.256) с передаточной функцией (1.64);
- на основе полученной структурной схемы, приняв  $k_I = 0$  и  $k_D = 0$ , посредством компьютерного моделирования определите значение критического коэффициента  $k_{1\text{КР}}$  и периода  $T_{\text{КР}}$  незатухающих гармонических колебаний в системе на границе устойчивости (для демонстрационного примера согласно рис. 3.31  $k_{1\text{КР}} \approx 28,959$  и  $T_{\text{КР}} = 2,1880$  с);
- используя метод Циглера-Никольса (п. 1.3.3) применительно к *ПИД-закону регулирования*, рассчитайте значения коэффициентов  $k_P$ ,  $k_I$  и  $k_D$  (для демонстрационного примера  $k_P = 17,3754$ ,  $k_I = 15,8824$  и  $k_D = 4,7522$ );

- выполните компьютерное моделирование САР с *ПИД-регулятором* (для значений его параметров, найденных с помощью метода Циглера-Никольса). В процессе моделирования подбором задающего воздействия определите его значение, соответствующее заданному значению регулируемой величины (в демонстрационном примере для заданного значения регулируемой величины – напряжения генератора  $U = U_H = 6300$  В;  $U_0 = 14,742$  В);
- для своего варианта индивидуального задания выполните все этапы демонстрационного примера оптимизации САР при найденном значении задающего воздействия и нулевом возмущающем воздействии. При задании пределов вариаций параметров оптимизации в качестве ориентиров используйте рассчитанные числовые значения коэффициентов  $k_P$ ,  $k_I$  и  $k_D$ ;
- для оптимальных значений параметров типового закона регулирования получите совмещенный график переходного процесса по задающему и возмущающему воздействиям и оцените качество САР;
- сравните показатели качества оптимальной САР и САР с параметрами закона регулирования, рассчитанными на основе метода Циглера-Никольса.

**Содержание отчета.** В отчете должны быть структурная схема оптимизируемой САР, структурная схема ее моделирования, графики переходных процессов, необходимые расчеты и результаты обработки графиков, выводы.

## Контрольные вопросы и задания

1. Какова основная сущность интегральных методов оценки качества САР?
2. В каких случаях применяют интегральные оценки качества САР:

$$S_1 = \int_0^{\infty} \Delta y^2 dt \quad \text{или} \quad S_1 = \int_0^{\infty} \Delta x^2 dt;$$

$$S_2 = \int_0^{\infty} \left[ \Delta y^2 + T^2 \left( \frac{d\Delta y}{dt} \right)^2 \right] dt \quad \text{или} \quad S_2 = \int_0^{\infty} \left[ \Delta x^2 + T^2 \left( \frac{d\Delta x}{dt} \right)^2 \right] dt;$$

$$S_3 = \int_0^{\infty} \Delta y dt \quad \text{или} \quad S_3 = \int_0^{\infty} \Delta x dt?$$

3. Дайте определение оптимальной САР.
4. Что такое критерий оптимальности САР?
5. Какова сущность параметрической оптимизации САР?
6. Какова сущность эмпирического метода синтеза типовых законов регулирования Циглера-Никольса?

## Работа 5. Моделирование релейных САР

### Цели работы:

- освоить и закрепить понятия и отдельные вопросы теории автоматического регулирования нелинейных САР (нелинейные элементы и системы, релейные статические характеристики, автоколебания в нелинейных системах);

- освоить методику моделирования процессов регулирования в релейных САР в среде SimInTech.

**Теоретический материал, необходимый для выполнения работы.** Необходимо знать основные понятия и отдельные вопросы теории автоматического регулирования нелинейных, в том числе и релейных САР, а также функциональные возможности ПО SimInTech и основные этапы работы в его среде (см. раздел 2, лабораторные работы 1 и 2).

**Последовательность выполнения лабораторной работы.** Для одного из вариантов рассмотренной ниже релейной САР (рис. 3.5.1), по заданию преподавателя, подготовьте исходные данные и выполните ее моделирование в соответствии с поставленными задачами в следующей последовательности:

- с использованием *общетехнической* библиотеки (приложение Ж) на основе исходной структурной схемы САР составьте структурную схему моделирования системы;
- задайте максимальный и минимальный шаги интегрирования;
- определите время интегрирования и шаг синхронизации задачи;
- задайте точность интегрирования;
- руководствуясь рекомендациями раздела 2, выполните моделирование САР.

---

**Примечание:** принимая во внимание, что обучающийся при выполнении первых четырех лабораторных работ приобрел необходимый опыт работы в среде SimInTech, и учитывая, что данная работа по объему сравнительно небольшая, а по содержанию несложная, ее выполнение предусмотрено без детального пошагового руководства.

---

**САР температуры проточного водонагревателя.** Водонагреватель выполнен в виде емкости, в которой на токопроводящих стержнях 2 (рис. 3.65) и проходных изоляторах 3 подвешены пластины 1. К пластинам через изоляторы подводится переменное напряжение  $U$ . В результате протекания тока  $I$  через воду она нагревается. Для стабилизации температуры воды водонагреватель оснащен измерителем-регулятором ТРМ 201-Щ2.С фирмы «ОВЕН». Данный прибор имеет бесконтактное выходное устройство – симисторную оптопару, которая управляет магнитным пускателем. Силовые контакты магнитного пускателя коммутируют цепи питания пластин 1 водонагревателя.

Упрощенная структурная схема САР температуры показана на рис. 3.66, где:  $\theta$  – температура нагретой воды, °С;  $\theta_{\text{ЗД}}$  – заданная температура нагрева воды, °С;  $\Delta\theta = \theta_{\text{ЗД}} - \theta$  – сигнал рассогласования, °С;  $F(\Delta\theta)$  – релейная характеристика прибора ТРМ 201 совместно с магнитным пускателем;  $U$  – напряжение на электродах, В;  $W(s)$  – передаточная функция водонагревателя.

Передаточная функция водонагревателя по каналу регулирующего воздействия:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\beta Ts + 1},$$

где  $k$  – передаточный коэффициент водонагревателя, °C/В;

$T$  – постоянная времени, с;

$\beta$  – коэффициент демпфирования.

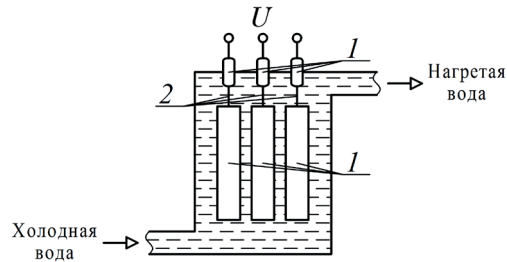


Рис. 3.65. Проточный электродный водонагреватель

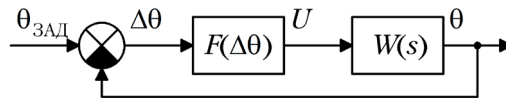


Рис. 3.66. Структурная схема САР без учета возмущений

Релейная характеристика терморегулятора (прибора ТРМ 201 совместно с магнитным пускателем) показана на рис. 3.67. Варианты заданий приведены в табл. 3.6.

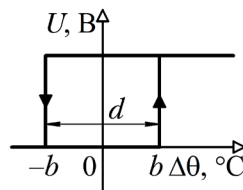


Рис. 3.67. Релейная характеристика терморегулятора:  
 $d = 2b$  – дифференциал;  $b$  – зона нечувствительности

В процессе моделирования САР получите графики процессов регулирования при различных значениях зоны нечувствительности  $b$  в пределах  $b_{\max} \dots b_{\min}$ . По этим графикам определите зависимости параметров автоколебаний (амплитуды  $A$  и частоты  $\omega$  автоколебаний) от варьируемого параметра релейного регулятора – зоны нечувствительности регулятора  $b$ . По результатам моделирования постройте графики зависимостей  $A(b)$  и  $\omega(b)$  и на их основе определите рациональное значение зоны нечувствительности  $b$  для исследуемой системы, исходя

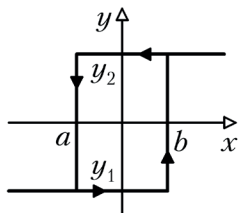
из показателей ее надежности и требований технологического процесса, сущность которых состоит в следующем.

**Таблица 3.6. Значение параметров элементов САР и задающего воздействия**

| Вариант | $b_{\max}, ^\circ\text{C}$ | $b_{\min}, ^\circ\text{C}$ | $U, \text{В}$ | $k_{\text{ио}}$ | $T_2, \text{с}$ | $b$  | $\theta_{\text{зад}}, ^\circ\text{C}$ |
|---------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------------|-----------------|------|---------------------------------------|
| 1       | 1,5                        | 0,1                        | 380           | 0,090           | 33              | 1,80 | 25                                    |
| 2       | 2,0                        | 0,2                        | 220           | 0,175           | 18              | 1,50 | 20                                    |
| 3       | 3,0                        | 0,2                        | 380           | 0,120           | 50              | 2,00 | 18                                    |
| 4       | 2,0                        | 0,3                        | 220           | 0,100           | 33              | 1,70 | 22                                    |
| 5       | 1,5                        | 0,1                        | 380           | 0,125           | 27              | 1,60 | 28                                    |
| 6       | 2,0                        | 0,3                        | 220           | 0,140           | 20              | 1,75 | 19                                    |
| 7       | 2,5                        | 0,5                        | 380           | 0,095           | 32              | 1,70 | 25                                    |
| 8       | 1,5                        | 0,2                        | 220           | 0,120           | 50              | 2,00 | 20                                    |
| 9       | 1,8                        | 0,3                        | 380           | 0,130           | 20              | 1,60 | 24                                    |
| 10      | 3,0                        | 0,4                        | 220           | 0,240           | 34              | 1,80 | 30                                    |

Известно, что каждое электрическое коммутационное устройство имеет гарантируемое заводом-изготовителем количество коммутаций за весь срок эксплуатации, которое учитывается при определении его показателей надежности. Так, для магнитного пускателя, являющегося силовым коммутационным элементом в схеме управления проточным водонагревателем, гарантируемое количество коммутаций составляет 0,5...1,0 млн за весь срок службы.

Что касается технологических требований к процессу регулирования, то они должны обеспечиваться соответствующими показателями качества САР. Одним из технологических требований является точность стабилизации регулируемой величины. Для автоматической системы стабилизации температуры нагретой воды на выходе водонагревателя допускаются отклонения температуры от заданного значения в пределах  $\pm 10\%$ .



**Рис. 3.68. Статическая характеристика блока**  
*Релейное неоднозначное (гистерезис)*

При моделировании САР для реализации релейной характеристики (рис. 3.68) следует использовать блок *Релейное неоднозначное (гистерезис)* из библиотеки «Нелинейные» приложения Ж, задав следующие значения свойствам статической характеристики блока (рис. 3.68):

- Нижняя граница переключения  $a = -(b_{\max} \dots b_{\min})$ ;
- Верхняя граница переключения  $b = (b_{\max} \dots b_{\min})$ ;
- Нижнее значение функции  $y_1 = U$ ;
- Верхнее значение функции  $y_2 = 0$ ;
- Начальные условия  $(0;1) 0$ .

В качестве **индивидуальных заданий** при выполнении данной лабораторной работы могут использоваться варианты релейных САР, приведенные в п. В.1–В.9 в приложении В.

**Содержание отчета.** В отчет следует включить структурную схему исследуемой САР, подготовленные исходные данные для работы в среде SimInTech (структурную схему моделирования, параметры расчета), графики процесса регулирования, графические зависимости амплитуды и частоты автоколебаний для различных значений варьируемого параметра статической характеристики релейного элемента, а также выводы по работе.

### Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение линейной и нелинейной САР.
2. По какому признаку САР подразделяются на непрерывные и релейные системы?
3. Что такое релейный элемент?
4. Изобразите графически статическую характеристику релейного элемента с зоной нечувствительности.
5. Изобразите графически статическую характеристику релейного элемента с гистерезисом.
6. Изобразите графически статическую характеристику релейного элемента с гистерезисом и зоной нечувствительности.
7. Что такое двухпозиционные релейные САР?
8. Каковы рекомендации по выбору метода и параметров интегрирования и как задают шаг вывода результатов моделирования при работе в среде SimInTech?

## Работа 6. Моделирование нелинейных САР с помощью блока Язык программирования

### Цели работы:

- закрепить понятия и вопросы, относящиеся к нелинейным САР (понятия нелинейных элементов и систем, линеаризация нелинейных статических характеристик и нелинейных дифференциальных уравнений, понятие линеаризованной системы);
- освоить методику моделирования нелинейных САР в среде SimInTech с использованием блока *Язык программирования*.

**Теоретический материал, необходимый для выполнения работы.** Необходимо владеть понятиями, относящимися к нелинейным системам, а также знать функциональные возможности ПО SimInTech и основные этапы работы в его среде (см.

п. 2.6). Помимо этого, следует изучить порядок и процедуры работы с блоком *Язык программирования* (см. раздел 6 справочной системы SimInTech).

**Краткие сведения о блоке *Язык программирования*.** В большом многообразии нелинейных автоматических систем есть САР, в которых имеются элементы, статические и динамические характеристики которых описываются нелинейными аналитическими функциональными зависимостями или нелинейными дифференциальными уравнениями. Такие нелинейные элементы линеаризуются на основе ряда Тейлора, в результате чего получаются приближенные математические модели систем в виде линеаризованных САР. Примером подобных систем может служить нелинейная САР температуры в термической камере (см. рис. 1.5, раздел 1).

В библиотеке «Динамические» ПО SimInTech имеется специальный типовой блок *Язык программирования*, с использованием которого можно, наряду с линейными аналитическими зависимостями, моделировать практически любые нелинейные зависимости. Наличие этого блока позволяет моделировать нелинейные САР непосредственно по исходным нелинейным моделям без предварительной линеаризации нелинейных зависимостей, что существенно повышает достоверность результатов их исследований.

Блок *Язык программирования* позволяет непосредственно в процессе работы в среде SimInTech создавать экземпляры блоков со своими оригинальными математическими моделями. Пользователь в окне текстового редактора алгоритмов на встроенном языке программирования записывает алгебраические уравнения и уравнения динамики в виде, близком к их общепринятой текстовой записи на бумаге.

Математическое описание блока в общем случае может соответствовать многомерной нелинейной динамической системе в форме Коши:

$$\begin{cases} x'(t) = f[x(t), u(t)]; \\ y(t) = g[x(t), u(t)], \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $f[x(t), u(t)]$  и  $g[x(t), u(t)]$  – известные нелинейные функции переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и входных воздействий  $u_1, u_2, \dots, u_n$ .

В качестве входных воздействий могут выступать и коэффициенты (постоянные или переменные), входящие в любое из уравнений (3.3).

Первое из уравнений системы (3.3) может отсутствовать: в этом случае блок *Язык программирования* выполняет алгебраические преобразования входных величин. Использование этого блока в качестве функционального весьма эффективно в случае наличия в модели сложных функциональных преобразований, когда использование для этих целей элементарных типовых блоков приведет к неоправданному усложнению структурной схемы.

Блок *Язык программирования* «распознает» большое количество операторов (унарных, математических, целочисленных, логических, специальных) и функций: стандартных, логических, векторных, матричных, тригонометрических,



статистических и др. Подробное описание операторов и функций представлено в справочной системе SimInTech, в пп. 6.3 и 6.6.

В блок *Язык программирования* включено также 8 специальных функций, реализующих определение основных термодинамических свойств воды и водяного пара (известные таблицы Вуколовича в докритическом диапазоне давления от 0,09 до 50 МПа и температуры от 10 до 800 °C).

Параметры в блоке *Язык программирования* могут быть заданы как в числовом виде, так и через именованные параметры, значения которых должны быть определены как *глобальные* или *локальные* переменные.

Перед выполнением лабораторной работы настоятельно рекомендуется изучить раздел 6 справочной системы SimInTech, посвященный описанию встроеного языка программирования.

### Последовательность выполнения лабораторной работы:

- освоить приемы работы с блоком *Язык программирования* на базе демонстрационных примеров;
- для нелинейной САР заданного варианта подготовить исходные данные и выполнить ее компьютерное моделирование.

### Демонстрационные примеры

**Пример 1. Моделирование САР температуры в термической камере.** Последовательность выполнения примера следующая.

#### Этап 1. Подготовка исходных данных для моделирования.

Для САР температуры в термической камере (см. п. 1.1.1, рис. 1.1) в качестве математической модели принята нелинейная модель в виде структурной схемы (см. рис. 3.69) при следующих значениях параметров элементов САР:  $T_k = 1800$  с;  $k_k = 0,6$ ;  $k_o = 0,4$ ;  $T_T = 0$ ;  $k_T = 0,9 \cdot 10^{-4}$  В/°C;  $k_y = 10 \dots 100$ ;  $k_{tr} = 50$ ;  $R = 32$  Ом;  $T_n = 300$  с;  $k_n = 0,1$  °C/Вт.

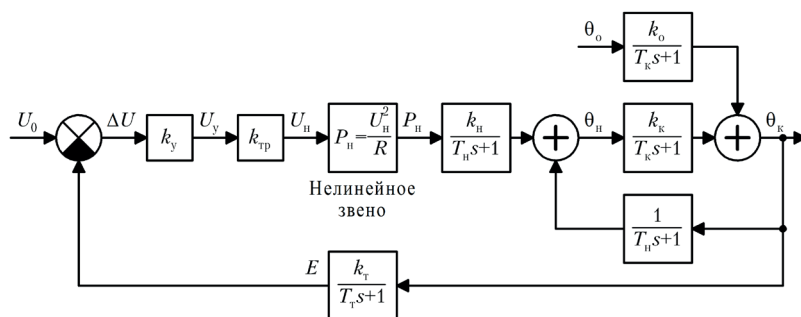


Рис. 3.69. Структурная схема нелинейной САР

Входные воздействия на систему:

- задающее воздействие  $U_0 = 0,1327$  В (при  $k_y = 100$ );
- возмущающие  $\theta_0 = 5$  °C (при  $t = 0$ ) и  $\theta_0 = -30$  °C (при  $t = 18\,000$  с).

Заданное значение температуры в камере  $\theta_k = 650^\circ\text{C}$  (температура нагревания при процессе закалки стальных деталей).

Нелинейность данной САР обусловлена наличием нелинейного звена, отражающего зависимость мощности  $P_n$  нагревательного элемента от приложенного к нему напряжения  $U_n$  [см. формулу (1.8)]. Эту нелинейную функцию в среде SimInTech можно реализовать с помощью блока *Язык программирования*. На структурной схеме моделирования САР, представленной на рис. 3.70, данный блок имеет подпись «PO1».

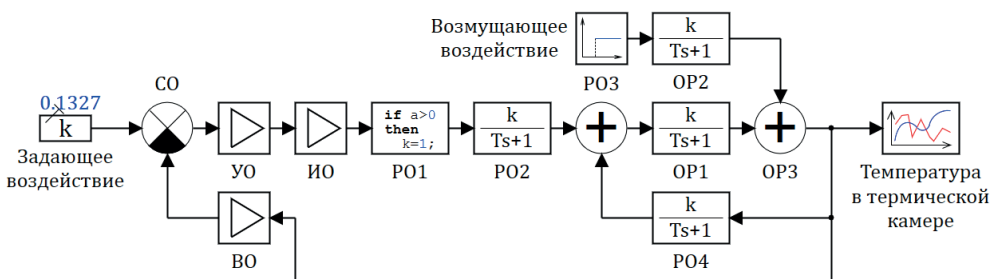


Рис. 3.70. Структурная схема моделирования САР температуры в термической камере

Исходные данные, необходимые для моделирования САР, с учетом заданных значений параметров ее элементов:

- метод интегрирования «Адаптивный 1»;
- конечное время расчета (время интегрирования) 30 000 с;
- максимальный шаг интегрирования 30 с;
- минимальный шаг интегрирования 3 с;
- шаг синхронизации задачи 3 с;
- относительная ошибка 0,001;
- абсолютная ошибка 0,1;
- синхронизация с реальным временем при коэффициенте ускорения 6000.

### Этап 2. Разработка структурной схемы моделирования в среде SimInTech.

Создайте новый файл проекта и сохраните его с оригинальным именем, например «Нелинейная САР». В *схемное окно* проекта введите структурную схему моделирования САР температуры в термической камере, приведенную на рис. 3.70. Для этого воспользуйтесь процедурами и приемами, рассмотренными в лабораторных работах 1 и 2.

**Этап 3. Ввод параметров структурной схемы.** Осуществите ввод свойств блоков структурной схемы моделирования, представленной на рис. 3.70. Поскольку постоянные времени элементов исходной САР имеют относительно большие значения ( $T_k = 1800$  с и  $T_n = 300$  с), то в качестве единиц измерения времени удобно использовать минуты. Для реализации такого подхода необходимо все параметры, связанные со временем, вводить в минутах. Тогда полученный в результате моде-

лирования график переходного процесса будет иметь единицы измерения по оси абсцисс также минуты.

Таким образом, при вводе постоянных времени для блоков «Р02» и «Р04» (см. рис. 3.70) в качестве значения данного свойства можно ввести выражение **300/60** (или величину **5**), а для блоков «ОР1» и «ОР2» – **1800/60** (или величину **30**).

**Этап 4. Работа с блоком Язык программирования.** Установите курсор мыши на блок *Язык программирования* и сделайте двукратный щелчок *левой* клавишей мыши – откроется окно текстового редактора алгоритмов этого блока (рис. 3.71). Откорректируйте исходную программу в появившемся окне в соответствии с текстом программы вычисления нелинейной функциональной зависимости (1.8) между напряжением и мощностью нагревательного элемента, представленной на рис. 3.72.

При написании программы в окне текстового редактора алгоритмов рекомендуется приводить поясняющие комментарии к отдельным элементам программы (см. рис. 3.72). Комментарии необходимо заключать в фигурные скобки. Для выделения однострочных комментариев можно использовать двойной слеш «//». Тексты комментариев автоматически выделяются курсивным начертанием и зеленым цветом.

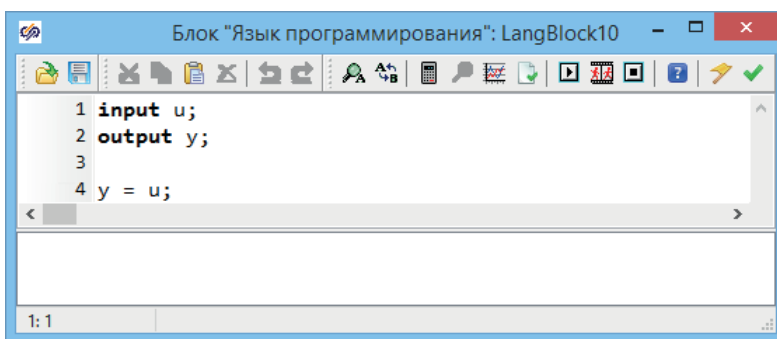


Рис. 3.71. Окно текстового редактора алгоритмов блока *Язык программирования* с исходной программой

```

1 { Описание имен и размерностей
2 входной и выходной величин }
3 input U; // напряжение на нагревателе, В
4 output P; // мощность нагревателя, Вт
5 // Значение сопротивления нагревательного элемента, Ом
6 R=32;
7 // Вычисление мощности нагревательного элемента
8 P=U^2/R;
```

Рис. 3.72. Текст программы, реализующей функцию (1.8)

После ввода текста программы (рис. 3.72) закройте окно текстового редактора алгоритмов с помощью кнопки  **ОК**, сохранив изменения в программе блока *Язык программирования*.

**Этап 5. Установка параметров интегрирования.** В соответствии с исходными данными для моделирования введите значения параметров расчета (без указания их размерностей):

- Метод интегрирования **Адаптивный 1**;
- Конечное время расчета **30 000/60** (мин);
- Максимальный шаг **30/60** (мин);
- Минимальный шаг **3/60** (мин);
- Шаг синхронизации задачи **3/60** (мин);
- Относительная ошибка **0.001**;
- Абсолютная ошибка **0.1**;
- Коэффициент ускорения для синхронизации с реальным временем **6000/60**.

Приведенные выше временные параметры расчета будут соответствовать единице измерения времени в среде SimInTech – минуте.

**Этап 6. Моделирование переходного процесса САР, настройка графика.** Откройте *графическое окно* блока *Временной график*. Через контекстное меню вызовите диалоговое окно **Свойства графика**, в котором измените следующие настройки *графического окна*:

- удалите заголовок графика;
- установите синий цвет линии для графика;
- введите новые названия осей: ось X – **Время t, мин**; ось Y – **Температура, град. С**.

С помощью кнопки **ОК** закройте диалоговое окно **Свойства графика** с сохранением изменений настроек.

Кнопкой  **Пуск** запустите созданную задачу на счет. Наблюдайте за построением кривой переходного процесса в *графическом окне*. Результатом моделирования является график, представленный на рис. 3.73.

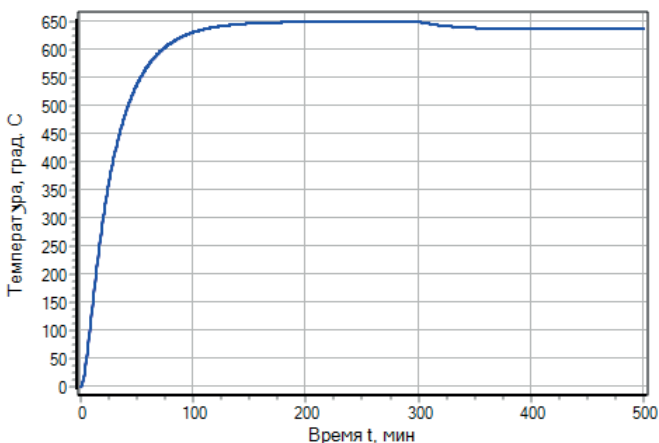


Рис. 3.73. Переходный процесс САР температуры в термической камере

**Пример 2. Моделирование переходного процесса нелинейного динамического звена на основе модели в форме Коши.**

Данный демонстрационный пример построен применительно к колебательно-му звену с переменным демпфированием колебаний. Дифференциальное уравнение, описывающее связь входного  $u(t)$  и выходного  $y(t)$  сигналов звена:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \left[ 1 + cy^2(t) \right] \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = ku(t), \quad (3.4)$$

где  $a_0, a_1, a_2, c, k$  – постоянные коэффициенты.

Демпфирование колебаний изменяется пропорционально величине  $[1 + cy^2(t)]$ . Произведение  $y^2(t) \frac{dy(t)}{dt}$  обуславливает нелинейность дифференциального уравнения.

Рассмотрим процедуру формирования математической модели динамики нелинейного колебательного звена. Дифференциальное уравнение (3.4) представим в виде:

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{a_1}{a_2} \left[ 1 + cy^2(t) \right] \frac{dy(t)}{dt} + \frac{a_0}{a_2} y(t) = \frac{k}{a_2} u(t).$$

Примем следующие обозначения:

$$x_1(t) = y(t) \text{ и } x_2(t) = \frac{dy(t)}{dt}.$$

Тогда запись исходного дифференциального уравнения (3.4) в форме Коши будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t); \\ \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} = \frac{k}{a_2} u(t) - \frac{a_1}{a_2} \left[ 1 + cx_1^2(t) \right] x_2(t) - \frac{a_0}{a_2} x_1(t). \end{cases} \quad (3.5)$$

Значения коэффициентов модели:  $a_0 = 1; a_1 = 0,3; a_2 = 1; c = 1; k = 1$ .

Начальные условия нулевые: при  $t = 0$   $y(0) = 0, y'(0) = 0$ .

Входной ступенчатый сигнал –  $u(t) = 0, 1 \dots 1, 0$ .

Последовательность выполнения примера следующая.

**Этап 1. Создание структурной схемы моделирования, ввод ее параметров.**

Нелинейное дифференциальное уравнение (3.4) в среде SimInTech с использованием блока *Язык программирования* реализуется с помощью структурной схемы, изображенной на рис. 3.74.

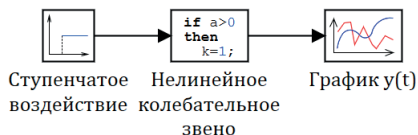


Рис. 3.74. Структурная схема моделирования  
переходного процесса нелинейного колебательного звена  
в среде SimInTech

Создайте новый файл проекта и сохраните его с оригинальным именем, например «Нелинейное звено 1». В *схемное окно* проекта введите структурную схему моделирования переходного процесса нелинейного колебательного звена, представленную на рис. 3.74.

На основе системы уравнений (3.5) с учетом значения постоянных коэффициентов ( $a_0 = 1$ ;  $a_1 = 0,3$ ;  $a_2 = 1$ ;  $c = 1$ ;  $k = 1$ ) составьте программу решения исходного дифференциального уравнения (3.4), текст которой должен быть введен в окно текстового редактора алгоритмов блока *Язык программирования*. Вид программы будет зависеть от способа задания констант ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $c$ ,  $k$ ), которые в среде SimInTech можно задавать в виде *локальных* или *глобальных* параметров (сигналов). Прежде чем составлять программу решения заданного уравнения, для справки поясним их сущность и «механизм» их задания. *Локальными* параметрами являются численные характеристики отдельных элементарных блоков, используемых в структурной схеме (область их действия ограничена только этими блоками). Они задаются непосредственно в диалоговых окнах каждого блока структурной схемы. В отличие от *локальных* параметров, сфера действия *глобальных* параметров может распространяться на все блоки структурной схемы или на их определенную часть, ограниченную субмоделью, в зависимости от того, где объявлен параметр (сигнал или переменная). *Глобальные* параметры задают в текстовом редакторе *скрипта проекта*, доступ к которому осуществляется на вкладке **Скрипт** *схемного окна* проекта или субмодели (рис. 3.75). В текстовом редакторе *скрипта проекта* записывается скрипт (программа) на встроенном языке программирования.

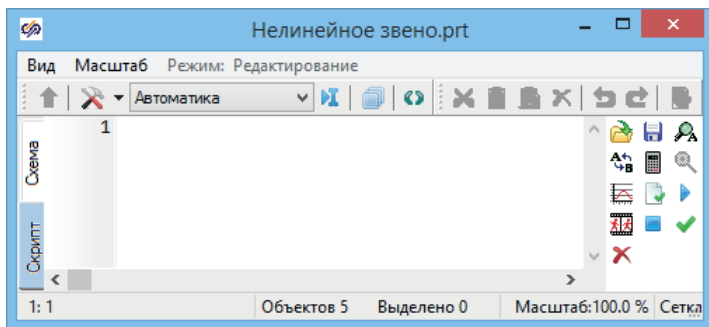


Рис. 3.75. Схемное окно проекта с открытой вкладкой **Скрипт**

Перейдите на вкладку **Скрипт** схемного окна проекта. В редакторе *скрипта проекта* задайте постоянные коэффициенты исходного дифференциального уравнения, введя текст, представленный на рис. 3.76.

```

1 initialization
2 // Постоянные коэффициенты модели
3 a0=1; a1=0.3; a2=1; c=1; k=1;
4 end;
```

Рис. 3.76. Программный код объявления коэффициентов уравнения (3.4) как *глобальных* констант в редакторе *скрипта проекта*

Все постоянные коэффициенты уравнения (3.4) в редакторе *скрипта проекта* заданы как *глобальные* параметры проекта (рис. 3.76). Объявление переменных («a0», «a1», «a2», «c» и «k») произведено внутри секции инициализации (**initialization ... end;**) с целью сокращения расчетов. При этом третья строка программного кода, представленного на рис. 3.76, будет выполняться один раз при запуске задачи на счет, а не на каждом шаге моделирования.

Нажмите на кнопку  **Применить**, расположенную в правой части окна редактора *скрипта проекта* (см. рис. 3.75), – произойдет переход на вкладку **Схема** с сохранением введенного текста скрипта. Те же операции будут выполнены, если нажать на вкладку **Схема**. На этом процедуры задания *глобальных* параметров завершены.

Введите следующие значения свойств блока «Ступенчатое воздействие» (см. рис. 3.74):

- *Время срабатывания* 0;
- *Начальное состояние* 0;
- *Конечное состояние* 1 (можно варьировать от 0,1 до 1).

**Этап 2. Работа с блоком Язык программирования.** Откройте окно текстового редактора алгоритмов блока *Язык программирования* и введите текст программы, приведенный на рис. 3.77, которая реализует математическую модель нелинейного колебательного звена в форме Коши.

```

1 // Описание входов и выходов блока
2 input u; // входной сигнал
3 output y; // сигнал на выходе
4 // Динамические переменные и их начальные значения
5 init x1=0, x2=0;
6 // Система дифференциальных уравнений в форме Коши
7 x1'=x2;
8 x2'=(k/a2)*u-(a1/a2)*(1+c*x1^2)*x2-(a0/a2)*x1;
9 // Значение выходного сигнала
10 y=x1;
```

Рис. 3.77. Программный код в редакторе алгоритмов блока *Язык программирования*, реализующий математическую модель нелинейного колебательного звена в форме Коши

В программном коде, представленном на рис. 3.77, первая исполняемая строка (строка 2) содержит оператор **input**, описывающий входной сигнал в данный блок, включая его имя и размерность. В данном примере исполняемый код «**input** u;» присваивает первому (и единственному) входу уникальное имя «u». Если бы, например, этот блок имел 2 векторных входа, причем первый вход «u» – трехжильный, а второй вход «g» – пятижильный, то первая исполняемая строка имела бы вид: «**input** u[3], g[5];». Для описания размерности входной, выходной переменных используются прямоугольные скобки.

Если блок *Язык программирования* реализует динамическую модель в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши, то перед записью данной системы программный код обязательно должен содержать оператор **init** (строка 5, рис. 3.77), который декларирует динамические переменные и описывает их начальные значения, т. е. начальные условия для вычислений. Для этих переменных далее по тексту записывают обыкновенные дифференциальные уравнения в форме Коши (строки 7 и 8, рис. 3.77). В рассматриваемом примере исполняемая строка «**init** x1=0, x2=0;» объявляет динамические переменные «x1» и «x2» и задает им нулевые начальные значения.

В исполняемых строках 7 и 8 (рис. 3.77) заданы дифференциальные уравнения в форме Коши, где символ апострофа обозначает производную по времени.

Все используемые операторы **input**, **output**, **init** (см. рис. 3.77) декларируют новые переменные, поэтому при написании программы их следует располагать в начале программного кода, до основного текста программы. С целью корректного выполнения программы не рекомендуется использовать одну и ту же переменную для декларирующих операторов. Это может привести к неявному переопределению переменной. В связи с этим в качестве выходной переменной для блока *Язык программирования* в строке 3 «**output** u;» объявлена новая переменная «u» и добавлена строка 10 «u=x1» с присвоением «u» значения переменной «x1», относительно которой решается система уравнений в форме Коши (см. рис. 3.77).

Закройте окно текстового редактора алгоритмов с помощью кнопки  **ОК**, сохранив изменения в программе блока *Язык программирования*.

**Этап 3. Установка параметров интегрирования.** Введите следующие параметры расчета:

- Метод интегрирования **RK45 (классич)**;
- Конечное время расчета **30**;
- Максимальный шаг **0.1**;
- Минимальный шаг **0.01**;
- Шаг синхронизации задачи **0.1**;
- Относительная ошибка **0.001**;
- Абсолютная ошибка **0.001**;
- синхронизация с реальным временем отключена.

**Этап 4. Моделирование переходного процесса, настройка графика.** Для блока *Временной график* измените следующие настройки *графического окна*:

- удалите заголовок графика;
- установите красный цвет линии для графика;



- введите новые названия осей: ось X – **Время t, с**; ось Y – **Значение величины y**.

Клавишей **F9** на клавиатуре запустите созданную задачу на счет. Результат моделирования показан на рис. 3.78.

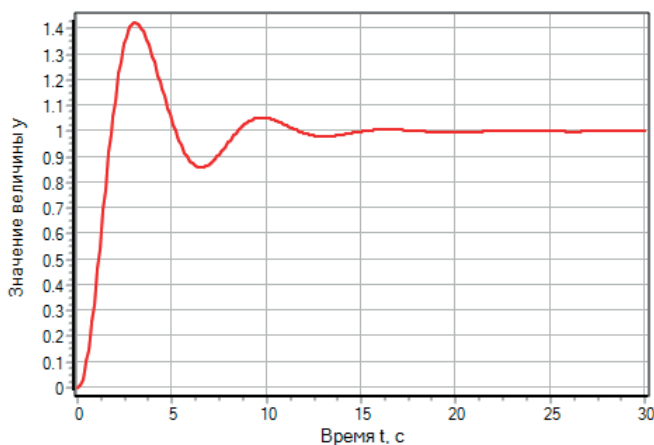


Рис. 3.78. График переходного процесса нелинейного колебательного звена

**Этап 5. Анализ результатов моделирования переходного процесса.** Проведите моделирование переходного процесса при других значениях (в диапазоне 0,1...1,0) ступенчатого входного воздействия, например при 0,1 и 0,55. В результате моделирования должны быть получены переходные процессы, аналогичные изображенным на рис. 3.79 графикам.

Определите степень затухания колебаний  $\varphi$  (см. п. 1.3.2) при различных значениях ступенчатого входного воздействия. Величину  $\varphi$  рекомендуется вычислять по графикам переходных процессов, используя *специальный курсор*, который запускается с помощью команды **Курсор** контекстного меню *графического окна*. Для этого после окончания процесса моделирования следует переместить курсор мыши в рабочую область *графического окна*, вызвать контекстное меню с помощью *правой* клавиши мыши и в появившемся меню выбрать строку «Курсор» (рис. 3.80).

При использовании опции **Курсор** открывается специальное диалоговое окно, в котором отображаются координаты ближайших к курсору точек исследуемого графика, а под курсором мыши выводятся координаты его местоположения на координатной плоскости (рис. 3.81).

Отключение *специального курсора* осуществляется повторным кликом *левой* клавишей мыши по строке «Курсор» контекстного меню *графического окна* (рис. 3.80).

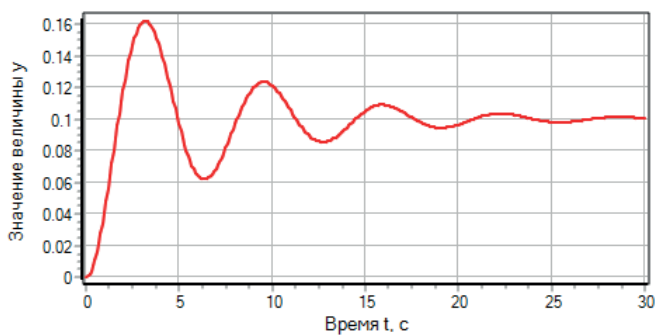
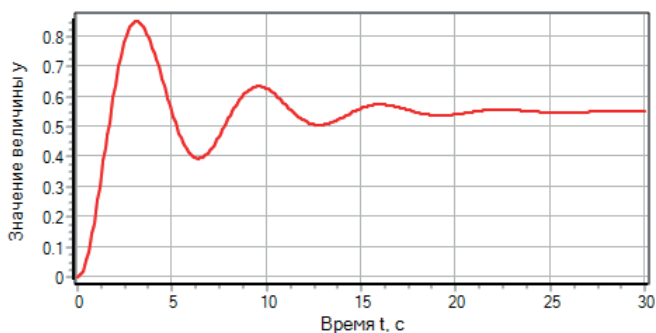
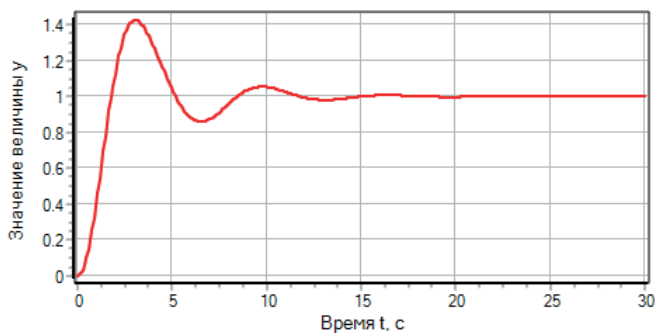
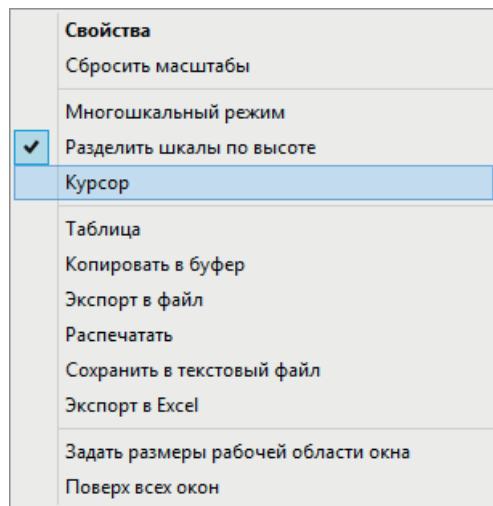
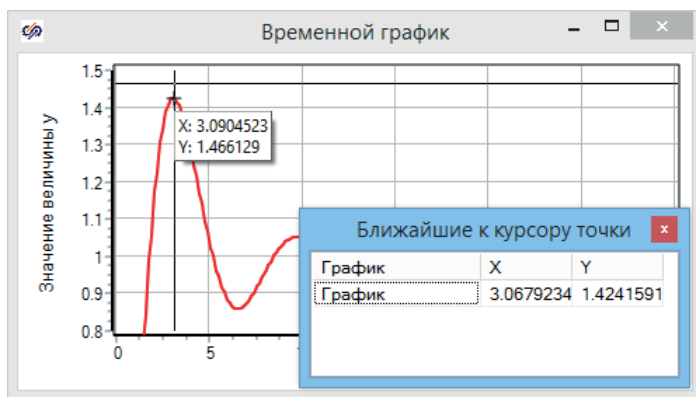
*a**б**в*

Рис. 3.79. Графики переходных процессов нелинейного колебательного звена при ступенчатом входном воздействии  $0,1 \cdot 1(t)$  (а),  $0,55 \cdot 1(t)$  (б) и  $1(t)$  (в)


 Рис. 3.80. Контекстное меню *графического окна*

 Рис. 3.81. *Графическое окно с включенным специальным курсором*

Применительно к графикам, показанным на рис. 3.79, базируясь на приведенных в п. 1.3.2 сведениях, определите тенденцию изменения степени затухания колебаний  $\varphi$  при увеличении значения ступенчатого входного воздействия.

**Пример 3. Моделирование переходного процесса нелинейного динамического звена методом понижения порядка уравнения.**

Демонстрационный пример построен применительно к колебательному звену с переменным демпфированием колебаний, рассмотренному в примере 2. Последовательность действий при моделировании звена с помощью метода понижения порядка дифференциального уравнения следующая.

**Этап 1. Подготовка исходных данных для моделирования.**

Для формирования динамической модели звена с помощью блока *Язык программирования* дифференциальное уравнение (3.4) разрешают относительно старшей производной:

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = -\frac{a_1}{a_2} \left[ 1 + c y^2(t) \right] \frac{dy(t)}{dt} - \frac{a_0}{a_2} y(t) + \frac{k}{a_2} u(t). \quad (3.6)$$

Для удобства записи уравнения (3.6) в блок *Язык программирования* его приводят к следующему виду:

$$y'' = -\frac{a_1}{a_2} \left[ 1 + c y^2 \right] y' - \frac{a_0}{a_2} y + \frac{k}{a_2} u, \quad (3.7)$$

где  $y'' = \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$  – выходная переменная математической модели;

$y' = \frac{dy(t)}{dt}$ ,  $y = y(t)$ ,  $u = u(t)$  – входные переменные математической модели.

В результате реализации такого подхода для решения исходного дифференциального уравнения (3.4) следует использовать структурную схему, представленную на рис. 3.82, где функциональная зависимость  $y'' = f(y', y, u)$  представляет собой уравнение (3.7), входные переменные  $y'$  и  $y$  которой получены последовательным интегрированием выходной переменной  $y''$ .

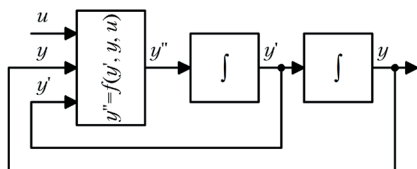


Рис. 3.82. Структурная схема, реализующая математическую модель нелинейного колебательного звена

**Этап 2. Работа с блоком *Язык программирования*.** Создайте новый файл проекта и сохраните его с оригинальным именем, например «Нелинейное звено 2». В *схемное окно* проекта поместите блок *Язык программирования*. Сделайте двукратный щелчок *левой* клавишей мыши на данном блоке – откроется окно текстового редактора алгоритмов блока *Язык программирования*. Введите в него программу для решения уравнения (3.4), текст которой приведен на рис. 3.83.

В программе, приведенной на рис. 3.83, постоянные коэффициенты объявлены как *локальные* параметры (строка 3) для используемого блока *Язык программирования*, поскольку не предполагается их применение вне этого блока. Следует также отметить, что в блоке *Язык программирования* при расчете выходного сиг-

нала  $y''$  выполняются только алгебраические операции (строка 9, рис. 3.83), т. е. отсутствует объявление динамических переменных. Поэтому текст программы не содержит оператора **init**, а символ апострофа является лишь частью имени переменных  $y''$  и  $y'$ .

```

1 initialization
2 // Постоянные коэффициенты модели
3 a0=1; a1=0.3; a2=1; c=1; k=1;
4 end;
5 // Описание входов и выходов блока
6 input u, y, y'; // входные сигналы
7 output y''; // сигнал на выходе
8 // Вычисление выходного сигнала
9 y'' = -(a1/a2)*(1+c*y^2)*y' - (a0/a2)*y + (k/a2)*u;
    
```

Рис. 3.83. Программный код в редакторе алгоритмов блока *Язык программирования*, реализующий математическую модель (3.4)

Кнопкой  **ОК** закройте окно текстового редактора алгоритмов блока *Язык программирования*. После сохранения новой программы у блока появятся три входных порта и останется один выходной порт. Этому будет соответствовать изображение блока в *схемном окне* проекта, показанное на рис. 3.84.

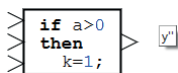


Рис. 3.84. Изображение блока *Язык программирования* с тремя входными портами и одним выходным портом

Входные и выходные порты блока по умолчанию расположены следующим образом: сверху вниз – от первого до последнего. В соответствии с программным кодом, приведенным на рис. 3.83 (строка 6), верхнему входу соответствует переменная  $u$ , среднему –  $y$ , нижнему –  $y'$ . Уточнить переменную, связанную с входным, выходным портом блока, можно через всплывающую подсказку, отображаемую справа от курсора мыши при его расположении в области «притяжения» порта. На рис. 3.84 справа от блока *Язык программирования* отображена всплывающая подсказка для выходного порта.

### Этап 3. Создание структурной схемы моделирования, ввод ее параметров.

В *схемное окно* проекта введите структурную схему моделирования, представленную на рис. 3.85.

Для изменения расположения входов блока *Язык программирования* (рис. 3.85) вызовите диалоговое окно данного блока с помощью кнопки  **Свойства** и перейдите на вкладку **Порты**. Установите водным портам  $y$ ,  $y'$  расположение «Снизу».

Введите свойства для блока «Ступенчатое воздействие» (рис. 3.85): *Время срабатывания* 0; *Начальное состояние* 0; *Конечное состояние* 1.

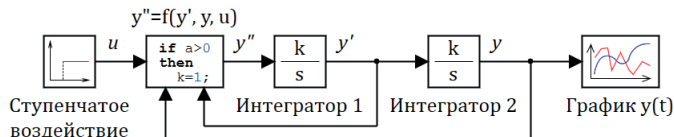
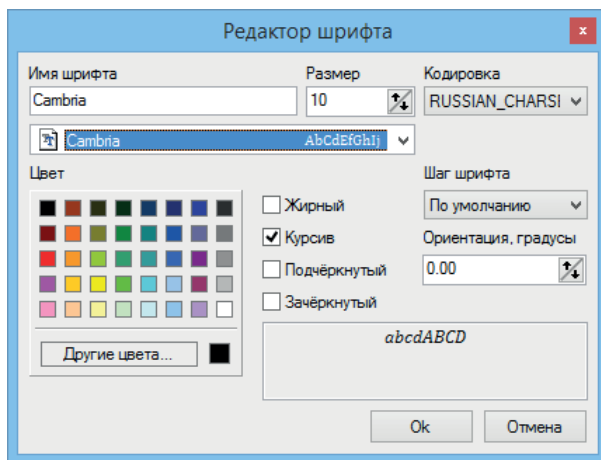


Рис. 3.85. Структурная схема моделирования нелинейного звена

Свойства блоков «Интегратор 1» и «Интегратор 2» (рис. 3.85) не требуют редактирования, т. е. остаются заданными по умолчанию (*Коэффициенты усиления [1]; Начальные условия [0]*).

Для обозначения входных, выходных переменных блоков на структурной схеме, представленной на рис. 3.85, воспользуйтесь блоком *Заметка*. Форматирование текста заметки осуществляется посредством интерфейса специального диалогового окна **Редактор шрифта**, представленного на рис. 3.86.

Рис. 3.86. Специальное диалоговое окно  
**Редактор шрифта**

Для вызова данного диалогового окна проделайте следующее. Выделите текст заметки, нажмите кнопку **Свойства** – откроется диалоговое окно блока *Заметка*. Перейдите на вкладку **Общие**, выделите значение в строке **Шрифт** и нажмите на кнопку , появившуюся справа от названия шрифта.

Отформатируйте текст заметок в соответствии с настройками, представленными на рис. 3.86.

**Этап 4. Моделирование переходного процесса.** Используйте параметры интегрирования из примера 2 (**этап 3**). Откройте *графическое окно* блока *Временной график* и настройте его, как в примере 2 (**этап 4**).

Кнопкой **Пуск** запустите созданную задачу на счет. После окончания расчета в *графическом окне* будет построен график переходного процесса, изображен-

ный на рис. 3.87. Его сравнение с графиком, приведенным на рис. 3.78, свидетельствует об идентичности результатов исследования нелинейного звена с помощью различных по форме моделей.

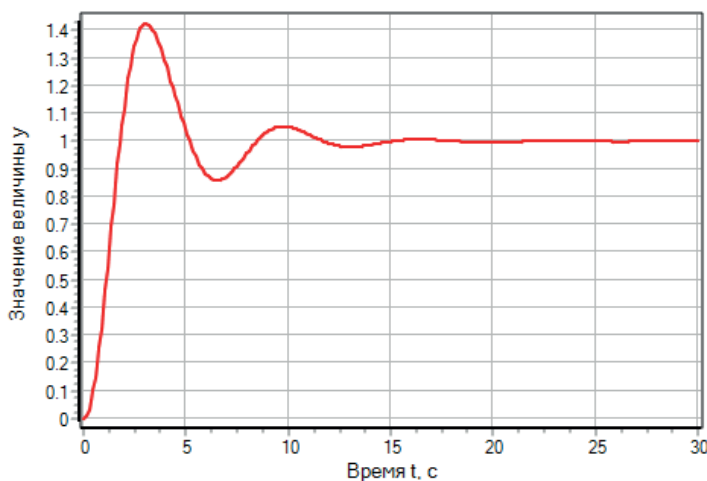


Рис. 3.87. График переходного процесса нелинейного звена

**Исходные данные для выполнения индивидуального задания.** На ремонтных предприятиях в технологических линиях разборки и сборки механизмов и машин используют подъемные механизмы, большинство из которых оснащено электроприводами с асинхронными короткозамкнутыми двигателями, не позволяющими регулировать скорость вертикального перемещения узлов и деталей при их монтаже. Этот недостаток электропривода можно устранить на основе режимов динамического торможения двигателя [16, 17], один из которых реализован с помощью САР, показанной на рис. 3.88, где: 1, 2 и 4 – редуктор, барабан и приводной асинхронный электродвигатель подъемного механизма; 3 – опускаемая деталь (узел); 5 – тахогенератор для контроля угловой скорости двигателя; 6 – регулируемый выпрямитель; 7 – усилитель; 8 – задающий потенциометр.

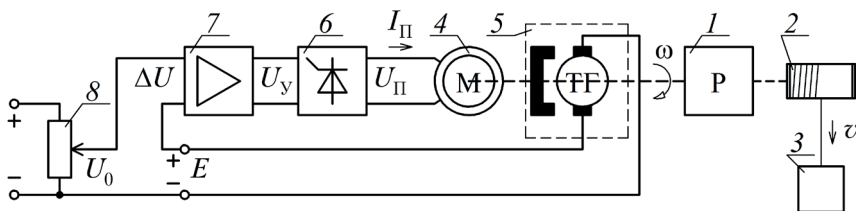


Рис. 3.88. Принципиальная схема САР скорости опускания грузов

Прежде чем рассматривать принцип работы САР в целом, рассмотрим особенности работы асинхронного двигателя 4 в режиме динамического торможения,

который в данной системе совместно с трансмиссией 1, 2 и грузом 3 можно рассматривать как объект регулирования (ОР). При увеличении напряжения  $U_{II}$ , а следовательно, и постоянного тока подмагничивания  $I_{II}$ , тормозной момент двигателя возрастает, что приводит к снижению угловой (линейной) скорости  $\omega$  ( $v$ ). При снижении напряжения  $U_{II}$  будет иметь место обратный эффект. Данное обстоятельство свидетельствует об инвертирующих свойствах объекта регулирования.

САР (рис. 3.88) в целом работает следующим образом. ЭДС тахогенератора  $E$ , прямо пропорционально зависящая от угловой скорости  $\omega$  приводного электродвигателя, сравнивается с задающим напряжением  $U_0$ , которое снимается с задающего потенциометра 8. Сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - E$  (или  $\Delta U = U_0 + E$  с учетом инвертирующих свойств объекта регулирования) подается на электронный усилитель 7, с выхода которого напряжение  $U_y$  поступает на регулируемый выпрямитель 6. Его выходное напряжение  $U_{II}$  подается на электродвигатель 5, при увеличении которого скорость  $\omega$  ( $v$ ) уменьшается до заданного значения. При уменьшении напряжения  $U_{II}$  имеет место обратный эффект – скорость  $\omega$  ( $v$ ) будет снижаться до заданного значения. Следовательно, при увеличении задающего напряжения  $U_0$  скорость  $\omega$  ( $v$ ) будет снижаться, а при его уменьшении – увеличиваться.

Функциональная схема САР показана на рис. 3.89, где: ОР – объект регулирования – электродвигатель 4 совместно с трансмиссией (редуктор 1, барабан 2) и опускаемой деталью 3; ТГ – тахогенератор 5; СО – сравнивающий орган (схема сравнения сигналов  $U_0$  и  $E$ ); У – электронный усилительный 7; РВ – регулируемый тиристорный выпрямитель 6.

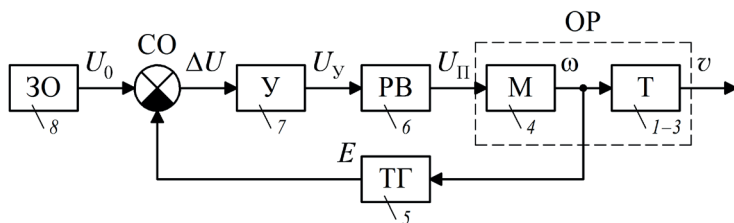


Рис. 3.89. Функциональная схема САР скорости опускания грузов

Структурная схема САР изображена на рис. 3.90.

Математическое описание звеньев структурной схемы следующее.

Электропривод с асинхронным двигателем в режиме динамического торможения, движение которого при допущении, что упругие свойства канатной системы отсутствуют, описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$J_{ЭП} \frac{d\omega}{dt} = M_D - M_T - M_{ВТ}, \quad (3.8)$$

где  $J_{ЭП}$  – эквивалентный (приведенный к валу электродвигателя) момент инерции электропривода (вращающихся элементов электродвигателя, редуктора, барабана и поступательно движущейся монтируемой детали),  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\omega$  – угловая скорость двигателя,  $\text{рад/с}$ ;

$M_D$  – движущий момент, создаваемый силой веса детали, приведенный к валу электродвигателя (постоянная величина для конкретной детали),  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;



$M_T$  – тормозной момент асинхронного двигателя в режиме динамического торможения, Н·м;

$M_{BT}$  – момент сил вязкого трения, приведенный к валу двигателя, Н·м.

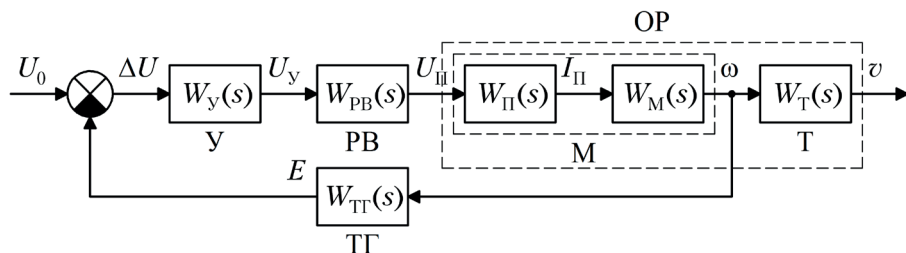


Рис. 3.90. Структурная схема САР скорости опускания грузов

Тормозной момент асинхронного двигателя [16]:

$$M_T = \frac{aI_{\Pi}^2 \omega}{b^2 + \omega^2}, \quad (3.9)$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от схемы подключения обмоток статора к источнику постоянного тока, индуктивного фазного сопротивления ротора, индуктивного сопротивления рассеяния контура намагничивания электродвигателя, Ом;

$I_{\Pi}$  – постоянный ток подмагничивания (возбуждения), А;

$b$  – коэффициент, зависящий от критического скольжения асинхронного двигателя в режиме торможения, рад/с.

Момент сил вязкого трения:

$$M_{BT} = c\omega, \quad (3.10)$$

где  $c$  – коэффициент вязкого трения, Н·м/(рад/с).

С учетом (3.9) и (3.10) уравнение динамики электропривода как объекта регулирования примет следующий вид:

$$J_{ЭП} \frac{d\omega}{dt} = M_d - \frac{aI_{\Pi}^2 \omega}{b^2 + \omega^2} - c\omega. \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) нелинейное. Его нелинейные свойства определяет второе слагаемое в правой части уравнения. Все остальные звенья структурной схемы САР (рис. 3.90) являются линейными, их передаточные функции приведены ниже.

Передаточная функция трансмиссии:

$$W_T(s) = k_T,$$

где  $k_T$  – коэффициент передачи, м/рад.

Передаточный коэффициент трансмиссии определяется следующим отношением:

$$k_T = r/i,$$

где  $r$  – радиус навивки каната (барабана), м;  
 $i$  – передаточное отношение (число) редуктора.

Передаточная функция тахогенератора:

$$W_{\text{ТГ}}(s) = k_{\text{ТГ}}$$

где  $k_{\text{ТГ}}$  – коэффициент передачи, В·с/рад.

Передаточная функция регулируемого тиристорного выпрямителя:

$$W_{\text{РВ}}(s) = \frac{k_{\text{РВ}}}{T_{\text{РВ}}s + 1},$$

где  $k_{\text{РВ}}$  – передаточный коэффициент;  
 $T_{\text{РВ}}$  – постоянная времени, с.

Передаточная функция электронного усилителя:

$$W_{\text{У}}(s) = k_{\text{У}},$$

где  $k_{\text{У}}$  – передаточный коэффициент.

Передаточная функция звена, отображающего процесс преобразования напряжения  $U_{\text{П}}$  в ток  $I_{\text{П}}$ :

$$W_{\text{П}}(s) = \frac{k_{\text{П}}}{T_{\text{П}}s + 1},$$

где  $k_{\text{П}}$  – коэффициент передачи ( $k_{\text{П}} = 1/R$ , здесь  $R$  – активное сопротивление обмоток электродвигателя, Ом), А/В;  
 $T_{\text{П}}$  – постоянная времени ( $T_{\text{П}} = L/R$ , здесь  $L$  – индуктивность обмотки двигателя, Гн), с.

**Структурная схема САР скорости опускания грузов (рис. 3.90) является основной при выполнении индивидуальных заданий** с учетом следующих значений параметров системы:  $J_{\text{ЭП}} = 0,0163 \text{ кг·м}^2$ ;  $a = 26,9 \text{ Ом}$ ;  $b = 5,15 \text{ рад/с}$ ;  $c = 0,012 \text{ Н·м/(рад/с)}$ ;  $r = 0,06 \text{ м}$ ;  $i = 31,5$ ;  $R = 52,4 \text{ Ом}$ ;  $L = 0,3 \text{ Гн}$ ;  $k_{\text{ТГ}} = 0,1 \text{ В·с/рад}$ ;  $k_{\text{РВ}} = 2$ ;  $T_{\text{РВ}} = 0,03 \text{ с}$ ;  $k_{\text{У}} = 20$ ;  $M_{\text{Д}} = 2,5 \text{ Н·м}$ , а также при различных условиях, указанных в приведенных ниже вариантах.

Прежде чем перейти к описанию вариантов индивидуальных заданий, кратко рассмотрим некоторые операции при сборке отремонтированного агрегата с помощью подъемного механизма (к примеру, тали). Сущность и последовательность операций следующая:

- с помощью механизма горизонтального перемещения тали отремонтированную деталь перемещают в зону сборки агрегата;
- деталь опускают с номинальной скоростью и останавливают ее на определенном расстоянии от агрегата (удобном для ее последующего монтажа);
- с помощью приводов горизонтального перемещения тали деталь, по возможности точнее, располагают над местом ее установки в агрегате;
- при  $\omega = 0$  включают в работу САР (рис. 3.88) и на пониженной скорости устанавливают деталь в нужном месте агрегата (значение скорости задают с помощью резистора 8).

Следует отметить, что при монтажных работах возможны режимы работы САР при  $\omega \neq 0$ .

## Варианты индивидуальных заданий

**Вариант 1.** Выполните моделирование процесса регулирования скорости подъемного механизма, используя в качестве динамической модели объекта регулирования уравнение (3.11), представленное в форме Коши и реализованное с помощью блока *Язык программирования* при нулевом начальном значении угловой скорости  $\omega$  и различных значениях задающего воздействия  $U_0$  от 0,1 до 3,0 В (см. **пример 2**). Параметры (свойства) блоков структурной модели САР задайте как *локальные*.

**Вариант 2.** Условие задания аналогично **варианту 1**, но параметры передаточных функций и блока *Язык программирования* задайте как *глобальные*, используя редактор *скрипта проекта*.

**Вариант 3.** Выполните моделирование процесса регулирования скорости подъемного механизма, используя в качестве динамической модели объекта регулирования уравнение (3.11), реализованное в структурной модели САР с помощью блока *Язык программирования* и метода понижения дифференциального уравнения (см. **пример 3**) при нулевом начальном значении угловой скорости  $\omega$  и изменениях задающего воздействия  $U_0$  от 0,1 до 3,0 В. Параметры (свойства) блоков структурной модели САР задайте как *локальные*.

**Вариант 4.** Условие задания аналогично **варианту 3**. Параметры передаточных функций и блока *Язык программирования* задайте как *глобальные*, используя редактор *скрипта проекта*.

**Вариант 5.** Выполните моделирование процесса регулирования скорости подъемного механизма, используя в качестве динамической модели объекта регулирования уравнение (3.11), представленное в форме Коши и реализованное с помощью блока *Язык программирования* при  $k_{\text{ТГ}} = 0,2$  В·с/рад, нулевом начальном значении угловой скорости  $\omega$  и различных значениях задающего воздействия  $U_0$  от 0,1 до 3,0 В. Параметры (свойства) блоков структурной модели САР задайте как *локальные*.

**Вариант 6.** Условие задания аналогично **варианту 5**, но параметры передаточных функций и блока *Язык программирования* задайте как *глобальные*, используя редактор *скрипта проекта*.

**Вариант 7.** Выполните моделирование процесса регулирования скорости подъемного механизма, используя в качестве динамической модели объекта регулирования уравнение (3.11), реализованное в структурной модели САР с помощью блока *Язык программирования* и метода понижения дифференциального уравнения (см. **пример 3**) при  $k_{\text{ТГ}} = 0,2$  В·с/рад, нулевом начальном значении угловой скорости  $\omega$  и изменениях задающего воздействия  $U_0$  от 0,1 до 3,0 В. Параметры (свойства) блоков структурной модели САР задайте как *локальные*.

**Вариант 8.** Условие задания аналогично **варианту 7**. Параметры передаточных функций и блока *Язык программирования* задайте как *глобальные*, используя редактор *скрипта проекта*.

**Вариант 9.** Выполните моделирование процесса регулирования скорости подъемного механизма, используя в качестве динамической модели объекта регулирования уравнение (3.11), представленное в форме Коши и реализованное с помощью блока *Язык программирования* при начальном значении угловой скорости  $\omega = 30$  рад/с и различных значениях задающего воздействия  $U_0$  от 0,1 до 3,0 В. Параметры (свойства) блоков структурной модели САР задайте как *локальные*.

**Вариант 10.** Условие задания аналогично **варианту 9**, но параметры передаточных функций и блока *Язык программирования* задайте как *глобальные*, используя редактор *скрипта проекта*.

**Вариант 11.** Выполните моделирование процесса регулирования скорости подъемного механизма, используя в качестве динамической модели объекта регулирования уравнение (3.11), реализованное в структурной модели САР с помощью блока *Язык программирования* и метода понижения дифференциального уравнения (см. **пример 3**) при начальном значении угловой скорости  $\omega = 30$  рад/с и изменениях задающего воздействия  $U_0$  от 0,1 до 3,0 В. Параметры (свойства) блоков структурной модели САР задайте как *локальные*.

**Вариант 12.** Условие задания аналогично **варианту 11**. Параметры передаточных функций и блока *Язык программирования* задайте как *глобальные*, используя редактор *скрипта проекта*.

**Вариант 13.** Выполните моделирование процесса регулирования скорости подъемного механизма, используя в качестве динамической модели объекта регулирования уравнение (3.11), представленное в форме Коши и реализованное с помощью блока *Язык программирования* при  $k_{\text{ТТ}} = 0,2$  В·с/рад, начальном значении угловой скорости  $\omega = 30$  рад/с и различных значениях задающего воздействия  $U_0$  от 0,1 до 3,0 В. Параметры (свойства) блоков структурной модели САР задайте как *локальные*.

**Вариант 14.** Условие задания аналогично **варианту 13**, но параметры передаточных функций и блока *Язык программирования* задайте как *глобальные*, используя редактор *скрипта проекта*.

**Вариант 15.** Выполните моделирование процесса регулирования скорости подъемного механизма, используя в качестве динамической модели объекта регулирования уравнение (3.11), реализованное в структурной модели САР с помощью блока *Язык программирования* и метода понижения дифференциального уравнения (см. **пример 3**) при  $k_{\text{ТТ}} = 0,2$  В·с/рад, начальном значении угловой скорости  $\omega = 30$  рад/с и изменениях задающего воздействия  $U_0$  от 0,1 до 3,0 В. Параметры (свойства) блоков структурной модели САР задайте как *локальные*.

**Вариант 16.** Условие задания аналогично **варианту 15**. Параметры передаточных функций и блока *Язык программирования* задайте как *глобальные*, используя редактор *скрипта проекта*.

**Порядок выполнения индивидуального задания.** На основе структурной схемы (см. рис. 3.90) для заданного варианта подготовьте исходные данные для компьютерного моделирования САР: используя приложение Ж, составьте структурную схему моделирования САР; основываясь на рекомендациях раздела 2, определите необходимые параметры расчета.

Выполните компьютерное моделирование заданной САР и по графикам переходных процессов оцените ее качество. На основе результатов моделирования САР постройте зависимость  $v = f(U_0)$ .

**Содержание отчета.** В отчете следует привести исходную структурную схему САР, ее структурную схему моделирования, числовые данные, необходимые для работы в среде SimInTech, график переходного процесса, результаты оценки качества системы, график зависимости  $v = f(U_0)$  и выводы по работе.

---

**Примечание:** дополнительные материалы к лабораторной работе приведены в п. 3.1 приложения 3.

---

## Контрольные вопросы и задания

1. Что представляет собой нелинейная САР?
2. Какова сущность линеаризации нелинейных статических характеристик и нелинейных дифференциальных уравнений на основе ряда Тейлора?
3. Каковы назначение и возможности блока *Язык программирования* при моделировании нелинейных САР?
4. Каков принцип работы САР температуры в термической камере?
5. Почему САР температуры в термической камере является нелинейной?
6. Каков принцип работы САР скорости опускания грузов?
7. Почему САР скорости опускания грузов относится к классу нелинейных систем?
8. Какие исходные данные необходимы для моделирования САР в среде SimInTech?

## Работа 7. Моделирование САР с помощью блока *Переменные состояния*

### Цели работы:

- закрепить понятия и вопросы, относящиеся к математическому описанию САР в форме Коши и векторно-матричной форме;
- освоить методику преобразования моделей САР, заданных системой алгебро-дифференциальных уравнений, в векторно-матричные модели;
- освоить методику и процедуры моделирования САР в среде SimInTech с использованием блока *Переменные состояния*.

**Теоретический материал, необходимый для выполнения работы.** Необходимо владеть общими приемами и процедурами работы в среде SimInTech (см. лабораторные работы 1 и 2), знать материал по элементам матричного исчисления (понятия скаляра, вектора, матрицы) [18], по математическому описанию автоматических систем в пространстве состояний (см. п. 1.1.2). Помимо этого, следует знать порядок и процедуры работы с блоком *Переменные состояния* (см. п. 3.1.5 справочной системы SimInTech).

### Последовательность выполнения лабораторной работы:

- освоить приемы работы с блоком *Переменные состояния* на базе демонстрационного примера;

- для заданной САР, динамические свойства которой описаны линейной системой дифференциальных и алгебраических уравнений, определить математическую модель в пространстве состояний и на ее основе выполнить компьютерное моделирование.

## Демонстрационный пример

Демонстрационный пример построен на основе следящей системы (рис. 1.7), рассмотренной в п. 1.1.2. В этом примере определена ее математическая модель в векторно-матричной форме (в пространстве состояний). В среде SimInTech (в блоке *Переменные состояния*) подобные модели при начальных условиях  $x(0)$  в обобщенном виде формализованы посредством системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t); \\ y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t), \end{cases} \quad (3.12)$$

где  $\dot{x}(t)$  – вектор-столбец (вектор) производных переменных состояния;

$x(t)$  – вектор-столбец (вектор) переменных состояния;

$y(t)$  – вектор-столбец (вектор) выходных величин (координат);

$u(t)$  – вектор-столбец (вектор) входных воздействий;

$x(0)$  – вектор-столбец (вектор) начальных условий;

$A$  – матрица системы;

$B$  – матрица входа;

$C$  – матрица выхода;

$D$  – матрица обхода (матрица прямой связи), она в большинстве случаев является нулевой, ненулевые элементы матрицы могут быть в моделях многосвязанных САУ (САУ).

Математическому описанию непрерывной линейной системы в виде (3.12) соответствует структурная модель, показанная на рис. 3.91.

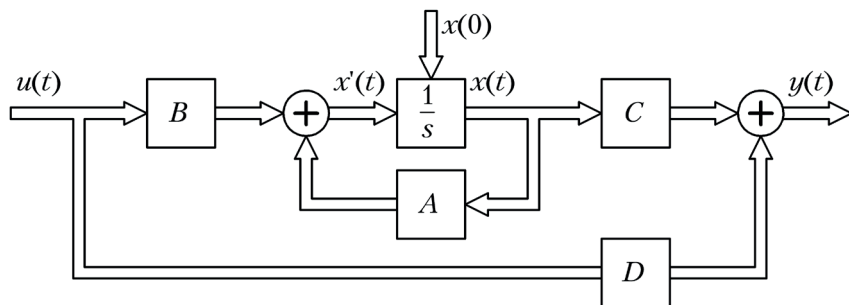


Рис. 3.91. Структурная векторно-матричная модель непрерывной линейной САУ (САУ)

Первое уравнение системы (3.12) описывает динамику САУ. Оно в развернутом виде в общем случае представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений первого порядка, записанных в форме Коши:

$$\left\{ \begin{array}{l} x'_1(t) = a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + \dots + a_{1N_x}x_{N_x}(t) + \\ + b_{11}u_1(t) + b_{12}u_2(t) + \dots + b_{1N_u}u_{N_u}(t); \\ x'_2(t) = a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + \dots + a_{2N_x}x_{N_x}(t) + \\ + b_{21}u_1(t) + b_{22}u_2(t) + \dots + b_{2N_u}u_{N_u}(t); \\ \dots; \\ x'_{N_x}(t) = a_{N_x1}x_1(t) + a_{N_x2}x_2(t) + \dots + a_{N_xN_x}x_{N_x}(t) + \\ + b_{N_x1}u_1(t) + b_{N_x2}u_2(t) + \dots + b_{N_xN_u}u_{N_u}(t), \end{array} \right. \quad (3.13)$$

где  $N_x$  – порядок САР (количество линейных дифференциальных уравнений первого порядка);

$N_u$  – количество входов (внешних входных воздействий).

Матрицы  $A$  и  $B$ , векторы-столбцы  $x'(t)$ ,  $x(t)$  и  $u(t)$ , входящие в (3.12), применительно к (3.13) записываются в следующем виде:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N_x} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N_x} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N_x1} & a_{N_x2} & \dots & a_{N_xN_x} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1N_u} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2N_u} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{N_x1} & b_{N_x2} & \dots & b_{N_xN_u} \end{bmatrix}; \quad (3.14)$$

$$x'(t) = \begin{bmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \\ \dots \\ x'_{N_x}(t) \end{bmatrix}; \quad x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_{N_x}(t) \end{bmatrix}; \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_{N_u}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Второе уравнение системы (3.12) – алгебраическое. Его называют уравнением выходов, или выходным уравнением. Оно в общем случае в развернутом виде записывается как

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1(t) = c_{11}x_1(t) + c_{12}x_2(t) + \dots + c_{1N_x}x_{N_x}(t) + \\ + d_{11}u_1(t) + d_{12}u_2(t) + \dots + d_{1N_y}u_{N_y}(t); \\ y_2(t) = c_{21}x_1(t) + c_{22}x_2(t) + \dots + c_{2N_x}x_{N_x}(t) + \\ + d_{21}u_1(t) + d_{22}u_2(t) + \dots + d_{2N_y}u_{N_y}(t); \\ \dots; \\ y_{N_y}(t) = c_{N_y1}x_1(t) + c_{N_y2}x_2(t) + \dots + c_{N_yN_x}x_{N_x}(t) + \\ + d_{N_y1}u_1(t) + d_{N_y2}u_2(t) + \dots + d_{N_yN_y}u_{N_y}(t), \end{array} \right. \quad (3.16)$$

где  $N_y$  – количество выходов (выходных величин).

Матрица  $C$ ,  $D$  и вектор-столбец  $y(t)$ , входящие в (3.12), применительно к (3.13) записываются в следующем виде:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1N_x} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2N_x} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{N_y 1} & c_{N_y 2} & \dots & c_{N_y N_x} \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1N_u} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2N_u} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{N_u 1} & d_{N_u 2} & \dots & d_{N_u N_u} \end{bmatrix}; \quad (3.17)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_{N_y}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

В частном случае, для рассматриваемой следящей системы, применительно к (3.12) координатам векторов:

- состояния  $x(t)$  соответствуют  $I_{\text{я}} = x_1(t)$ ,  $\omega = x_2(t)$ ,  $\varphi = x_3(t)$ ,  $N_x[3]$ ;
- координаты вектора входных воздействий  $u(t)$  –  $\omega_0 = g_1 = u_1(t)$ ,  $\varphi_0 = g_2 = u_2(t)$ ,  $N_u[2]$ ;
- координаты вектора выходных воздействий  $y(t)$  –  $\omega = x_2(t) = y_1(t)$ ,  $\varphi = x_3(t) = y_2(t)$ ,  $N_y[2]$ .

Применительно к следящей системе с учетом этих обозначений на основе (3.13) уравнения динамики в форме Коши примут вид:

$$\begin{cases} x'_1(t) = a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + a_{13}x_3(t) + b_{11}u_1(t) + b_{12}u_2(t); \\ x'_2(t) = a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + a_{23}x_3(t) + b_{21}u_1(t) + b_{22}u_2(t); \\ x'_3(t) = a_{31}x_1(t) + a_{32}x_2(t) + a_{33}x_3(t) + b_{31}u_1(t) + b_{32}u_2(t), \end{cases} \quad (3.19)$$

а на основе (3.16) уравнения выхода запишутся как:

$$\begin{cases} y_1(t) = c_{11}x_1(t) + c_{12}x_2(t) + c_{13}x_3(t) + d_{11}u_1(t) + d_{12}u_2(t); \\ y_2(t) = c_{21}x_1(t) + c_{22}x_2(t) + c_{23}x_3(t) + d_{21}u_1(t) + d_{22}u_2(t). \end{cases} \quad (3.20)$$

Матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ , сформированные на основе (3.19) и (3.20), имеют следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

где  $a_{11} = -\frac{R_{\text{я}} + k_{\text{гТ}} k_{\text{УМ}} R_{\text{ш}}}{L_{\text{я}}}$ ,  $a_{12} = -\frac{k_e + k_1 k_{\text{УМ}} k_{\text{г}}}{L_{\text{я}}}$ ,  $a_{13} = -\frac{k_1 k_{\text{УМ}} k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}}$ ,  $a_{21} = \frac{k_m}{J}$ ,  $a_{22} = -\frac{1}{T_m}$ ,  $a_{23} = 0$ ,  $a_{31} = 0$ ,  $a_{32} = 1$ ,  $a_{33} = 0$ ;



$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix}, \quad (3.22)$$

$$\text{где } b_{11} = \frac{k_1 k_{\text{ум}} k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}}, b_{12} = -\frac{k_1 k_{\text{ум}} k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}}, b_{21} = 0, b_{22} = 0, b_{31} = 0, b_{32} = 0;$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

$$\text{где } c_{11} = 0, c_{12} = 1, c_{13} = 0, c_{21} = 0, c_{22} = 0, c_{23} = 1;$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}, \quad (3.24)$$

где  $d_{11} = 0, d_{12} = 0, d_{21} = 0, d_{22} = 0$  (для рассматриваемой следящей системы матрица  $D$  нулевая).

Числовые значения параметров элементов и устройств системы, с учетом принятых в п. 1.1.2 обозначений и физических размерностей, следующие:  $k_{\text{п}} = 0,26$  В/рад;  $k_{\text{т}} = 1$  В·с/рад;  $R_{\text{ш}} = 0,1$  Ом;  $k_{\text{дт}} = 15$ ;  $k_1 = \text{var}(5...50)$ ;  $k_{\text{ум}} = 26$ ;  $k_e = 2$  В·с/рад;  $k_m = 2$  Н·м/А;  $L_{\text{я}} = 0,13$  Гн;  $R_{\text{я}} = 2,6$  Ом;  $J = 0,115$  кг·м<sup>2</sup>;  $r = 0,23$  Н·м·с/рад;  $T_{\text{м}} = 0,5$  с.

Последовательность выполнения демонстрационного примера следующая.

**Этап 1. Подготовка данных, необходимых для моделирования.** В соответствии с рекомендациями, изложенными в п. 2.1, подготовка исходных данных в основном сводится к составлению структурной схемы моделирования проектируемой (исследуемой) САР и к определению параметров расчета (данных, вводимых в компьютерную модель системы посредством специальных процедур).

Структурная схема моделирования следящей системы показана на рис. 3.92. Назначение блоков схемы описано далее по тексту.

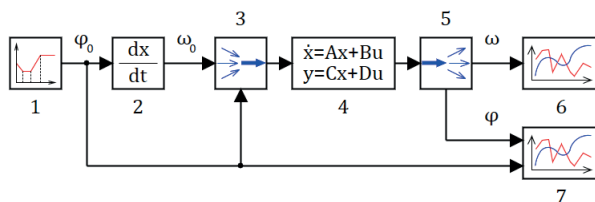


Рис. 3.92. Структурная схема моделирования следящей системы

Блок «1» *Кусочно-линейная* функция (из библиотеки «Источники») формирует входной сигнал следящей системы – угол поворота  $\varphi_0$  задающей оси ЗО (рис. 1.7). В качестве модели задающего воздействия принята кусочно-линейная функция, показанная на рис. 3.93.

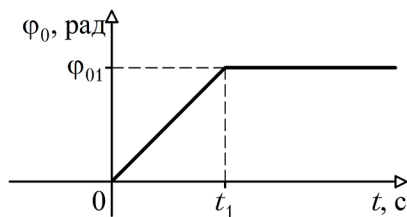


Рис. 3.93. График модели задающего воздействия  $\varphi_0$  следящей системы

Блок «2» *Производная* (из библиотеки «Динамические»), дифференцируя задающее воздействие  $\varphi_0$ , формирует второй входной сигнал следящей системы – угловую скорость  $\omega_0$  задающей оси ЗО (рис. 1.7).

Главным программным ядром структурной схемы (рис. 3.92), реализующим векторно-матричную модель следящей системы, является блок «4» *Переменные состояния* (из библиотеки «Динамические»). Поскольку в рассматриваемой динамической системе имеются два входных сигнала ( $\varphi_0$ ,  $\omega_0$ ) и два выходных ( $\varphi$ ,  $\omega$ ), то для их связи с блоком *Переменные состояния* в структурную схему введены блоки «4» и «5» *Мультиплексор* и *Демультимплексор* (из библиотеки «Векторные»).

Блоки «6» и «7» *Временной график* (из библиотеки «Данные») предназначены для отображения результатов моделирования (в виде графиков или числовых массивов).

Ориентирами для определения параметров расчета для САР, модели которых представлены на основе передаточных функций, являются числовые значения постоянных времени последних. Для систем, динамика которых описана в векторно-матричной форме, числовые значения постоянных времени зачастую в явном виде не просматриваются. В таких случаях анализируют исходные дифференциальные уравнения, на основе которых, после их преобразования в форму Коши, строится модель системы в векторно-матричной форме. Применительно к следящей системе анализ уравнений (1.36) и (1.37) (см. п. 1.1.2), записанных как

$$\frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + I_{\text{я}} + \frac{k_e}{R_{\text{я}}} \omega = \frac{1}{R_{\text{я}}} \{k_{\text{ум}} k_1 [k_{\text{п}} (\varphi_0 - \varphi) + k_{\text{т}} (\omega_0 - \omega)] - k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} R_{\text{ш}} I_{\text{я}}\}$$

$$\text{и } \frac{J}{r} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{k_m}{r} I_{\text{я}},$$

показывает, что параметры расчета следует задавать, ориентируясь на числовые значения электрической  $T_{\text{э}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}}$  и механической  $T_{\text{м}} = J/r$  постоянных времени. Для значений констант  $L_{\text{я}} = 0,13$  Гн;  $R_{\text{я}} = 2,6$  Ом;  $J = 0,115$  кг·м<sup>2</sup>;  $r = 0,23$  Н·м·с/рад, приведенных выше:  $T_{\text{э}} = 0,05$  с и  $T_{\text{м}} = 0,5$  с. С учетом этих числовых значений, на основе рекомендаций, приведенных в п. 2.1, приняты следующие необходимые данные для моделирования следящей системы:

- метод интегрирования «RK45 (классич)»;
- конечное время расчета (время интегрирования) 16 с;
- максимальный шаг интегрирования 0,005 с;
- минимальный шаг интегрирования 0,0001 с;
- шаг синхронизации задачи 0,005 с;
- относительная ошибка 0,001;
- абсолютная ошибка 0,0001;
- синхронизация с реальным временем отключена.

## Этап 2. Разработка структурной схемы моделирования, ввод ее параметров.

Создайте новый файл проекта и сохраните его с оригинальным именем, например «Следящая система». В *схемное окно* проекта введите структурную схему моделирования следящей системы (рис. 3.92).

Параметры модели следящей системы (рис. 3.92) задайте *глобальными*, воспользовавшись редактором *скрипта проекта*. Для этого перейдите на вкладку **Скрипт** *схемного окна* проекта и введите в нее текст программы, представленный на рис. 3.94.

```

1 // Опорные постоянные
2 const
3 kp=0.26, kt=1, k1=5, кум=26, кдт=15, Rш=0.1,
4 ke=2, км=2, Ля=0.13, Ря=2.6, J=0.115, r=0.23;
5 // Определение коэффициентов матриц
6 const
7 a11=-(Ря+кум*кдт*Rш)/Ля, a12=-(ke+кум*k1*kt)/Ля, a13=-(кум*k1*kp)/Ля,
8 a21=км/J, a22=-r/J, a23=0,
9 a31=0, a32=1, a33=0,
10
11 b11=(кум*k1*kt)/Ля, b12=-a13,
12 b21=0, b22=0,
13 b31=0, b32=0,
14
15 c11=0, c12=1, c13=0,
16 c21=0, c22=0, c23=1,
17
18 d11=0, d12=0,
19 d21=0, d22=0;
20 initialization
21 // Формируем матрицы
22 M_A=[[a11, a12, a13], [a21, a22, a23], [a31, a32, a33]];
23 M_B=[[b11, b12], [b21, b22], [b31, b32]];
24 M_C=[[c11, c12, c13], [c21, c22, c23]];
25 M_D=[[d11, d12], [d21, d22]];
26 // Транспонирование матриц
27 M_A=transp(M_A);
28 M_B=transp(M_B);
29 M_C=transp(M_C);
30 M_D=transp(M_D);
31 end;
```

Рис. 3.94. Программный код в редакторе *скрипта проекта*

**Примечание:** при написании программного кода на встроенном языке программирования следует учитывать, что строчные и прописные буквы по умолчанию в идентификаторах (именах констант, переменных, меток, функций и процедур) не различаются («t» и «T» – одинаковые идентификаторы). При необходимости данный параметр настроек ПО SimInTech можно изменить. Идентификаторы могут содержать буквы латинского и русского алфавитов, знак подчеркивания «\_» и цифры. Идентификатор должен начинаться с буквы или знака подчеркивания и может иметь произвольную длину. Не допускается использовать в качестве идентификаторов ключевые слова (эти слова автоматически выделяются при вводе полужирным шрифтом).

Исходные параметры элементов следящей системы (строки 2–4, рис. 3.94) и коэффициенты матриц  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  (строки 6–19, рис. 3.94) инициализированы как константы с помощью ключевого слова **const**. Для сокращения расчетов при моделировании в редакторе *скрипта проекта* (рис. 3.94) использована секция инициализации (**initialization ... end;**).

В блоке *Переменные состояния* матрицы обрабатываются не по строкам (как обычно), а по столбцам. Для учета этой особенности в редакторе *скрипта проекта* введены процедуры транспонирования (строки 27–30, рис. 3.94). Можно было бы обойтись без транспонирования, записав матрицы (3.21)–(3.24) сразу в транспонированном виде в строках 22–25 (рис. 3.94).

Используя известные процедуры задания свойств и параметров блоков структурных схем моделирования, рассмотренные в лабораторных работах 1 и 2, задайте свойства остальным блокам структурной схемы (рис. 3.92) в численном виде.

Приняв для графика задающего воздействия (рис. 3.93)  $t_1 = 4$  с и  $\varphi_{01} = \pi$  рад (половина оборота оси), в диалоговое окно блока *Кусочно-линейная функция* введите соответствующие им числовые значения времени и ординат функции (рис. 3.95). Для задания значения числа  $\pi$  используйте специальную встроенную константу «pi» (рис. 3.95).

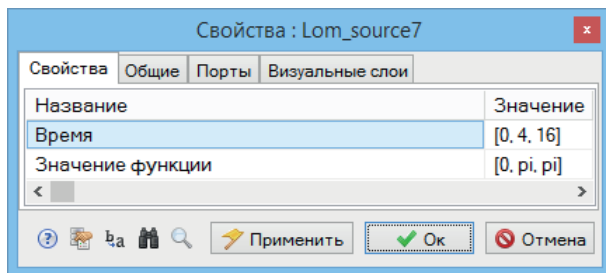


Рис. 3.95. Диалоговое окно блока *Кусочно-линейная функция* с заданными свойствами

Свойства блока *Производная* оставьте заданными по умолчанию, т. к. модель следящей системы рассматривается при нулевых начальных условиях. Не требуют редактирования свойства блоки «3», «5» и «6» (*Мультиплексор*, *Демультимплексор*, *Временной график*). Для второго блока *Временной график* (блок «7») задайте *Количество входных портов* равным 2.

Для удобства восприятия структурной схемы моделирования (рис. 3.92) над линиями связи добавьте названия переменных  $\varphi_0$ ,  $\omega_0$ ,  $\varphi$  и  $\omega$ , воспользовавшись блоками *Заметка*. Отформатируйте текст заметок по настройкам, приведенным на рис. 3.86. Для нижних индексов в названии переменных  $\varphi_0$ ,  $\omega_0$  используйте отдельные блоки *Заметка* с настройками форматирования текста, отличающимися от приведенных на рис. 3.86 размером шрифта (6) и отсутствием курсивного начертания.

**Этап 3. Работа с блоком *Переменные состояния*.** Двукратным щелчком *левой* клавишей мыши на блоке *Переменные состояния* откройте его диалоговое окно (рис. 3.96).

Свойства в диалоговом окне блока *Переменные состояния* могут задаваться двумя способами. Один из них предусматривает запись параметров матриц в числовом виде, как показано на рис. 3.96. Он используется при задании свойств как *локальных* для блока. Второй способ применяется при задании свойств через *глобальные* параметры проекта (субмодели). В рассматриваемом примере применен второй способ.

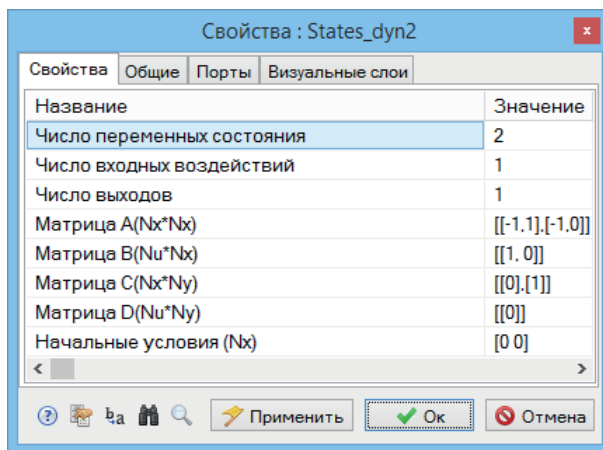


Рис. 3.96. Диалоговое окно блока *Переменные состояния* с заданными по умолчанию свойствами

В открытом диалоговом окне (рис. 3.96) измените значения свойств блока *Переменные состояния* соответствующими данными рассматриваемой следящей системы, как показано на рис. 3.97.

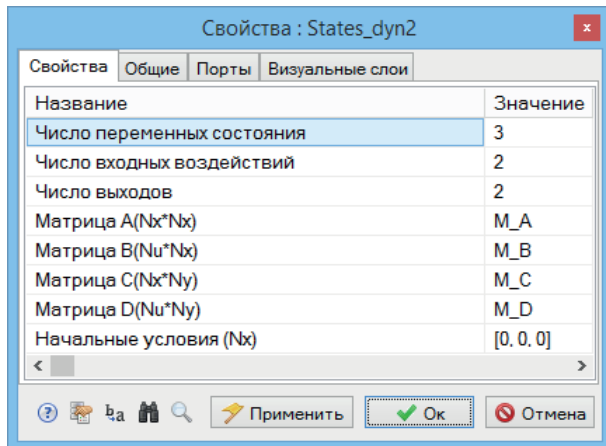


Рис. 3.97. Диалоговое окно блока *Переменные состояния* с заданными свойствами через *глобальные* параметры проекта

Закройте диалоговое окно блока *Переменные состояния* с помощью кнопки **ОК**, сохранив изменения свойств блока.

**Этап 4. Моделирование переходного процесса.** Задайте параметры интегрирования, приведенные в конце **этапа 1**.

Откройте *графическое окно* блока «6» (блок *Временной график*) и измените следующие настройки *графического окна*:

- удалите заголовок графика;
- установите зеленый цвет линии для графика;
- введите новые названия осей: ось X – **Время t, с**; ось Y – **Угловая скорость, рад/с**.

Для блока «7» используйте следующие настройки *графического окна*:

- удалите заголовок графика;
- установите синий и красный цвета линии для графиков;
- введите новые названия осей: ось X – **Время t, с**; ось Y – **Угловое перемещение, рад**.

Кнопкой  **Пуск** запустите созданную задачу на счет. В результате моделирования должны быть получены переходные процессы, изображенные на рис. 3.98 и 3.99.

Главной задачей при проектировании и исследовании САР, в том числе и следящих систем, является задача определения их параметров, при которых достигаются требуемые показатели качества их процессов регулирования (управления). Для следящих систем показатели качества, как правило, рассматривают применительно к процессам регулирования управляемой величины. В рассматриваемой следящей системе такой величиной является угол  $\varphi$  поворота рабочей оси, который является вторым элементом вектора выходных величин  $[\omega, \varphi]$ .

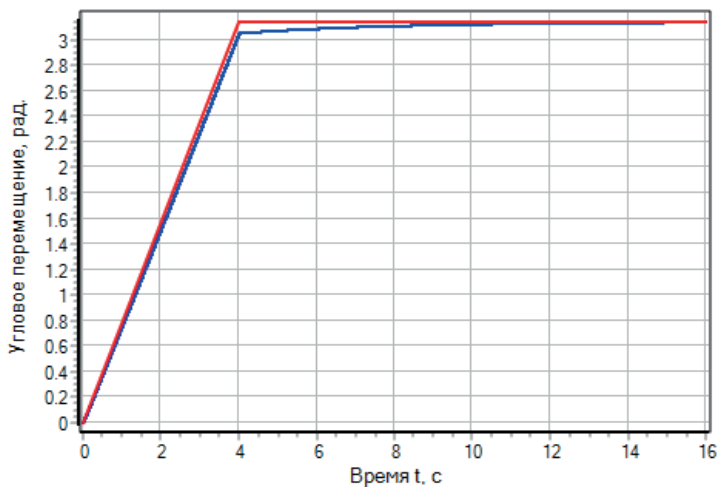


Рис. 3.98. Графики изменения угла поворота задающей (красная кривая) и рабочей осей (синяя кривая)

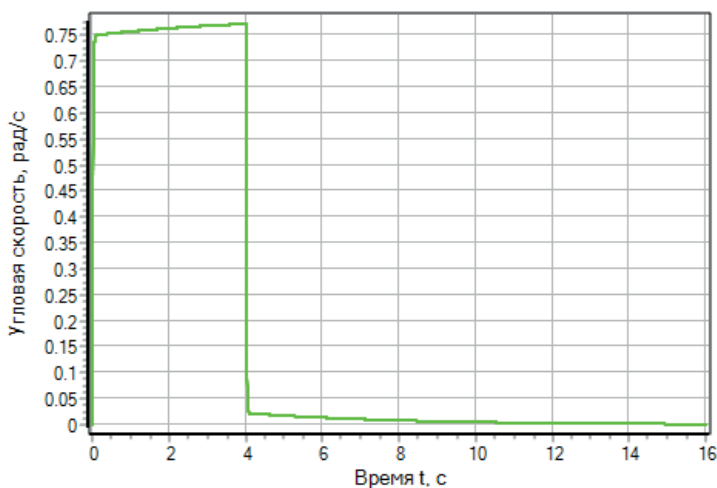


Рис. 3.99. Изменение угловой скорости вращения рабочей оси

В *графическом окне* блока «7» отображаются графики задающего воздействия  $\varphi_0(t)$  (поворот задающей оси) и переходного процесса  $\varphi(t)$  (поворот рабочей оси). Отображение этих графиков в одной системе координат рис. 3.98 позволяет облегчить визуальное сравнение кривых  $\varphi_0(t)$  и  $\varphi(t)$ .

Угловая скорость  $\omega$  вращения рабочей оси является первым элементом вектора выходных величин  $[\omega, \varphi]$ . График ее изменения во времени представлен на рис. 3.99. Его можно использовать для анализа режима работы электродвигателя привода рабочей оси (рис. 1.7).

**Этап 5. Исследование влияния коэффициента усиления  $k_1$  на скоростную ошибку следящей системы (выполняется самостоятельно).** Варьируя значением коэффициента усиления  $k_1$  усилителя напряжения следящей системы (см. рис. 1.7, п. 1.1.2) в пределах от 5 до 50, исследуйте его влияние на скоростную ошибку слежения (см. п. 1.3.2) при линейных задающих воздействиях для трех фиксированных значений  $\varphi_0$ :  $\varphi_{01} = 1/6\pi$ ,  $\varphi_{02} = 2/3\pi$ ,  $\varphi_{03} = \pi$  рад.

## Варианты индивидуальных заданий

В качестве индивидуальных заданий используйте варианты линейных САР, описанные в пп. Б.1–Б.5 и Б.7–Б.9 приложения Б. Целесообразность использования этих САР обоснована тем, что их математическое описание представлено в виде систем дифференциальных и алгебраических уравнений. Такое описание позволяет сравнительно просто, без дополнительных операций, имеющих место в математических моделях САР с передаточными функциями, непосредственно переходить к моделям в векторно-матричной форме.

**Порядок выполнения индивидуального задания.** На основе заданного варианта САР подготовьте математическую модель системы в пространстве состояний и по аналогии с демонстрационным примером выполните моделирование и исследование заданной системы (определите условия существования устойчивых процессов регулирования и их показатели качества).

**Содержание отчета.** В отчете следует привести функциональную схему и исходную математическую модель САР, ее модель в пространстве состояний, числовые данные, необходимые для работы в среде SimInTech, графики переходных процессов, результаты оценки устойчивости и показателей качества системы, а также выводы по работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Что такое скаляр, вектор, матрица?
2. Что такое транспонированная матрица?
3. Что такое запись дифференциального уравнения в форме Коши? Запишите дифференциальное уравнение апериодического звена первого порядка в форме Коши.
4. Составьте параметрическую матрицу системы (матрицу системы), динамика которой в форме Коши описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + b_{11}u_1 + b_{12}u_2; \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3; \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3, \end{cases} \quad (3.25)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – координаты состояния САР;

$\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3$  – производные от координат состояния САР;

$u_1, u_2$  – входные координаты САР;

$a_i, b_i$  – константы, зависящие от параметров САР.



5. На основе системы уравнений (3.25) составьте входную матрицу системы (матрицу входа).
6. Приняв в качестве выходных величин САР (см. вопрос 3)  $x_2$  и  $x_3$ , составьте на основе системы уравнений (3.25) выходную матрицу системы (матрицу выхода).
7. Что такое *локальные* и *глобальные* параметры?
8. Каков «механизм» задания *глобальных* параметров?

## Работа 8. Моделирование цифровых САР

### Цели работы:

- закрепить принципы построения и работы, основные понятия и отдельные положения теории дискретных (импульсных и цифровых) САР;
- освоить методику моделирования процессов регулирования в дискретных САР с помощью ПО SimInTech.

**Теоретический материал, необходимый для выполнения работы.** Знать принципы построения, основные понятия и отдельные вопросы математического описания дискретных САР, в том числе построенных на основе микроЭВМ (см. приложение Д), а также методику их моделирования (см. п. 1.3.7) и функциональные возможности SimInTech применительно к дискретным САР.

### Последовательность выполнения лабораторной работы:

- на демонстрационном примере моделирования цифровой САР (САР с микроЭВМ) освоить и приобрести навыки их анализа и синтеза с помощью ПО SimInTech;
- для заданной САР из приложения Б или для САР, по варианту индивидуального задания (см. табл. 3.7), подготовить исходные данные для моделирования;
- выполнить на компьютере все процедуры, необходимые при моделировании, по аналогии с демонстрационным примером;
- по результатам моделирования определить адекватность непрерывной модели цифровой САР ее непрерывно-дискретной модели.

### Демонстрационный пример

Демонстрационный пример построен на основе САР угловой скорости двигателя постоянного тока (п. Б.4 приложения Б). Применительно к этой системе реализован принцип цифрового регулирования (рис. 3.100, 3.101) посредством одного канала управляющего вычислительного комплекса (УВК). МикроЭВМ УВК формирует задающее воздействие, сравнивает его с сигналом обратной связи и формирует алгоритм регулирования, обеспечивающий следующие показатели процесса регулирования:

- статическая ошибка  $\Delta\omega_{ст} = 0$ ;
- время регулирования при пятипроцентной «трубке»  $t_p \leq 3$  с;
- перерегулирование (колебательность)  $\sigma \leq 20\%$ ;

- количество перерегулирований  $n \leq 3$ ;
- степень затухания  $\varphi \geq 75\%$ .

УВК обеспечивает возможность задания периода  $T$  квантования сигналов в пределах от 0,2 до 3,0 с (с шагом 0,01 с).

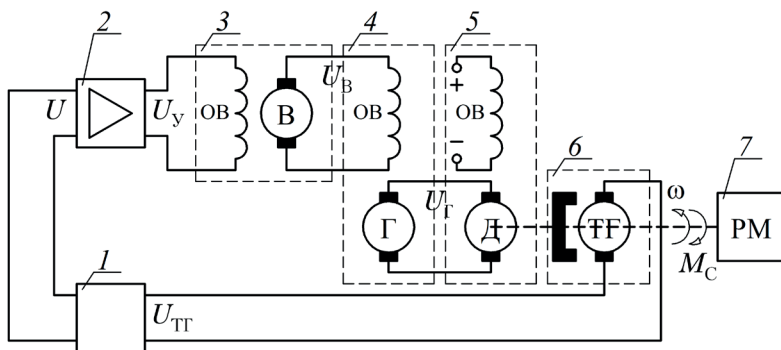


Рис. 3.100. Принципиальная схема цифровой САР угловой скорости двигателя постоянного тока

На рис. 3.100 приняты следующие обозначения: 1 – УВК; 2 – электронный усилитель; 3 – возбудитель; 4 – генератор; 5 – двигатель; 6 – тахогенератор; 7 – рабочий механизм (рабочая машина).

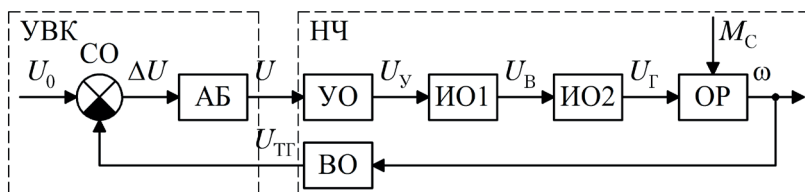


Рис. 3.101. Функциональная схема цифровой САР угловой скорости двигателя постоянного тока

Элементы функциональной схемы САР (рис. 3.101) имеют следующие обозначения: ОР – объект регулирования (двигатель постоянного тока); ВО – воспринимающий орган (тахогенератор); СО – сравнивающий орган; АБ – алгоритмический блок; УО – усилительный орган (электронный усилитель); ИО1 – исполнительный орган 1 (возбудитель); ИО2 – исполнительный орган 2 (генератор); НЧ – непрерывная часть системы.

Динамические свойства элементов САР (рис. 3.101) описываются передаточными функциями, приведенными ниже.

Передаточные функции объекта регулирования (электродвигателя совместно с рабочим механизмом) по регулирующему и возмущающему воздействиям соответственно:

$$W_{OP}(s) = \frac{k_D}{T_D s + 1}; \quad (3.26)$$

$$W_{OB}(s) = \frac{k_D}{T_D s + 1}, \quad (3.27)$$

где  $k_D = 0,75$  рад/(с·В) – передаточный коэффициент;

$T_D = 1$  с – постоянная времени;

$k_M = -0,125$  рад/(с·Н·м) – передаточный коэффициент.

Передаточная функция воспринимающего органа:

$$W_{BO}(s) = k_{TP}, \quad (3.28)$$

где  $k_{TP} = 0,1$  В·с/рад – передаточный коэффициент.

Передаточная функция усилительного органа (электронного усилителя):

$$W_{YO}(s) = k_{YO}, \quad (3.29)$$

где  $k_Y = 1 \dots 10$  – коэффициент усиления усилителя (варьируемый параметр).

Передаточная функция исполнительного органа 1 (возбудителя):

$$W_{IO1}(s) = \frac{k_B}{T_B s + 1}, \quad (3.30)$$

где  $k_B = 2$  – передаточный коэффициент;

$T_B = 0,1$  с – постоянная времени.

Передаточная функция исполнительного органа 2 (генератора):

$$W_{IO2}(s) = \frac{k_T}{T_T s + 1}, \quad (3.31)$$

где  $k_T = 1,5$  – передаточный коэффициент;

$T_T = 0,5$  с – постоянная времени.

Для обеспечения статической ошибки  $\Delta\omega_{CT} = 0$  в качестве алгоритма функционирования алгоритмического блока примем *ПИД-закон регулирования* с передаточной функцией:

$$W_{AB}(s) = k_{II} + \frac{k_I}{s} + k_D s, \quad (3.32)$$

где  $k_{II}$ ,  $k_I$  и  $k_D$  – передаточный коэффициент соответственно пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющей *ПИД-закона регулирования*.

Числовые значения передаточных коэффициентов ( $k_{II}$ ,  $k_I$ ,  $k_D$ ) *ПИД-закона регулирования* необходимо определить в результате моделирования САР.

Заданное значение угловой скорости  $\omega = 110$  рад/с, номинальное и максимальное значение момента сопротивления  $M_{CH} = 400$  Н·м,  $M_{Cmax} = 470$  Н·м.

Анализ приведенной постоянной времени объекта регулирования  $T_{II} \approx T_D + T_B + T_T = 1,0 + 0,1 + 0,5 = 1,6$  с показывает, что период квантования, согласно требованиям теоремы Котельникова (Д.24), не должен превышать 0,16 с. Такое значение УВК не обеспечивает, так как его минимальное значение периода квантования  $T$ ,

как указывалось выше, составляет 0,2 с. Следовательно, данную САР необходимо исследовать как дискретную систему. Для исследования САР первоначально целесообразно использовать непрерывную модель цифровой САР (см. п. 1.3.7), которая в виде структурной схемы САР, составленной на основе функциональной схемы (рис. 3.101) и передаточных функций (3.26)–(3.32), показана на рис. 3.102.

В данной схеме звено  $e^{-T/2s}$  учитывает запаздывание в САР, вызванное процессом квантования непрерывного сигнала по времени (где  $T$  – период квантования, с). В демонстрационном примере период квантования  $T$  принят равным 0,25 с.

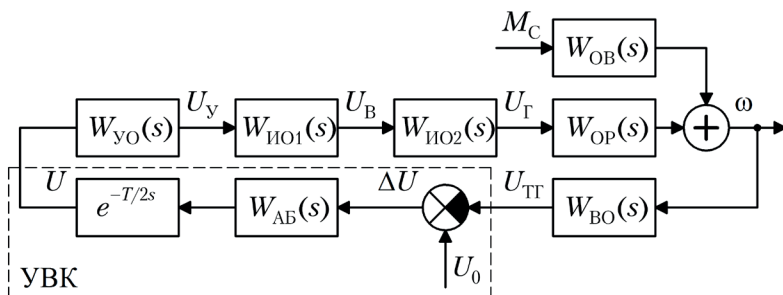


Рис. 3.102. Структурная схема непрерывной модели цифровой САР угловой скорости двигателя постоянного тока

Последовательность выполнения демонстрационного примера следующая.

**Этап 1. Подготовка данных, необходимых для моделирования.** В соответствии с рекомендациями, изложенными в п. 2.1, подготовка исходных данных в основном сводится к составлению структурной схемы моделирования исследуемой САР и к определению параметров расчета (данных, вводимых в компьютерную модель системы посредством специальных процедур).

Структурная схема моделирования САР в среде SimInTech, составленная с учетом рекомендаций п. 2.6 на основе исходной структурной схемы (рис. 3.102), показана на рис. 3.103.

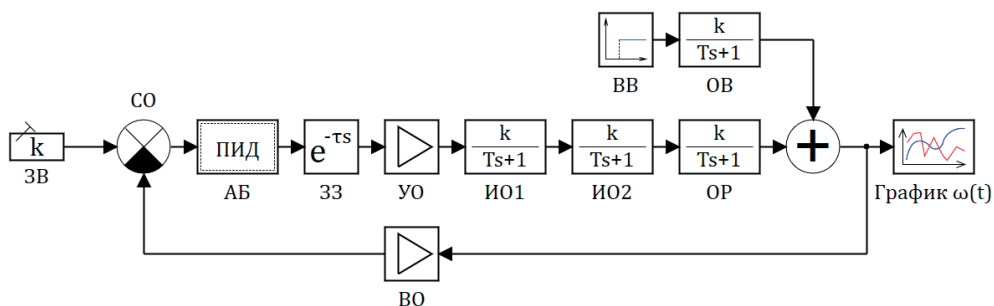


Рис. 3.103. Структурная схема моделирования САР угловой скорости двигателя постоянного тока

Основные параметры расчета определены на основе рекомендаций, приведенных в п. 2.1:

- метод интегрирования «RK45 (классич)»;
- с учетом наибольшей постоянной времени  $T_d = 1$  с конечное время расчета (время интегрирования) принято ориентировочно 10 с (больше  $T_d$  значения на один порядок);
- исходя из минимальной постоянной времени  $T_B = 0,1$  с, с учетом периода квантования  $T = 0,25$  с, значения шага интегрирования приняты для: максимального –  $1e - 2$  с (в 10 раз меньше  $T_B$ ) и минимального –  $1e - 4$  с (в 100 раз меньше максимального шага);
- шаг выдачи результата задан равным максимальному шагу интегрирования  $1e - 2$  с;
- шаг синхронизации задачи принят равным максимальному шагу интегрирования  $1e - 2$  с;
- относительная ошибка  $1e - 4$  (значение по умолчанию);
- абсолютная ошибка  $1e - 4$ ;
- синхронизация с реальным временем отключена.

**Этап 2. Введение структурной схемы моделирования в *схемное окно*, ввод ее параметров.** Руководствуясь рекомендациями, приведенными в п. 2.6, по аналогии с лабораторной работой 2 введите структурную схему (рис. 3.103) в *схемное окно* нового проекта.

*ПИД-регулятор* (блок «АБ») реализуйте с помощью блока *Субмодель*. Структурная схема субмодели приведена на рис. 3.104. В данной схеме для блока *Сумматор* введите значение **[1,1,1]** для свойства *Весовые множители для каждого из входов*, свойства остальных блоков не требуют редактирования.

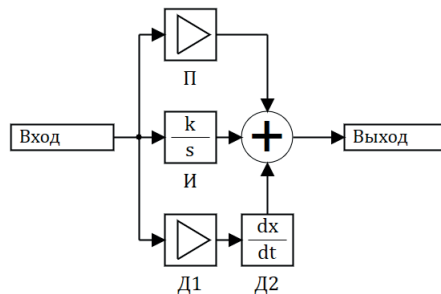


Рис. 3.104. Структурная схема субмодели (блока «АБ»)

Первый входной порт блока *Сумматор* в схеме, приведенной на рис. 3.104, расположите сверху блока, второй – слева, третий – снизу.

Введите в блоки структурной модели (рис. 3.103) значения параметров передаточных функций (3.26)–(3.31). Установите коэффициент усиления усилителя

$k_y = 5$  (блок «УО»). Значения свойств блоков («П», «И», «Д1» и «Д2»), формирующих *ПИД-закон регулирования* в соответствии с передаточной функцией (3.32), оставьте по умолчанию единичными.

В диалоговом окне блока «ЗВ» (блок *Константа*) задайте свойство *Значение* 11. Задающее воздействие определено с учетом номинального значения регулируемой величины  $\omega = 110$  рад/с и передаточного коэффициента воспринимающего органа  $k_{\text{ТГ}} = 0,1$  В·с/рад как  $U_0 = k_{\text{ТГ}}\omega = 0,1 \cdot 110 = 11$  В. В диалоговое окно блока «ВВ» (блок *Ступенька*) введите свойства:

- *Время срабатывания* 10 (соответствующее времени окончания переходного процесса по задающему воздействию);
- *Начальное состояние* 0;
- *Конечное состояние* 400 (соответствующее номинальному значению момента сопротивления  $M_{\text{СН}} = 400$  Н·м).

**Этап 3. Установка параметров расчета.** С помощью кнопки  **Параметры расчёта** откройте диалоговое окно **Параметры проекта**. Введите в него основные параметры расчета, определенные в результате выполнения **этапа 1**.

**Этап 4. Определение значений параметров алгоритмического блока (*ПИД-закон регулирования*).** Определение параметров  $k_{\text{П}}$ ,  $k_{\text{И}}$  и  $k_{\text{Д}}$  *ПИД-закон регулирования* целесообразно выполнить, используя эмпирический метод на числовых значениях критического коэффициента  $k_{\text{ПКР}}$  и периода  $T_{\text{КР}}$  незатухающего гармонического процесса регулирования САР (рис. 3.103) в режиме *П-закон регулирования* на границе устойчивости. Сравнительно просто значения  $k_{\text{ПКР}}$  и  $T_{\text{КР}}$  можно определить посредством моделирования процесса регулирования на границе устойчивости САР, предварительно исключив из алгоритмического блока структурной модели (рис. 3.103 и 3.104) дифференцирующую и интегрирующую составляющие, а также исключив возмущающее воздействие на систему. Для этого задайте следующие свойства блокам:

- блок «И» – *Коэффициенты усиления* 0;
- блок «Д1» – *Коэффициент усиления* 0;
- блок «ВВ» – *Конечное состояние* 400\*0.

После выполнения этих процедур алгоритмический блок будет выполнять функции *П-закон регулирования*, а к системе будет приложено только задающее воздействие.

Первоначально проведите моделирование САР с *П-законом регулирования* при  $k_{\text{П}} = 1$  (значение по умолчанию), выполнив следующие действия. Запустите задачу на счет клавишей **F9**. После окончания расчета в *графическом окне* блока *Временной график* появится график переходного процесса, изображенный на рис. 3.105. В соответствии с ним отредактируйте свойства *графического окна*.

Варьируя передаточным коэффициентом  $k_{\text{П}}$  в процессе моделирования САР, добейтесь незатухающего гармонического процесса регулирования (рис. 3.106) и на его основе определите значение периода  $T_{\text{КР}}$  гармонических колебаний регулируемой величины – угловой скорости  $\omega$ .

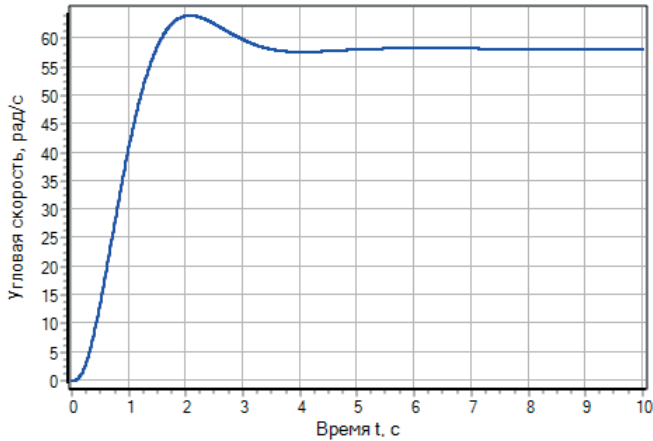


Рис. 3.105. Переходный процесс САР  
при  $k_P = 1, k_I = 0, k_D = 0$

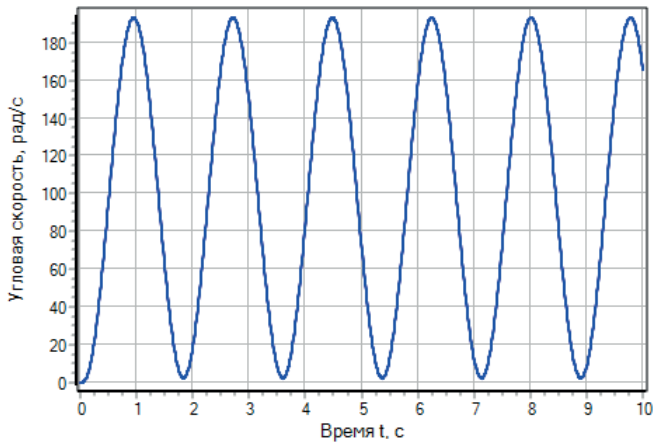


Рис. 3.106. График гармонического процесса  
регулирования САР

Вызовите контекстного меню *графического окна* и, воспользовавшись одной из команд – **Курсор** или **Таблица**, определите период  $T_{\text{КР}}$  гармонических колебаний. Обработку графика переходного процесса также можно провести с помощью программы «Microsoft Excel», передав в нее результаты моделирования с помощью команды **Экспорт в Excel** контекстного меню *графического окна*.

Соответствующее графику (рис. 3.106) значение периода  $T_{\text{КР}}$  гармонических колебаний при  $k_P = 7,113$  равно 1,766 с.

Для расчета передаточных коэффициентов  $k_P$ ,  $k_I$  и  $k_D$  используйте формулы Циглера-Никольса применительно к *ПИД-закону регулирования* (см. п. 1.3.3):

$$k_{\Pi} = 0,6k_{\Pi \text{кр}} = 0,6 \cdot 7,113 = 4,268;$$

$$k_{\text{И}} = \frac{1,2 k_{\Pi \text{кр}}}{T_{\text{кр}}} = 1,2 \cdot 7,113 / 1,766 = 4,833;$$

$$k_{\text{Д}} = 0,075k_{\Pi \text{кр}}T_{\text{кр}} = 0,075 \cdot 7,113 \cdot 1,76 = 0,9389.$$

**Этап 5. Моделирование САР с ПИД-законом регулирования.** Введите рассчитанные значения передаточных коэффициентов  $k_{\Pi}$ ,  $k_{\text{И}}$  и  $k_{\text{Д}}$  в субмодель алгоритмического блока (рис. 3.104). Верните первичные значения свойствам блока «ВВ» (*Конечное состояние 400*) для создания возмущающего воздействия. Задайте конечное время расчета 20 с (удвоенное значение времени расчета, определенного на **этапе 1**).

Выполните моделирование САР с ПИД-законом регулирования. После окончания расчета в *графическом окне* появится график переходного процесса (рис. 3.107).

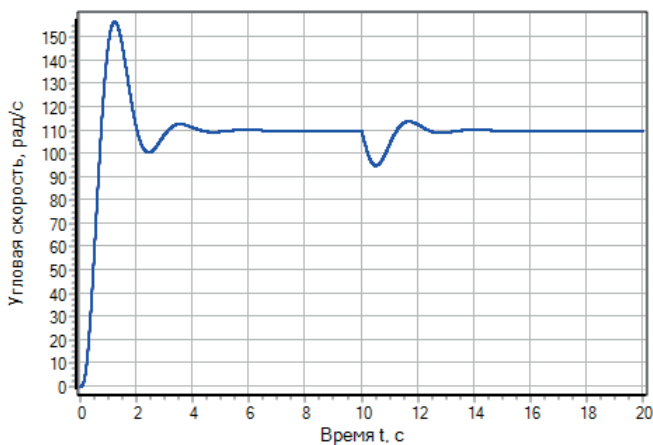


Рис. 3.107. График процесса регулирования САР с ПИД-законом регулирования ( $k_{\Pi} = 4,268$ ;  $k_{\text{И}} = 4,833$ ;  $k_{\text{Д}} = 0,9389$ )

Показатели качества регулирования САР, рассчитанные на основе данных, полученных в результате обработки графика переходного процесса (рис. 3.107), следующие.

По задающему воздействию:

- статическая ошибка  $\Delta\omega_{\text{ст}} = 0$ ;
- время регулирования  $t_{\text{р}} = 2,77$  с;
- перерегулирование  $\sigma = \frac{156,75 - 110}{110} 100\% = 42,5\%$ ;
- количество перерегулирований  $n = 1$ ;
- степень затухания  $\varphi = \frac{\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2}{\Delta\omega_1} 100\% = \frac{46,75 - 2,75}{46,75} 100\% = 94,1\%$ ,



$$\begin{aligned}\text{где } \Delta\omega_1 &= \omega_1 - \omega_{\text{уст}} = 156,75 - 110 = 46,75 \text{ рад/с;} \\ \Delta\omega_2 &= \omega_2 - \omega_{\text{уст}} = 112,75 - 110 = 2,75 \text{ рад/с.}\end{aligned}$$

По возмущающему воздействию:

- статическая ошибка  $\Delta\omega_{\text{ст}} = 0$ ;
- время регулирования  $t_p = 1,01 \text{ с}$ ;
- перерегулирование  $\sigma = \frac{113,85 - 110}{110} 100\% = 3,5\%$ ;
- количество перерегулирований  $n = 0$ ;
- степень затухания  $\varphi = \frac{\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2}{\Delta\omega_1} 100\% = \frac{-15,07 + 1,01}{-15,07} 100\% = 93,3\%$ ,

$$\begin{aligned}\text{где } \Delta\omega_1 &= \omega_1 - \omega_{\text{уст}} = 94,93 - 110 = -15,07 \text{ рад/с;} \\ \Delta\omega_2 &= \omega_2 - \omega_{\text{уст}} = 108,99 - 110 = -1,01 \text{ рад/с.}\end{aligned}$$

Анализ показателей качества САР показывает, что процесс регулирования при отработке задающего воздействия не удовлетворителен по перерегулированию, так,  $\sigma = 42,5\%$  превышает допустимое значение  $20\%$ . Что касается процесса регулирования по возмущению, то он отвечает всем требуемым показателям качества.

Приближенный эмпирически метод Циглера-Никольса, с помощью которого были рассчитаны параметры *ПИД-закона регулирования*, не гарантирует оптимальных показателей качества процесса регулирования. Улучшенных или оптимальных показателей качества САР можно достичь либо подбором варьируемых параметров ( $k_{\text{П}}$ ,  $k_{\text{И}}$  и  $k_{\text{Д}}$ ), либо их оптимизацией с помощью блока *Оптимизация параметров модели*, который обеспечивает параметрическую оптимизацию САР.

На рис. 3.108 показан результат моделирования САР при  $k_{\text{П}} = 2,2$ ,  $k_{\text{И}} = 1,7$  и  $k_{\text{Д}} = 0,45$ , которые были определены подбором.

---

**Примечание:** значения подобранных параметров являются не единственными, так как при других вариациях значениями  $k_{\text{П}}$ ,  $k_{\text{И}}$  и  $k_{\text{Д}}$  также возможны переходные процессы с удовлетворительными показателями качества, соответствующими заданным требованиям.

---

Показатели качества процесса регулирования САР (рис. 3.108) по задающему воздействию: статическая ошибка  $\Delta\omega_{\text{ст}} = 0$ ; время регулирования  $t_p = 2,66 \text{ с}$ ; перерегулирование  $\sigma = 16,1\%$ ; количество перерегулирований  $n = 1$ ; степень затухания  $\varphi = 98,1\%$ . Показатели качества САР по возмущающему воздействию: статическая ошибка  $\Delta\omega_{\text{ст}} = 0$ ; время регулирования  $t_p = 1,79 \text{ с}$ ; перерегулирование  $\sigma = 0$ ; количество перерегулирований  $n = 0$ ; степень затухания  $\varphi = 97,3\%$ . Из их анализа следует, что цифровая САР с *ПИД-законом регулирования* при значениях его параметров, определенных на основе непрерывной модели, обеспечивает необходимые показатели качества процесса регулирования.

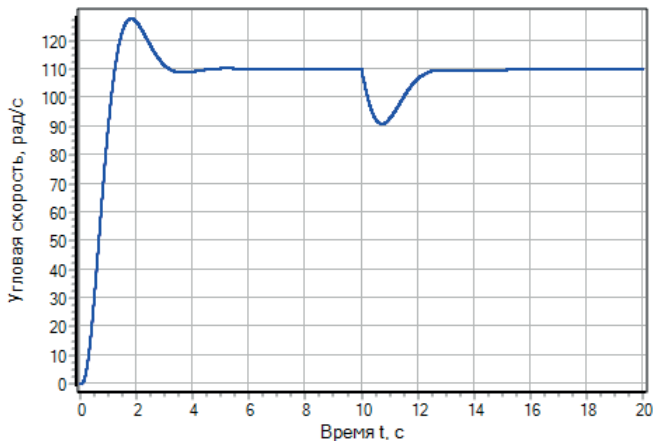


Рис. 3.108. График переходного процесса в непрерывной модели САР с ПИД-законом регулирования ( $k_P = 2,2$ ;  $k_I = 1,7$ ;  $k_D = 0,45$ )

С целью оценки адекватности непрерывной модели цифровой САР ее непрерывно-дискретной модели выполните совместное моделирование системы на основе этих моделей с выводом графиков переходных процессов в одном *графическом окне*.

Для этого в *схемном окне* проекта выделите все имеющиеся блоки и линии связи, используя команду **Выделить все** (сочетание клавиш **Ctrl** и **A**) из меню **Правка**. С помощью кнопок **Копировать** (сочетание клавиш **Ctrl** и **C**) и **Вставить** (сочетание клавиш **Ctrl** и **V**) создайте копию исходной структурной модели (рис. 3.103), которую разместите в *схемном окне* проекта ниже основной. В нижней схеме САР удалите блоки «АБ» и «ЗЗ». На их место установите блок **Дискретный ПИД-регулятор** из библиотеки «Дискретные» (см. п. Ж.7 приложения Ж). В результате будет получена непрерывно-дискретная модель САР, приведенная на рис. 3.109.

Добавьте в *схемное окно* проекта еще один блок **Временной график** и задайте *Количество входных портов* 2. Отредактируйте размещение и подписи блоков, проведите недостающие линии связи, для того чтобы схема моделирования приняла вид, изображенный на рис. 3.110.

Установите следующие значения свойствам блока **Дискретный ПИД-регулятор**:

- Период квантования **0.25**;
- Начальные условия **[0]**;
- Пропорциональная составляющая **2.2**;
- Интегральная составляющая **1.7**;
- Дифференциальная составляющая **0.45**.

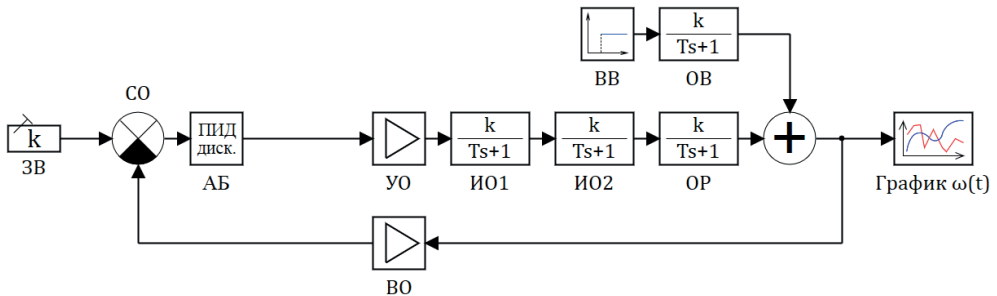


Рис. 3.109. Непрерывно-дискретная модель САР угловой скорости двигателя постоянного тока в среде SimInTech

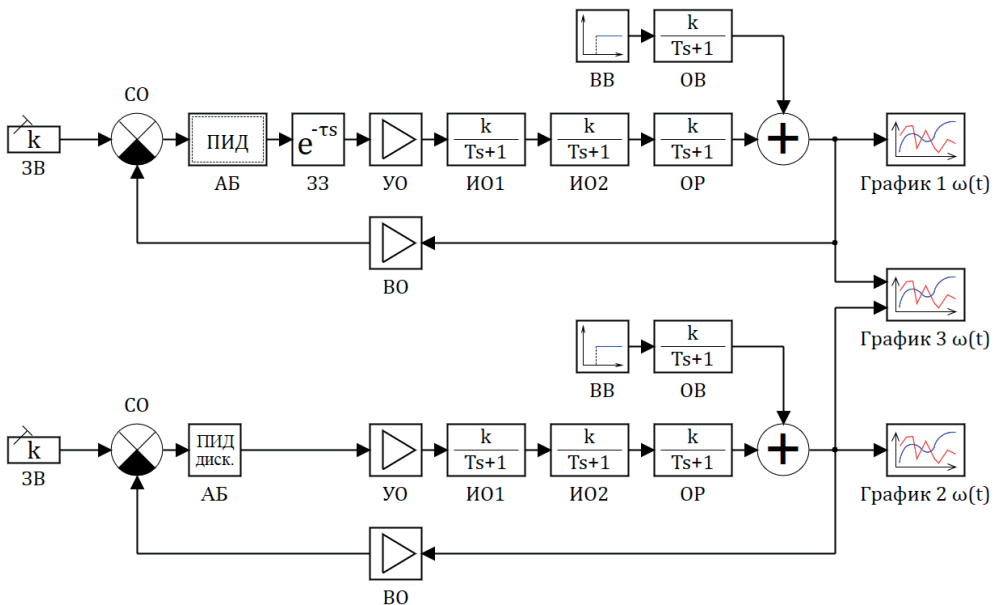


Рис. 3.110. Непрерывная и непрерывно-дискретная модели САР угловой скорости двигателя постоянного тока в среде SimInTech

Запустите созданную задачу на счет. В результате моделирования процессов регулирования на основе общей структурной схемы (рис. 3.110) получены их совмещенные графики (рис. 3.111) в *графическом окне* блока «График 3  $\omega(t)$ ». Визуальная оценка графиков показывает их достаточно хорошую сходимость, что свидетельствует о практической адекватности непрерывной модели САР ее непрерывно-дискретной модели.

На основе полученных данных по графику в *графическом окне* блока «График 2  $\omega(t)$ » рассчитайте показатели качества процесса регулирования непрерывно-дискретной модели САР, сравните их с приведенными выше аналогичными показателями в непрерывной модели САР и сформулируйте окончательное заключение.

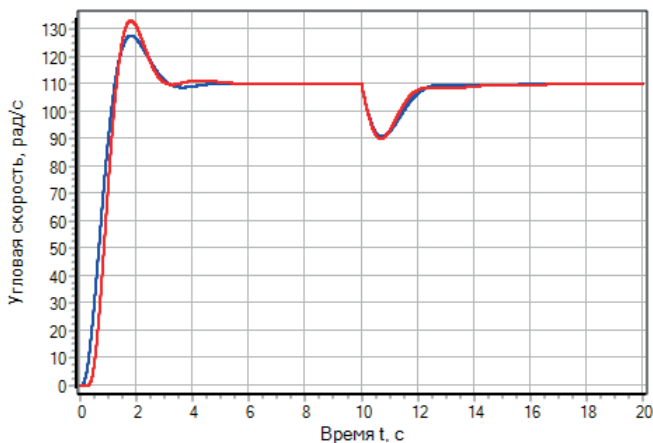


Рис. 3.111. График переходного процесса в непрерывной (синяя кривая), непрерывно-дискретной (красная кривая) модели САР с ПИД-законом регулирования ( $k_{\Pi} = 2,2$ ;  $k_{\text{И}} = 1,7$ ;  $k_{\text{Д}} = 0,45$ )

**Выполнение индивидуального задания.** В САР напряжения синхронного генератора (рис. 2.2, см. п. 2.1) в качестве регулятора использован один канал УВК Ремиконт Р-130 (см. п. Д.4 приложения Д). В качестве алгоритма, реализуемого контроллером Ремиконт Р-130, примените *ПИД-закон регулирования*. Выполните моделирование данной САР на основе непрерывной и непрерывно-дискретной модели этой цифровой системы по варианту, заданному преподавателем из табл. 3.7. Возмущающим воздействием является скачкообразное изменение тока  $I$  нагрузки генератора от 0 до 688 А в момент времени  $t_I$  (см. табл. 3.7). Для САР напряжения синхронного генератора с *ПИД-регулятором* задающее воздействие  $U_0 = 14,742$  В.

Таблица 3.7. Период квантования  $T$  и момент времени  $t_I$  изменения возмущающего воздействия

| Вариант   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $T$ , с   | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| $t_I$ , с | 20  | 20  | 30  | 30  | 30  | 40  | 40  | 40  | 50  | 50  |

#### Поэтапная последовательность выполнения индивидуального задания.

**Этап 1.** На основе следствия из теоремы Котельникова (см. соотношение (Д.24) в приложении Д) определите граничное значение периода квантования  $T_{\Gamma}$ , удовлетворяющее условию теоремы Котельникова, по формуле:

$$T_{\Gamma} = 0,1T_{\Pi}, \quad (3.33)$$

где  $T_{\Pi}$  – постоянная времени «приведенного объекта регулирования».

Постоянная времени  $T_{\Pi}$  учитывает динамические свойства инерционных элементов непрерывной части САР. Такими элементами являются синхронный гене-

ратор G1, генератор возбуждения G2 и электромашинный усилитель A2 (рис. 2.3 и 2.4), с учетом постоянных времени которых

$$T_{\Pi} = T_O + T_{\text{ИО}} + T_2 = 1,2 + 0,5 + 0,15 = 1,85 \text{ с.}$$

**Этап 2.** Сравнивая найденную величину граничного  $T_{\Gamma}$  с минимальным значением длительности цикла  $T$  контроллера Ремиконт Р-130 (см. п. Д.4 приложения Д), убедитесь, что данную САР с микроЭВМ следует рассматривать как дискретную систему и ее моделирование необходимо проводить на основе непрерывной модели, в которой процесс квантования сигналов учитывается дополнительным звеном запаздывания, или с использованием непрерывно-дискретной модели.

**Этап 3.** На основе структурной схемы (рис. 2.4) составьте структурные схемы непрерывной и непрерывно-дискретной САР напряжения синхронного генератора (аналогичные схемам, показанным на рис. 3.110 в демонстрационном примере).

**Этап 4.** Используя метод Циглера-Никольса (см. п. 1.3.3), определите параметры *ПИД-закона регулирования* для заданного варианта.

**Этап 5.** Проведите моделирование САР на основе структурных схем, составленных в результате выполнения этапа 3, по варианту, заданному преподавателем (табл. 3.7), приняв коэффициент усиления электронного усилителя  $k_1 = 1,5$ . По результатам моделирования оцените качество процесса регулирования в каждой модели по аналогии с демонстрационным примером. Сравните показатели качества и дайте заключение об адекватности непрерывной модели САР с микроЭВМ ее непрерывно-дискретной модели и целесообразности использования цифрового регулирования для заданного значения периода квантования  $T$ .

---

**Примечание:** конечное время расчета примите равным удвоенному значению времени  $t_f$  (см. табл. 3.7). Эти временные параметры являются ориентировочными и в процессе моделирования могут уточняться.

Для удобства сравнения процессов регулирования в двух моделях целесообразно их структурные схемы размещать в *схемном окне* одного проекта и использовать общий блок *Временной график*.

---

**Содержание отчета.** В отчете должны быть приведены упрощенная принципиальная схема САР (по заданному варианту, подобная схеме, показанной на рис. 3.100), структурные схемы непрерывной и непрерывно-дискретной моделей, необходимые расчеты, графики переходных процессов, результаты их обработки и выводы.

---

**Примечание:** дополнительные материалы к лабораторной работе приведены в п. 3.2 приложения 3.

---

**Контрольные вопросы и задания**

1. Что такое непрерывная и дискретная САР?
2. Изобразите обобщенную функциональную схему САР с микроЭВМ.
3. Изобразите обобщенную структурную схему САР с микроЭВМ.
4. Кто такой В. А. Котельников? Какова сущность теоремы В. А. Котельникова?
5. Запишите соотношение, с помощью которого определяют период квантования  $T$  с учетом частоты пропускания  $\omega_{\text{п}}$ .
6. Как влияет период квантования  $T$  на устойчивость дискретных САР?
7. Как оценивают качество САР по переходным характеристикам?
8. Какова сущность моделирования и структурно-параметрического синтеза САР с микроЭВМ?
9. Что такое преобразование Эйлера и Тустена?
10. Какова сущность определения параметров типовых законов регулирования с помощью метода Циглера-Никольса?

Описания САР и объектов регулирования (приложения Б, В и Г) позволяют формировать многовариантные темы курсовых работ по линейным, релейным и цифровым САР различного типа. В нижеследующих параграфах рассмотрены некоторые методические рекомендации и примеры применительно к линейным (в том числе и цифровым) САР. Эти рекомендации не следует рассматривать как единственно возможные, так как они носят сугубо частный характер и не могут быть универсальными для большого многообразия учебных программ по направлениям подготовки, предусмотренным учебным пособием.

## 4.1. Основные рекомендации для выполнения курсовой работы

### 4.1.1. Тема работы и задание

Приложения Б, В и Г позволяют формировать многовариантные темы курсовых работ различного типа. Например: **«По заданному описанию САР, в которой использован *П-закон регулирования*, необходимо применить *ПИД-закон регулирования* и определить его рациональные параметры».**

В данном разделе рассмотрены основные методические рекомендации для выполнения курсовой работы применительно к данному типу и приведены общие требования к ее оформлению.

**Тема.** Определение параметров типового закона регулирования САР.

**Задание.** Для заданного варианта САР, реализующего *П-закон регулирования*, выполните компьютерное моделирование системы с помощью ПО SimInTech. В результате моделирования: оцените устойчивость и качество САР, определите критический коэффициент передачи усилителя (передаточный коэффициент *П-закона регулирования*) и период гармонического процесса регулирования на границе устойчивости САР.

По найденным значениям критического коэффициента усиления и периода гармонического процесса регулирования, используя эмпирический метод Циглера-Никольса, определите рациональные параметры *ПИД-закона регулирования*.

Выполните моделирование САР с *ПИД-законом регулирования*. По результатам моделирования оцените качество процесса регулирования скорректированной САР. Если показатели качества САР не удовлетворяют заданным требованиям, то посредством вариации параметров закона регулирования добейтесь удовлетворительных показателей качества.

### 4.1.2. Содержание работы

#### 1. Исходные данные для моделирования САР.

Описание САР, ее принципиальная и функциональная схемы.

Передаточные функции объекта регулирования элементов САР и структурная схема системы.

#### 2. Определение параметров заданного типового закона регулирования.

Моделирование исходного варианта САР.

Расчет параметров типового закона регулирования.

Компьютерное моделирование САР с *ПИД-законом регулирования*.

#### 3. Выводы по работе.

### 4.1.3. Методические рекомендации по выполнению работы

В первом пункте курсовой работы приведите описание и принципиальную схему заданного варианта САР. На основе анализа принципиальной схемы составьте функциональную схему.

Для объекта регулирования и элементов САР определите их передаточные функции. С учетом найденных передаточных функций и функциональной схемы составьте структурную схему САР.

Во втором пункте курсовой работы:

- подготовьте исходные данные для моделирования (структурную схему моделирования, параметры интегрирования);
- выполните моделирование исходного варианта САР;
- оцените устойчивость и качество исходного варианта САР;
- определите критический коэффициент передачи усилителя (*П-закона регулирования*) и период гармонических колебаний регулируемой величины на границе устойчивости САР;
- используя эмпирический метод Циглера-Никольса, определите рациональные параметры *ПИД-закона регулирования*;
- выполните моделирование САР с *ПИД-законом регулирования*;
- по результатам моделирования оцените качество скорректированной САР;
- если показатели качества САР не удовлетворяют заданным требованиям, то посредством вариации параметров ( $k_{\Pi}$ ,  $k_{\text{И}}$ ,  $k_{\text{Д}}$ ) добейтесь удовлетворительных показателей качества.

В третьем пункте курсовой работы в кратком реферативном изложении опишите основную сущность работы и приведите значения параметров закона регулирования, которые следует устанавливать в реальном регуляторе.



#### 4.1.4. Рекомендации по оформлению работы

Курсовая работа оформляется в виде расчетно-пояснительной записки объемом 25–30 страниц формата А4 рукописного текста (15–20 страниц машинописного текста) и двух графических листов формата А1.

Расчетно-пояснительная записка пишется чернилами или выполняется в печатном варианте. Она должна содержать:

- титульный лист;
- задание (подписанное преподавателем);
- содержание;
- введение;
- текстовую часть в соответствии с содержанием курсовой работы;
- заключение с выводами по работе;
- список использованной литературы.

Наименования разделов расчетно-пояснительной записки должны отражать содержание работы. Изложение расчетно-пояснительной записки должно быть логичным, четким и кратким, а терминология и определения – едиными и соответствовать установленным стандартам или общепринятым терминам в научно-технической литературе.

Условные буквенные обозначения физических, математических и других величин, а также условные графические обозначения должны соответствовать установленным стандартам. Все обозначения в формулах должны быть пояснены.

Иллюстрации к расчетно-пояснительной записке (схемы, графики и др.) должны нумероваться и иметь тематические наименования, а при необходимости снабжаться подрисовочными текстами. Графики должны выполняться в масштабе (желательно на миллиметровой бумаге) или с помощью компьютера. В расчетно-пояснительной записке должны помещаться таблицы с результатами расчетов, в том числе полученных с помощью компьютера.

В графической части курсовой работы должны быть приведены:

- принципиальная и функциональная схемы САР;
- график процесса регулирования САР на границе устойчивости с результатами определения периода колебаний  $T_K$  и параметров типового закона регулирования, рассчитанными методом Циглера-Никольса;
- структурная схема исходного варианта САР для ее моделирования с помощью компьютера в среде SimInTech и таблица с параметрами элементов схемы;
- график переходного процесса скорректированной САР с отображением всех показателей качества.

Материал, вынесенный в графическую часть работы, не должен дублироваться аналогичными иллюстрациями в расчетно-пояснительной записке. В расчетно-пояснительной записке должна быть ссылка на графическую часть работы.



|                                                                                                     |                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ<br>ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ                                                   |                            |
| Факультет:                                                                                          | _____                      |
| Кафедра:                                                                                            | _____                      |
| Дисциплина:                                                                                         | _____                      |
| <b>КУРСОВАЯ РАБОТА</b><br>(расчетно-пояснительная записка)                                          |                            |
| <b>ТЕМА: «Определение параметров<br/>типового закона регулирования<br/>САР давления в ресивере»</b> |                            |
| Автор:                                                                                              | студент И. И. Иванов       |
| Руководитель:                                                                                       | преподаватель П. П. Петров |
| Москва – 2017                                                                                       |                            |

Рис. 4.3. Образец оформления титульного листа

## 4.2. Пример выполнения курсовой работы на тему «Определение параметров типового закона регулирования САР давления в ресивере»

### 4.2.1. Исходные данные

**Описание САР.** На рис. 4.4 приведена схема САР давления  $P$  в ресивере (воздухосборнике) 1, который является в данной системе объектом регулирования. Давление в ресивере регулируется посредством изменения количества воздуха  $Q$ , зависящего от положения заслонки 2, то есть от его линейного перемещения  $X_3$ , которое можно рассматривать как регулирующее воздействие на входе объекта

регулирования. Внешним возмущением, вызывающим отклонение регулируемой величины – давления  $P$ , является изменение расхода сжатого воздуха  $Q_c$ .

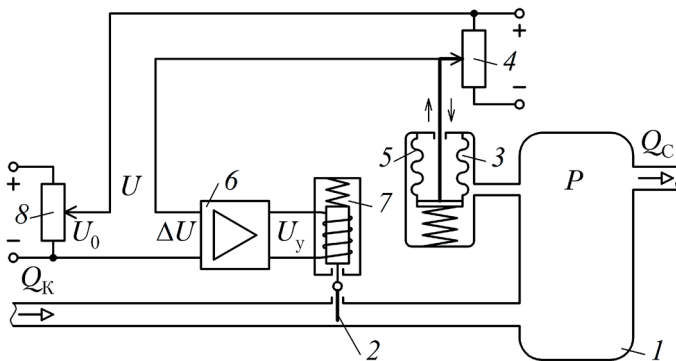


Рис. 4.4. Упрощенная принципиальная схема САР давления в ресивере

Давление в данной системе контролируется с помощью сильфонного устройства 3. Перемещение сильфона 5, пропорционально зависящего от давления  $P$ , с помощью резистивного потенциометра 4 преобразуется в напряжение  $U$ . То есть сильфонное устройство совместно с потенциометром представляет датчик давления с электрическим выходным сигналом. Выходное напряжение датчика  $U$  сравнивается с задающим напряжением  $U_0$ , снимаемым с задающего резистора 8, в результате чего формируется сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - U$ . Сигнал  $\Delta U$  после усиления электронным усилителем 6 посредством его выходного напряжения  $U_y$  управляет электромагнитным приводом 7 и связанной с ним заслонкой 2 в соответствии с алгоритмом *П-закона регулирования*.

Составленная на основе принципиальной схемы (рис. 4.4) функциональная схема САР показана на рис. 4.5, где: ОР – объект регулирования (ресивер 1); ВО – воспринимающий орган (датчик давления – совокупность сильфонного устройства 3 и резистивного преобразователя 4); СО – сравнивающий орган (схема сравнения напряжений  $U_0$  и  $U$ ); УО – усилительный орган (электронный усилитель 6); ИО – исполнительный орган (заслонка 2 с электромагнитным приводом 7).

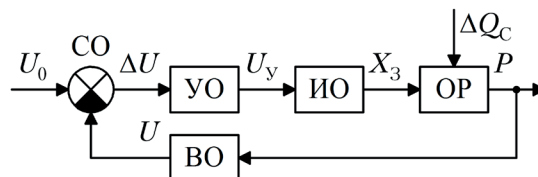


Рис. 4.5. Функциональная схема САР давления в ресивере

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующей системой уравнений:

- ОР (ресивер):

$$T_O \frac{dP}{dt} + P = k_{O1}X_3 - k_{O2}Q_C; \quad (4.1)$$

- ВО (сильфонный датчик):

$$T_C^2 \frac{d^2U}{dt^2} + 2bT_C \frac{dU}{dt} + U = k_C P; \quad (4.2)$$

- СО (орган сравнения):

$$\Delta U = U_0 - U; \quad (4.3)$$

- УО (усилитель):

$$U_Y = k_Y \Delta U; \quad (4.4)$$

- ОИ (заслонка совместно с электромагнитным приводом):

$$T_3 \frac{dX}{dt} + X_3 = k_3 U_Y. \quad (4.5)$$

Физическая сущность переменных, входящих в уравнения (4.1)–(4.5), отражена выше в описании схемы САР. Параметры уравнений (4.1)–(4.5):  $T_O = 1,3$  с;  $T_C = 0,06$  с;  $T_3 = 0,12$  с – постоянные времени,  $k_{O1} = 92$  кПа/мм;  $k_{O2} = -220$  кПа·с/м<sup>3</sup>;  $k_C = 0,025$  В/кПа;  $k_Y = 36$ ;  $k_3 = 0,05$  мм/В – коэффициенты передачи и  $b = 0,6$  – коэффициент демпфирования. Требуемое номинальное значение давления  $P_H = 400 \pm 10$  кПа. Номинальный расход сжатого воздуха из ресивера  $Q_{CH} = 1$  м<sup>3</sup>/с. Максимальное скачкообразное изменение возмущающего воздействия  $\Delta Q_C = 1$  м<sup>3</sup>/с.

Значение задающего воздействия  $U_0$  подбирается в процессе моделирования таким, чтобы при номинальном расходе сжатого воздуха из ресивера  $Q_{CH} = 1$  м<sup>3</sup>/с давление на выходе САР было равно номинальному значению  $P_H = 400$  кПа.

**Передаточные функции и структурная схема системы.** Объект регулирования (рис. 4.5) имеет две входные величины и одну выходную. Следовательно, он будет иметь передаточные функции по каждому каналу: по регулирующему  $W_P(s)$  и по возмущающему воздействиям  $W_B(s)$ .

Передаточную функцию объекта регулирования по регулирующему воздействию  $W_P(s)$ , руководствуясь принципом суперпозиции, определим на основе уравнения (4.1) при  $Q_C = 0$ :

$$T_O \frac{dP}{dt} + P = k_{O1}X_3.$$

Преобразовав данное уравнение по Лапласу при нулевых начальных условиях, получим:

$$T_O s P(s) + P(s) = k_{O1}X_3(s),$$

где  $P(s)$  и  $X_3(s)$  – изображения по Лапласу регулируемой величины  $P$  и регулирующего воздействия  $X_3$ .

Из последнего выражения (в левой его части) вынесем за скобки  $P(s)$ :

$$P(s)[T_O(s) + 1] = k_{O1}X_3(s)$$

и на его основе определим передаточную функцию  $W_P(s)$  как отношение изображений по Лапласу  $P(s)$  и  $X_3(s)$ :

$$W_P(s) = \frac{P(s)}{X_3(s)} = \frac{k_{O1}}{T_O s + 1}. \quad (4.6)$$

Аналогично найдем передаточную функцию объекта регулирования по возмущающему воздействию  $W_B(s)$ , приняв  $X_3 = 0$ :

$$\begin{aligned} T_O \frac{dP}{dt} + P &= -k_{O2}Q_C; \\ T_O s P(s) + P(s) &= -k_{O2}Q_C(s); \\ P(s)[T_O s + 1] &= -k_{O2}Q_C(s); \\ W_B(s) = \frac{P(s)}{Q_C(s)} &= \frac{-k_{O2}}{T_O s + 1}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где  $Q_C(s)$  – изображение по Лапласу возмущающего воздействия  $Q_C$ .

С учетом передаточных функций (4.6) и (4.7) структурную схему объекта регулирования можно представить в виде, показанном на рис. 4.6. Для физической наглядности на данной структурной схеме вместо изображений переменных величин показаны их оригиналы.

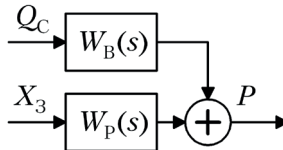


Рис. 4.6. Структурная схема объекта регулирования

Передаточные функции остальных элементов САР, определенные аналогично на основе уравнений (4.2), (4.4), (4.5), имеют следующий вид:

- ВО (сифонный датчик):

$$W_C(s) = \frac{U(s)}{P(s)} = \frac{k_C}{T_C^2 s^2 + 2bT_C s + 1}; \quad (4.8)$$

- УО (усилитель):

$$W_Y(s) = \frac{U_Y(s)}{\Delta U(s)} = k_Y; \quad (4.9)$$

- ОИ (заслонка совместно с электромагнитным приводом):

$$W_3(s) = \frac{X_3(s)}{U_Y(s)} = \frac{k_3}{T_3 s + 1}. \quad (4.10)$$

На основе функциональной схемы САР (рис. 4.5) и найденных передаточных функций, путем замены объекта регулирования в этой схеме его структурной схемой (рис. 4.6) и замещением функциональных обозначений элементов соответствующими им передаточными функциями (4.6)–(4.10), составим структурную схему системы (рис. 4.7). Для физической наглядности на данной структурной схеме вместо изображений переменных величин показаны их оригиналы.

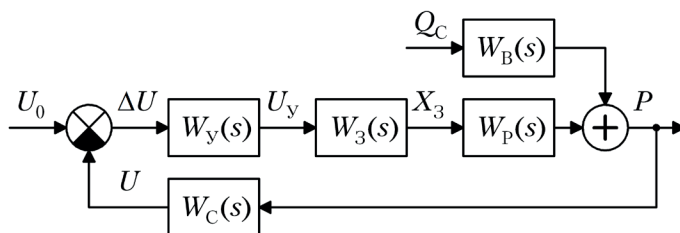


Рис. 4.7. Структурная схема САР давления в ресивере

Параметры передаточных функций (4.6)–(4.10) звеньев структурной схемы (рис. 4.7) соответствуют параметрам исходных уравнений (4.1), (4.2), (4.4), (4.5). Структурная схема (рис. 4.7) является математической моделью, на основе которой выполняется компьютерное моделирование САР в среде SimInTech.

#### 4.2.2. Определение параметров заданного типового закона регулирования

**Моделирование исходного варианта САР.** В ПО SimInTech, как известно, используется метод структурного моделирования САР, базирующийся на математических моделях САР в виде их структурных схем. Поэтому в первую очередь на основе структурной схемы исходной системы (рис. 4.7) составим структурную схему моделирования, заменяя в исходной структурной схеме САР звенья соответствующими блоками из *общетехнической* библиотеки SimInTech (см. приложение Ж).

Для формирования задающего воздействия  $U_0$  воспользуемся блоком *Константа*, а для создания возмущающего воздействия  $Q_C$  используем блок *Ступенька* (см. приложение Ж, библиотеку «Источники»). В результате описанных операций и действий в *схемном окне* SimInTech сформируется структурная схема моделирования (рис. 4.8).

Руководствуясь методикой подготовки исходных данных (см. раздел 2), выберем метод и зададим параметры интегрирования:

- метод интегрирования «Адаптивный»;
- учитывая наибольшую постоянную времени  $T_O = 1,3$  с, принимаем первоначальное время интегрирования (конечное время расчета) 10 с, ориентируясь больше ее значения на один порядок;
- ориентируясь на значение минимальной постоянной времени  $T_C = 0,06$  с, принимаем первоначальные значения шага интегрирования: максимально-

го – 0,012 с (в 5 раз меньше  $T_C$ ), минимального – 0,0012 с (в 10 раз меньше максимального шага);

- шаг синхронизации задачи 0,012 с (равен максимальному шагу);
- относительная ошибка  $1e-4$ , абсолютная ошибка  $1e-1$ ;
- синхронизация с реальным временем отключена (вкладка **Синхронизация** в окне **Параметры проекта**).

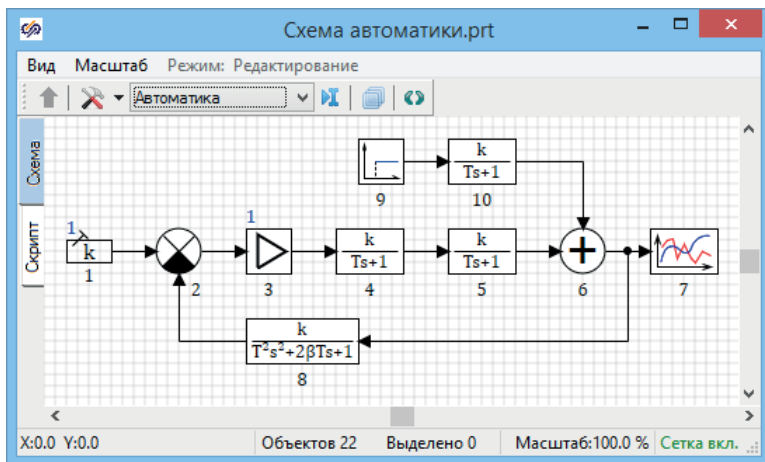


Рис. 4.8. Структурная схема САР давления в ресивере, введенная в схемное окно SimInTech

При оценке качества процесса регулирования будем исходить из следующих требований:

- статическая ошибка  $\Delta P_{СТ} = \pm 10$  кПа;
- время регулирования при пятипроцентной «трубке»  $\Delta = \pm 0,05 P_{УСТ}$ ,  $t_p = 1$  с;
- перерегулирование  $\sigma \leq 20\%$ ;
- количество перерегулирований  $n \leq 2$ .

С учетом числовых значений параметров передаточных функций САР свойства блоков структурной схемы моделирования (рис. 4.8) должны иметь значения, приведенные в табл. 4.1. Первоначальное значение задающего воздействия  $U_0$  примем равным 1, а возмущению  $Q_C$  зададим номинальное значение  $Q_{CH} = 1$  м<sup>3</sup>/с. Необходимое значение  $U_0$  определим путем его подбора в процессе моделирования посредством вариации от первоначального единичного значения.

Таблица 4.1. Значения свойств блоков структурной схемы (рис. 4.8)

| Блок | Свойство                                                | Значение         |
|------|---------------------------------------------------------|------------------|
| 1    | Значение<br>Тип данных (для генерации кода)<br>Название | 1<br>double<br>k |
| 2    | Весовые множители для каждого из входов                 | [1,-1]           |



Таблица 4.1 (окончание)

| Блок | Свойство                                | Значение |
|------|-----------------------------------------|----------|
| 3    | Коэффициент усиления                    | 36       |
| 4    | Коэффициенты усиления                   | 0.05     |
|      | Постоянные времени                      | 0.12     |
|      | Начальные условия                       | 0        |
| 5    | Коэффициенты усиления                   | 92       |
|      | Постоянные времени                      | 1.3      |
|      | Начальные условия                       | 0        |
| 6    | Весовые множители для каждого из входов | [1,1]    |
| 7    | Количество входных портов               | 1        |
| 8    | Коэффициенты усиления                   | 0.025    |
|      | Постоянные времени                      | 0.06     |
|      | Коэффициент демпфирования               | 0.6      |
|      | Начальные условия                       | 0        |
|      | Начальные условия по производной        | 0        |
| 9    | Время срабатывания                      | 5        |
|      | Начальное состояние                     | 1        |
|      | Конечное состояние                      | 2        |
| 10   | Коэффициенты усиления                   | -220     |
|      | Постоянные времени                      | 1.3      |
|      | Начальные условия                       | 0        |

В результате моделирования САР, в соответствии с данными табл. 4.1 и со скачкообразным изменением возмущающего воздействия  $\Delta Q_C = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ , получен график переходного процесса, показанный на рис. 4.9.

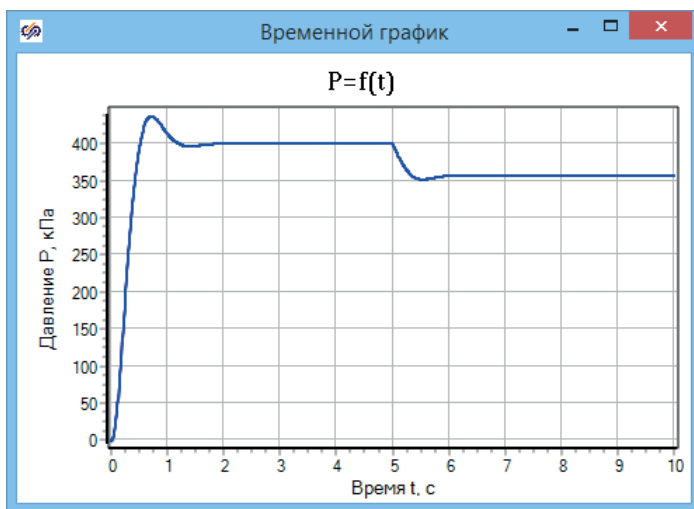


Рис. 4.9. Графическое окно с графиком переходного процесса исходной САР, реализующей алгоритм П-закона регулирования

Визуальный анализ графика переходного процесса показывает, что САР обеспечивает удовлетворительные динамические показатели качества ( $\sigma$ ,  $n$ ,  $t_p$ ), но не

отвечает требованиям, предъявляемым к значению статической ошибки: фактическая статическая ошибка  $\Delta P_{\text{СТ}} = P_1 - P_2 = 400,0 - 357,2 = 42,8$  кПа в 4,3 раза больше допустимой  $\Delta P_{\text{СТ}} = \pm 10$  кПа. Таким образом, для достижения заданных показателей качества процесса регулирования давления в ресивере необходима коррекция САР, которую, исходя из условия курсовой работы, выполним с помощью типового ПИД-закона регулирования.

**Примечание:** приведенные выше расчеты фактической статической ошибки  $\Delta P_{\text{СТ}}$  базируются на числовых данных, снятых с графика переходного процесса (рис. 4.9) посредством *специального курсора*, который запускается с помощью команды **Курсор** контекстного меню (рис. 4.10). Данные, полученные в результате сканирования графика переходного процесса с помощью *курсора*, приведены на рис. 4.11.

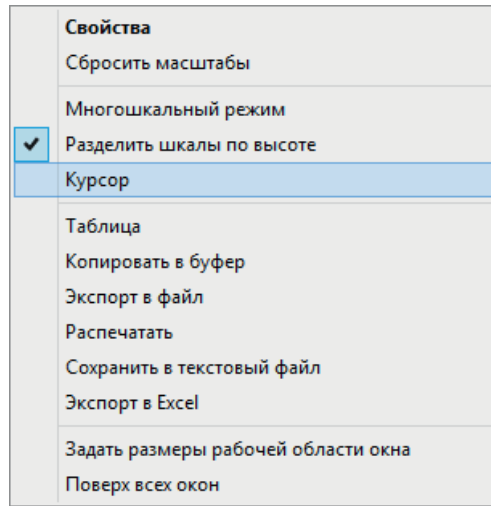


Рис. 4.10. Контекстное меню, вызываемое на поле *графического окна*

| Ближайшие к курсору точки |           |           |
|---------------------------|-----------|-----------|
| График                    | X         | Y         |
| График 1                  | 4.0007951 | 400.00114 |

*а*

| Ближайшие к курсору точки |           |           |
|---------------------------|-----------|-----------|
| График                    | X         | Y         |
| График 1                  | 9.0032746 | 357.19973 |

*б*

Рис. 4.11. Данные, снятые с графика переходного процесса (рис. 4.9) с помощью *курсора*:  
*а* – в точке, соответствующей времени  $t = X \approx 4$  с ( $P_1 = Y \approx 400,0$  кПа);  
*б* – в точке, соответствующей времени  $t = X \approx 9$  с ( $P_2 = Y \approx 357,2$  кПа)

**Расчет параметров типового закона регулирования.** Структурная схема скорректированной САР показана на рис. 4.12.

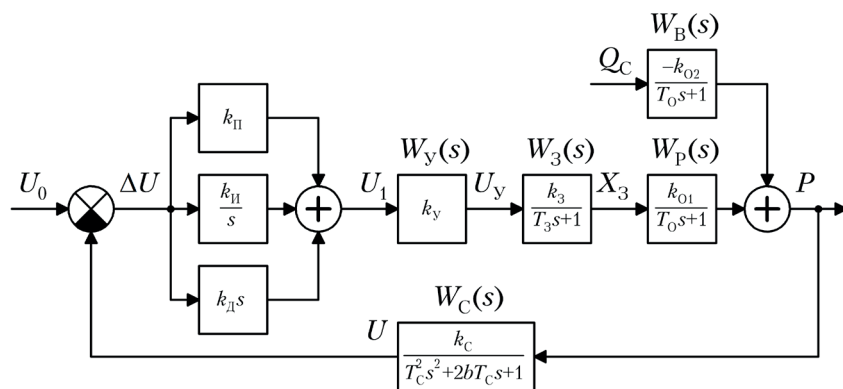


Рис. 4.12. Структурная схема САР давления в ресивере с ПИД-регулятором

Посредством вариации параметров  $k_{II}$ ,  $k_I$  и  $k_D$  ПИД-закона регулирования можно добиться желаемого (заданного) процесса регулирования. С целью исключения существенных временных затрат на вариационный поиск рациональных значений данных параметров целесообразно использовать эмпирический метод Циглера-Никольса. Для расчетов на его основе необходимо располагать числовым значением критического коэффициента  $k_{IIкp}$  и числовым значением периода  $T_{кр}$  незатухающего гармонического процесса регулирования САР (рис. 4.12) в режиме *П-регулирования* на границе устойчивости. Для их определения выполним компьютерное моделирование процесса регулирования на границе устойчивости скорректированной САР, структурная модель которой в среде SimInTech показана на рис. 4.13, где дополнительные блоки 11–15 отображают соответствующие звенья ПИД-закона регулирования. Для этого выполним следующее:

- в блоки 2–8 и 10 введем свойства, соответствующие табл. 4.1;
- первоначально коэффициент усиления блока 11 примем равным 1;
- для отключения дифференцирующей и интегрирующей составляющих ПИД-закона регулирования коэффициентам усиления блоков 12 и 13 зададим нулевые значения;
- в блок 1 введем значение задающего воздействия, которое использовалось при моделировании процесса регулирования исходной САР (рис. 4.8, 4.9), т. е. число 13,744;
- блоку 9 зададим свойства, аналогичные свойствам такого же блока при моделировании процесса регулирования исходной САР (рис. 4.8): 5; 1; 1, что соответствует случаю, когда возмущение на модель системы соответствует номинальному расходу воздуха  $Q_{CH} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$  и оно остается неизменным до завершения конечного времени расчета (процесса моделирования);

- параметры расчета оставим такими же, как и при моделировании исходной САР (рис. 4.8, 4.9).

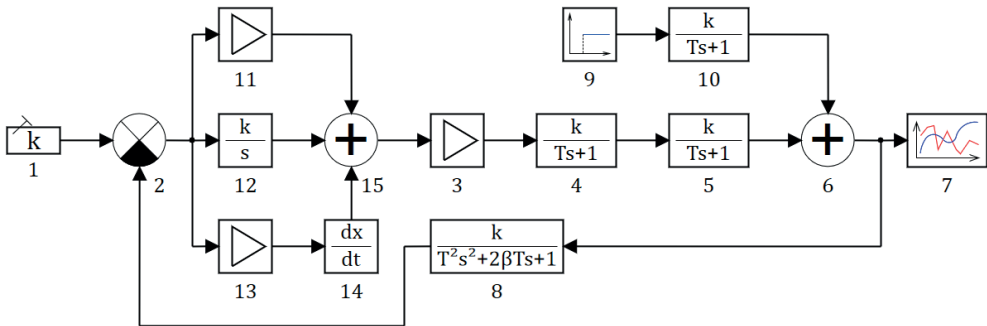


Рис. 4.13. Структурная схема моделирования в среде SimInTech скорректированной САР давления в ресивере с ПИД-регулятором

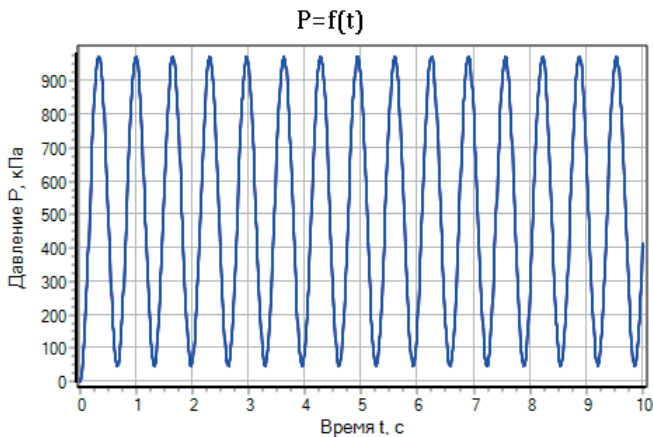


Рис. 4.14. График гармонического процесса регулирования САР на границе устойчивости

В результате моделирования на основе структурной схемы (рис. 4.13) получен график процесса регулирования САР на границе устойчивости (рис. 4.14). Значения критического коэффициента  $k_{\Pi\text{кр}}$  и периода  $T_{\text{кр}}$  гармонических колебаний регулируемой величины, найденные по результатам моделирования, следующие:  $k_{\Pi\text{кр}} = 4,402$ ;  $T_{\text{кр}} = 0,6576$  с.

Для расчета параметров  $k_{\Pi}$ ,  $k_{\text{И}}$  и  $k_{\text{Д}}$  воспользуемся формулами Циглера-Никольса применительно к ПИД-закону регулирования:

$$k_{\Pi} = 0,6k_{\Pi\text{кр}};$$

$$k_{\text{И}} = \frac{1,2 k_{\text{Пкр}}}{T_{\text{кр}}};$$

$$k_{\text{Д}} = 0,075 k_{\text{Пкр}} T_{\text{кр}}.$$

Используя последние формулы с учетом значений  $k_{\text{Пкр}}$  и  $T_{\text{кр}}$ , получим:

$$k_{\text{П}} = 0,6 \cdot 4,402 = 2,6412;$$

$$k_{\text{И}} = 1,2 \cdot 4,402 / 0,6576 = 8,0328;$$

$$k_{\text{Д}} = 0,075 \cdot 4,402 \cdot 0,6576 = 0,2171.$$

**Компьютерное моделирование скорректированной САР.** Моделирование скорректированной САР проведем на основе использованной выше компьютерной модели (рис. 4.13), после введения в блоки 11–13 параметров (свойств), рассчитанных с помощью формул Циглера-Никольса (табл. 4.2). Свойства остальных блоков компьютерной модели соответствуют табл. 4.1, значение задающего воздействия  $U_0 = 10$ .

**Таблица 4.2. Значения свойств дополнительных блоков структурной схемы (рис. 4.13)**

| Блок | Свойство                                   | Значение    |
|------|--------------------------------------------|-------------|
| 11   | Коэффициент усиления                       | 2.6412      |
| 12   | Коэффициенты усиления<br>Начальные условия | 8.0328<br>0 |
| 13   | Коэффициенты усиления                      | 0.2171      |
| 14   | Начальные условия                          | 0           |
| 15   | Весовые множители для каждого из входов    | [1,1,1]     |

На рис. 4.15 показано *графическое окно* SimInTech с переходным процессом скорректированной САР, а на рис. 4.16 – обработанный график этого переходного процесса.

Показатели качества САР, полученные на основе обработки увеличенного графика (рис. 4.16), следующие.

По заданному воздействию:

- статическая ошибка  $\Delta P_{\text{СТ}} = 0$ ;
- время регулирования  $t_{\text{р}} = 1,13$  с;
- перерегулирование  $\sigma = \frac{627,3 - 400}{400} 100\% = 56,8\%$ ;
- количество перерегулирований  $n = 1$ ;
- степень затухания  $\varphi = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\Delta P_1} 100\%$ ,

где  $\Delta P_1 = P_1 - P_{\text{УСТ}} = 627,3 - 400 = 227,3$  кПа;

$\Delta P_2 = P_2 - P_{\text{УСТ}} = 403,0 - 400 = 3,0$  кПа,

$$\varphi = \frac{227,3 - 3,0}{227,3} 100\% = 98,7\%.$$

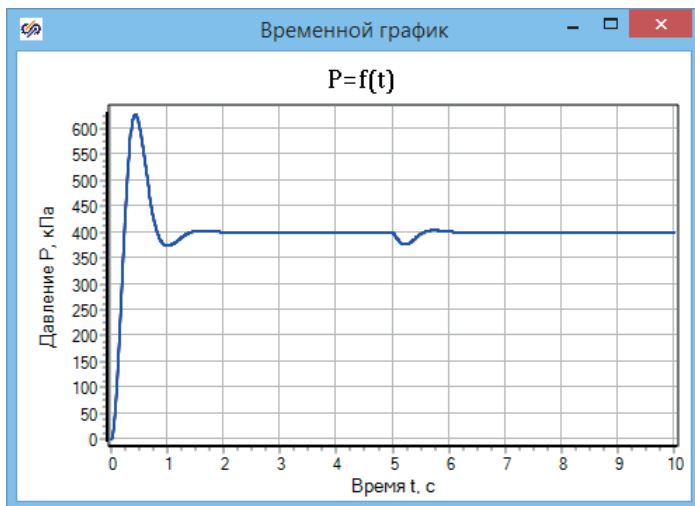


Рис. 4.15. Графическое окно с графиком переходного процесса САР с ПИД-законом регулирования ( $k_P = 2,6412$ ;  $k_I = 8,0328$ ;  $k_D = 0,2171$ )

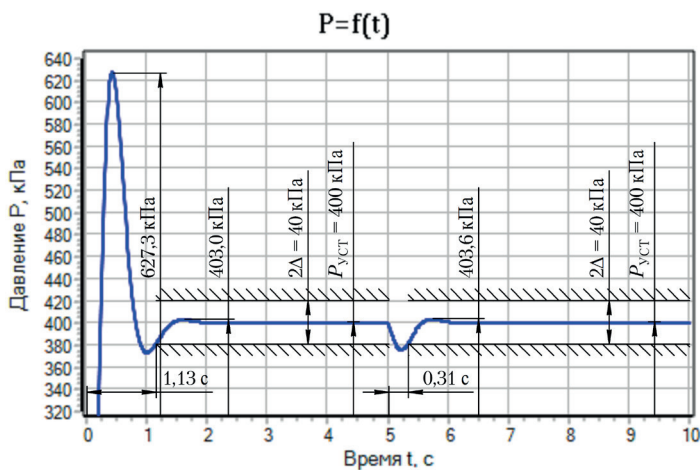


Рис. 4.16. Обработанный увеличенный график переходного процесса САР ( $k_P = 2,6412$ ;  $k_I = 8,0328$ ;  $k_D = 0,2171$ )

По возмущающему воздействию:

- статическая ошибка  $\Delta P_{СТ} = 0$ ;
- время регулирования  $t_P = 0,31$  с;
- перерегулирование  $\sigma = \frac{403,6 - 400}{400} 100\% = 0,9\%$ ;
- количество перерегулирований  $n = 0$ ;
- степень затухания  $\phi = 100\%$ .

Из анализа полученных показателей качества САР следует, что процесс регулирования при отработке задающего воздействия не удовлетворителен по перерегулированию, так как  $\sigma$ , равное 56,8%, превышает его допустимое значение ( $\sigma_{\text{доп}} \leq 20\%$ ), и времени регулирования  $t_p = 1,13$  с, которое больше заданной величины 1 с. Что касается процесса регулирования по возмущению, то он удовлетворяет требуемым показателям качества.

Известно, что метод Циглера-Никольса, с помощью которого были рассчитаны параметры ПИД-закона регулирования, не гарантирует оптимальных показателей качества процесса регулирования. Улучшенных или оптимальных показателей качества САР можно достичь либо подбором варьируемых параметров ( $k_P$ ,  $k_I$  и  $k_D$ ), либо их оптимизацией (в SimInTech есть блок «Оптимизация параметров модели», обеспечивающий параметрическую оптимизацию САР).

На рис. 4.17 показан результат моделирования САР при  $k_P = 2,36$ ,  $k_I = 2,13$  и  $k_D = 0,152$ , которые были определены подбором. Здесь следует отметить, что значения этих параметров являются не единственными, так как при других вариациях значениями  $k_P$ ,  $k_I$  и  $k_D$  возможны также переходные процессы с удовлетворительными показателями качества, соответствующими заданным условиям.

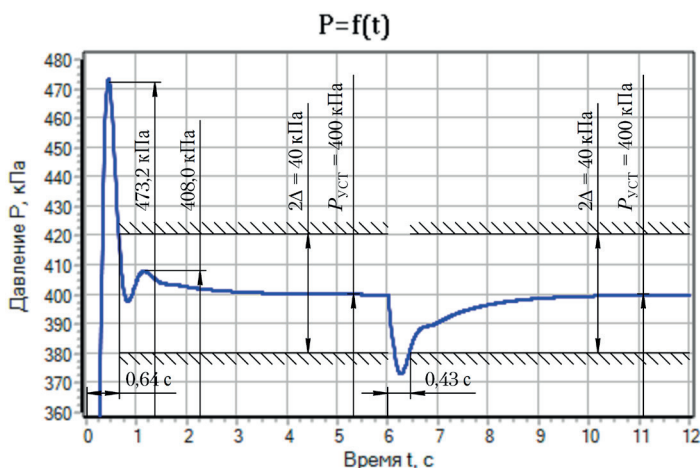


Рис. 4.17. Обработанный увеличенный график переходного процесса САР при  $k_P = 2,36$ ;  $k_I = 2,13$ ;  $k_D = 0,152$

Показатели качества САР, полученные на основе обработки графика (рис. 4.17), следующие.

По заданному воздействию:

- статическая ошибка  $\Delta P_{\text{СТ}} = 0$ ;
- время регулирования  $t_p = 0,64$  с;
- перерегулирование  $\sigma = \frac{473,2 - 400}{400} 100\% = 18,3\%$ ;
- количество перерегулирований  $n = 1$ ;

- степень затухания  $\varphi = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\Delta P_1} 100\%$ ,  
 где  $\Delta P_1 = P_1 - P_{уст} = 473,2 - 400 = 73,2$  кПа;  
 $\Delta P_2 = P_2 - P_{уст} = 408,0 - 400 = 8,0$  кПа,  
 $\varphi = \frac{73,2 - 8,0}{73,2} 100\% = 89,1\%$ .

По возмущающему воздействию:

- статическая ошибка  $\Delta P_{СТ} = 0$ ;
- время регулирования  $t_p = 0,43$  с;
- перерегулирование  $\sigma = 0$ ;
- количество перерегулирований  $n = 0$ .

Из анализа полученных показателей качества следует, что процесс регулирования САР с *ПИД-законом регулирования* удовлетворяет заданным показателям качества.

### 4.2.3. Выводы по работе

В курсовой работе решены следующие задачи и получен ряд результатов:

- составлена функциональная схема САР;
- определены передаточные функции объекта регулирования и элементов системы;
- составлена структурная схема исходной САР, на основе которой выполнено ее компьютерное моделирование;
- результаты моделирования САР показали, что *П-закон регулирования* не обеспечивает удовлетворительных показателей качества процесса регулирования;
- в ходе моделирования исходного варианта САР определены параметры процесса регулирования на границе устойчивости системы:  $k_{Пкр}$  – критический коэффициент *П-закона регулирования* и  $T_{кр}$  – период гармонических колебаний ( $k_{Пкр} = 4,402$ ;  $T_{кр} = 0,6576$  с);
- в соответствии с заданием для коррекции САР принят *ПИД-закон регулирования*, параметры которого ( $k_{П}$ ,  $k_{И}$  и  $k_{Д}$ ) рассчитаны с помощью инженерного метода Циглера-Никольса ( $k_{П} = 2,6412$ ;  $k_{И} = 8,0328$ ;  $k_{Д} = 0,2171$ );
- результаты моделирования скорректированной САР с помощью метода Циглера-Никольса показали, что она обеспечивает хорошие показатели качества процесса регулирования по возмущению, но не удовлетворяет требованиям к качеству по задающему воздействию;
- посредством подбора параметров *ПИД-закона регулирования* определены их значения ( $k_{П} = 2,36$ ;  $k_{И} = 2,13$ ;  $k_{Д} = 0,152$ ), при которых САР обеспечивает требуемые показатели качества процесса регулирования как по задающему, так и по возмущающему воздействиям.



### 4.3. Рекомендации к курсовому проектированию применительно к цифровым САР

В рамках данного учебного пособия для формирования тем и заданий курсовых работ применительно к цифровым САР (САР с микроЭВМ) предназначены приложение В (п. В.10–В.17) и приложение Г. Один из возможных вариантов задания курсовой работы следующий: «Для объекта регулирования – конусной дробилки разработайте цифровую САР, реализующую *ПИ-закон регулирования*, и определите его рациональные (оптимальные) параметры».

Конусные дробилки используются для измельчения различных полезных ископаемых материалов на обогатительных фабриках, предприятиях по производству цемента, щебня и т. п. В конусных дробилках материал разрушается в камере дробления, образованной двумя коническими поверхностями, из которых одна (внешняя) неподвижная, а другая (внутренняя) подвижная (рис. 4.18). Подвижный конус 2 жестко крепится на валу 3, нижний конец которого вставлен в эксцентриковую втулку 4 так, что ось вала образует с осью вращения (осью дробилки) некоторый угол, называемый углом прецессии. Вал подвижного конуса шарнирно крепится вверху к траверсе 1. Привод конуса осуществляется через редуктор 5 асинхронным электродвигателем 6.

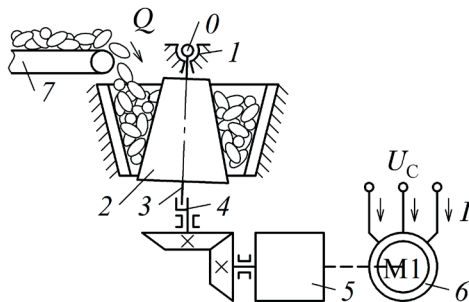


Рис. 4.18. К принципу работы конусной дробилки

При работе дробилки ось вала подвижного конуса описывает коническую поверхность с вершиной в точке  $\theta$ . В результате такого движения образующие поверхности подвижного конуса поочередно приближаются к неподвижному конусу, а затем удаляются от него, т. е. подвижный конус как бы перекачивается по неподвижному (через слой материала), благодаря чему и осуществляется непрерывное дробление материала. Измельченный материал выходит через кольцевую щель с переменной площадью в нижней части дробилки.

Чтобы не допустить перегрузку электродвигателя и дробильного агрегата в целом, необходимо стабилизировать ток электродвигателя  $I$  в пределах его номинального значения. Это достигают путем изменения подачи материала  $Q$  в дробилку с помощью питателя 7 – скребкового транспортера небольшой длины с регулируемым электроприводом. Конусную дробилку как объект автоматического регулирования характеризуют следующие величины: регулируемая величина – ток электродвигателя  $I$ , регулирующее воздействие – подача материала  $Q$ ; основные возмущения, вызывающие изменения тока нагрузки электродвигателя, – отклонение напряжения питающей сети  $\Delta U_C$  ( $\pm 10\%$  от номинального значения) и изменения подачи материала  $\Delta Q$ , вызванные изменениями его объемной массы (по причине неоднородности размеров и конфигурации отдельных кусков материала: для исходного материала при производстве щебня значение объемной массы колеблется приблизительно в пределах  $\pm 5\%$  от среднего значения). Их можно обозначить в обобщенном виде как  $f$ .

Для регулирования загрузки дробилки необходимо разработать САР, функции регулятора в которой выполняет один канал контроллера Ремиконт Р-130 (приложение Д). Поэтапная методика выполнения такого варианта курсовой работы рассмотрена в следующих подпунктах.

### 4.3.1. Разработка упрощенной принципиальной и составление функциональной схем САР

Для составления принципиальной схемы в первую очередь необходимо выбрать основные технические средства (рис. 4.19):

- датчик для контроля тока;
- тип регулируемого электропривода (ЭП).

В качестве датчика тока целесообразно использовать трехфазный трансформатор тока специального исполнения в совокупности с трехфазным выпрямителем, обеспечивающим преобразование сигнала переменного тока в постоянный.

В технологических установках, агрегатах и машинах используют различные типы регулируемых электроприводов: на базе двигателей постоянного тока; с использованием асинхронных двигателей с фазным ротором или короткозамкнутых двигателей с частотным управлением; на основе электромагнитных муфт скольжения (ЭМС).

В данной САР целесообразно применить регулируемый электропривод на базе двигателя постоянного тока, наиболее полно отвечающий технологическим требованиям. Для питания якорной обмотки двигателя используем усилитель-преобразователь (УП) – регулируемый тиристорный источник постоянного тока с предварительным усилителем входного напряжения по уровню.

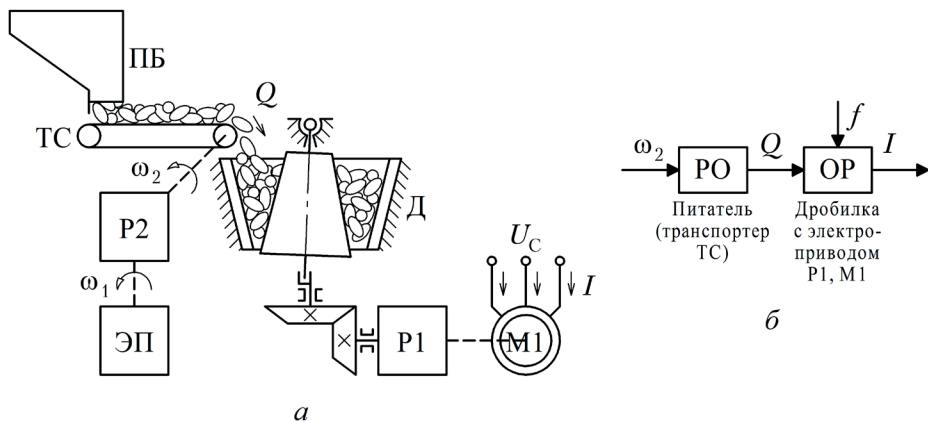


Рис. 4.19. Схематичное представление дробильного агрегата на основе конусной дробилки: а – упрощенная принципиальная схема; б – функциональная схема

Рассматриваемая САР является автоматической системой стабилизации, в которой задающее воздействие – постоянная величина. В связи с этим его целесообразно формировать программными средствами (см. п. Д.1 приложения Д).

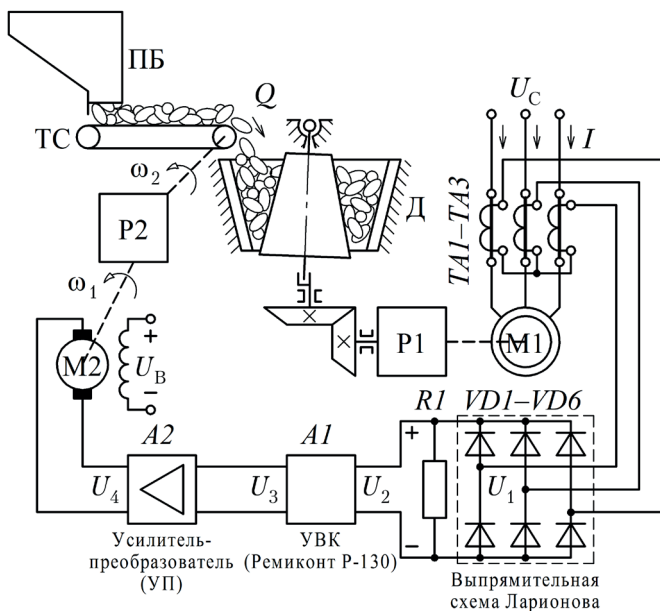


Рис. 4.20. Упрощенная принципиальная схема САР загрузки дробилки

На основе рис. 4.19 и с учетом выбранных технических средств упрощенную принципиальную схему САР можно представить в виде, показанном на рис. 4.20. Соответствующая ей функциональная схема изображена на рис. 4.21, где: ОР – объект регулирования (Д, Р1, М1); ИО – исполнительный орган (М2, Р2, ТС); УО – усилительный орган (А2); ВО – воспринимающий орган (ТА1–ТА3, VD1–VD6, Р1); УВК (управляющий вычислительный комплекс) – Ремиконт Р-130 (А1).

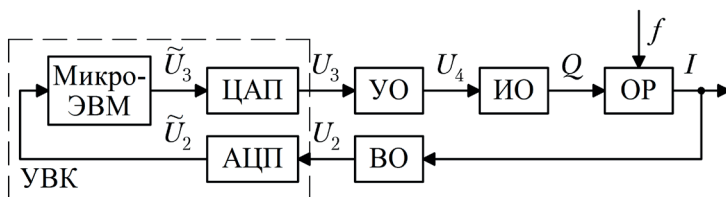


Рис. 4.21. Функциональная схема САР загрузки дробилки

САР (рис. 4.20), как отмечалось выше, должна обеспечивать стабилизацию загрузки дробилки посредством поддержания тока  $I$  приводного асинхронного двигателя М1 в пределах его номинального значения. Принцип ее работы следующий.

Регулируемая величина – ток  $I$  измеряется трансформаторами тока ТА1–ТА3 и преобразуется в переменное напряжение  $U_1$ , которое выпрямляется схемой Ларионова, образуя сигнал  $U_2$ . Аналоговый сигнал  $U_2$  в Ремиконт Р-130 (А1) с помощью АЦП преобразуется в дискретный (цифровой) сигнал  $\tilde{U}_2$ , который поступает в микроЭВМ. В микроЭВМ посредством программы формируется задающий сигнал в цифровом виде  $\tilde{U}_0$  и выполняется операция сравнения  $U_3 = \tilde{U}_0 - \tilde{U}_2$ . Цифровой сигнал  $\tilde{U}_3$  с помощью ЦАП преобразуется в аналоговый сигнал  $U_3$ . Напряжение  $U_3$  поступает на вход электронного усилителя А2, с выхода которого напряжение  $U_4$  подается на якорную обмотку двигателя М2. Увеличение напряжения  $U_4$  приводит к увеличению угловой скорости  $\omega_1$  выходного вала двигателя, а следовательно, и угловой скорости  $\omega_2$  скребкового транспортера (ТС), на который материал поступает из приемного бункера (ПБ). Снижение напряжения  $U_4$  вызывает обратный эффект – уменьшает угловую скорость ТС. С изменением скорости изменяется количество материала  $Q$ , подаваемого в дробилку Д.

Предположим, что в результате изменения возмущения  $f$  ток  $I$  стал больше номинального. Это приведет к уменьшению  $U_3$ , а следовательно, и угловой скорости  $\omega_2$  и количества материала  $Q$ . Снижение подачи материала в дробилку приводит к уменьшению тока электродвигателя. Снижение тока нагрузки приведет к росту рассогласования  $U_3$ , увеличению подачи материала  $Q$  и, следовательно, к росту тока нагрузки двигателя М1 до номинального значения.

Анализируя работу рассматриваемой САР, нетрудно понять, что в ней использован алгоритм регулирования, соответствующий пропорциональному закону регулирования (*П-закону регулирования*). То есть функционально Ремиконт Р-130, помимо операции сравнения сигналов, реализует алгоритм *П-закона регулирования*, что на функциональной схеме можно отобразить в виде виртуального алго-

ритмического блока (АБ). Тогда функциональная схема САР примет вид, показанный на рис. 4.22.

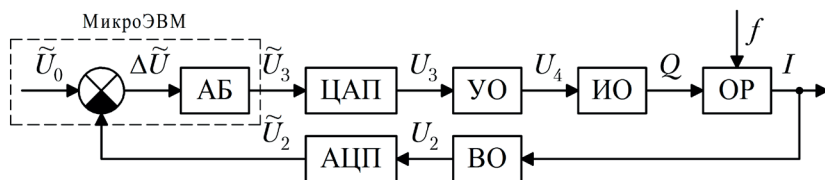


Рис. 4.22. Функциональная схема САР загрузки дробилки с отображением виртуального алгоритмического блока

В общем случае, при необходимости, виртуальный алгоритмический блок АБ может реализовать любой по сложности алгоритм регулирования, в том числе ПИ-, ПД- и ПИД-законы *регулирования*.

Схема (рис. 4.22) отображает функциональное назначение элементов в обобщенном виде. На ее основе, раскрыв каждый элемент, в соответствии с принципиальной схемой (рис. 4.20) функциональную схему САР можно изобразить в виде совокупности используемых в системе технических средств (рис. 4.23).

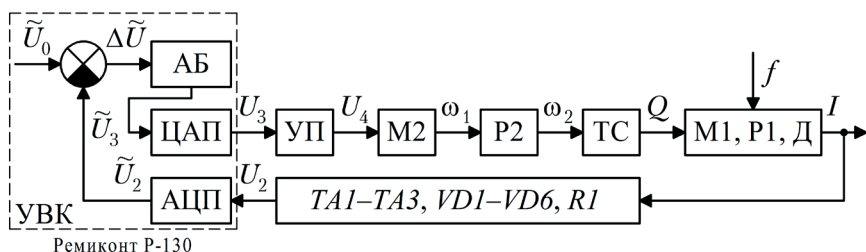


Рис. 4.23. Функциональная схема САР загрузки дробилки с отображением технических средств

### 4.3.2. Составление структурной схемы САР

Структурные схемы САР (см. приложение А) составляют на основе их функциональных схем и передаточных функций объектов регулирования и входящих в систему элементов. Передаточные функции для многих объектов регулирования и средств автоматизации определены и приводятся в учебной и справочной литературе по автоматике. Иногда вместо передаточных функций приводятся их дифференциальные уравнения. В таком случае необходимо на их основе найти передаточные функции, используя преобразование Лапласа или формальное правило.

Методика составления структурных схем САР достаточно проста. Ее сущность состоит в следующем. Изображается схема, подобная функциональной схеме, в прямоугольниках которой вместо функциональных обозначений показываются

передаточные функции. В некоторых случаях, когда функциональные элементы САР представляют несколько физических элементов, они на структурных схемах отображаются несколькими прямоугольниками и соответствующими передаточными функциями. Объекты регулирования на структурных схемах изображаются определенным количеством прямоугольников, сопрягающихся на выходе с помощью сумматора. Их количество определяется количеством возмущений, действующих на объекты регулирования. На всех входах и выходах элементов структурной схемы показываются изображения по Лапласу входных и выходных величин (координат) или соответствующие им физические величины (как на функциональных схемах).

Передаточные функции элементов САР (рис. 4.23) имеют следующий вид:

- объект регулирования по регулируемому воздействию:

$$W_{O1}(s) = \frac{k_{O1}}{T_O s + 1};$$

- объект регулирования по возмущающему воздействию:

$$W_{O2}(s) = \frac{k_{O2}}{T_O s + 1};$$

- усилитель-преобразователь А2:

$$W_Y(s) = \frac{k_Y}{T_Y s + 1};$$

- двигатель постоянного тока М2:

$$W_M(s) = \frac{k_M}{T_M s + 1};$$

- редуктор Р2:

$$W_P(s) = k_P;$$

- питатель – скребковый транспортер ТС:

$$W_T(s) = k_T;$$

- трансформаторы тока ТА1–ТА3 и выпрямитель VD1–VD6 с нагрузкой R1:

$$W_B(s) = k_B;$$

- алгоритмический блок АБ, реализующий ПИ-закон регулирования:

$$W_{AB}(s) = W_{ПИ}(s) = k_{II} + \frac{k_I}{s}.$$

Параметры передаточных функций имеют следующий физический смысл:  $k_{O1}$ ,  $k_{O2}$ ,  $k_Y$ ,  $k_M$ ,  $k_P$ ,  $k_T$ ,  $k_B$ ,  $k_{II}$ ,  $k_I$  – коэффициенты передачи;  $T_O$ ,  $T_Y$ ,  $T_M$  – постоянные времени.

Значения параметров передаточных функций:  $k_{O1} = 5,8 \text{ А} \cdot \text{с/кг}$ ;  $T_O = 1,5 \text{ с}$ ;  $k_{O2} = 0,33 \text{ А/В}$ ;  $k_Y = 10 \dots 20$ ;  $T_Y = 0,1 \text{ с}$ ;  $k_M = 3,17 \text{ рад/(с} \cdot \text{В)}$ ;  $T_M = 0,3 \text{ с}$ ;  $k_P = 0,43$ ;

$k_T = 0,4$  кг/рад;  $k_B = 0,18$  В/А. Значение передаточных коэффициентов  $k_{\Pi}$  и  $k_{\Pi\Pi}$  ПИ-закона регулирования, который реализует алгоблок АБ, подлежат определению в результате синтеза САР. Номинальный ток  $I_H = 110$  А.

**Примечание:** приведенные выше числовые значения параметров САР определены применительно к конусной дробилке среднего дробления КСД-900Гр, используемой в технологической линии по производству щебня из твердых горных пород; мощность электродвигателя 55 кВт.

Основываясь на функциональной схеме (рис. 4.23) и приведенных выше передаточных функциях, структурную схему САР можно изобразить в виде, показанном на рис. 4.24. На структурной схеме, как и на функциональной, для наглядности показаны физические величины.

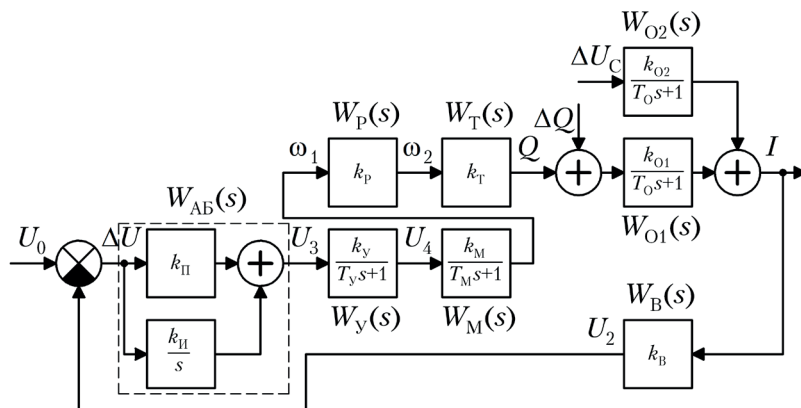


Рис. 4.24. Исходная структурная схема САР загрузки дробилки

### 4.3.3. Обоснование типа структурной модели

Как известно (см. приложение Д), в зависимости от соотношения периода квантования и параметров объекта регулирования, для исследования цифровых САР можно применять методы теории непрерывных или дискретных систем регулирования. Если условие теоремы Котельникова (Д.21) выполняется, то САР с микроЭВМ можно рассматривать как непрерывную, используя для ее анализа и синтеза исходную непрерывную структурную модель (схему); если условие теоремы Котельникова не выполняется, то САР с микроЭВМ следует рассматривать как дискретную систему. В таком случае ее исследование следует проводить на основе следующих структурных моделей цифровых САР:

- непрерывной модели (см. как пример рис. 1.42);
- непрерывно-дискретной модели (см. как пример рис. 1.44).

Таким образом, вначале следует оценить возможность непосредственного использования исходной непрерывной модели. Для такой оценки на основе условия теоремы Котельникова (Д.21) необходимо располагать граничным значением периода квантования сигналов по времени  $T_{\Gamma}$ . Его определяют по АЧХ непрерывной части системы или на так называемой приведенной постоянной времени объекта регулирования, которую находят с учетом динамических свойств ее элементов. В последнем случае используют соотношение, которое записывают как

$$T_{\Gamma} = 0,1T_{\Pi},$$

где  $T_{\Pi}$  – постоянная времени приведенного объекта регулирования, с.

Основываясь на последней формуле, определим  $T_{\Gamma}$ , используя структурную схему (рис. 4.24). Ее анализ показывает, что инерционными свойствами обладают объект регулирования ( $T_O = 1,5$  с), усилитель-преобразователь УП ( $T_Y = 0,1$  с) и двигатель постоянного тока М2 ( $T_M = 0,3$  с). Следовательно, приведенная постоянная времени  $T_{\Pi} = T_O + T_Y + T_M = 1,5 + 0,1 + 0,3 = 1,9$  с, а  $T_{\Gamma} = 0,1T_{\Pi} = 0,1 \cdot 1,9 = 0,19$  с. Для выполнения условия (Д.24), вытекающего из теоремы Котельникова, необходимо, чтобы  $T \leq T_{\Gamma}$ .

Анализ значения  $T_{\Gamma}$ , исходя из технической характеристики Ремиконт Р-130 (см. п. Д.4 приложения Д), показывает, что условие (Д.24) не выполняется, так как минимальное значение периода квантования, которое может обеспечить Ремиконт Р-130,  $T = 0,2$  с. Следовательно, рассматриваемую цифровую САР следует исследовать как дискретную систему.

Наиболее просто анализ и синтез цифровых САР выполняются приближенно на основе непрерывных моделей, в которых процесс квантования (дискретизация) сигналов по времени учитывается дополнительным звеном запаздывания с передаточной функцией  $W_{33}(s) = e^{-0,5Ts}$  (где  $T$  – период квантования, с). Такой подход позволяет достаточно просто получать структурные схемы дискретных систем, в которых роль цифровых регуляторов выполняют микроЭВМ. Применительно к структурной схеме (рис. 4.24), приняв период квантования  $T = 0,2$  с ( $\tau_{33} = T/2 = 0,1$  с), структурная схема примет вид, показанный на рис. 4.25 (АБ в исходной системе реализует *ПИ-закон регулирования*).

Более точно исследуются цифровые САР на основе их непрерывно-дискретных моделей, которые строят следующим образом: заменяют аналоговый АБ на дискретный с дискретной передаточной функцией  $W_{AB}(z)$  и дополняют дискретную часть системы экстраполятором нулевого порядка Э. Такая модель для САР конусной дробилки показана на рис. 4.26.

На основе полученных структурных схем (рис. 4.25, 4.26) дальнейшие этапы выполнения курсовой работы аналогичны последовательности, рассмотренной в п. 4.2.2.



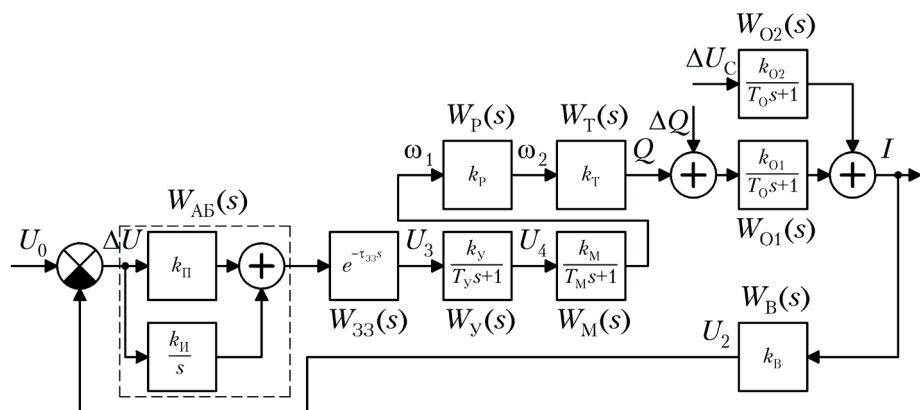


Рис. 4.25. Структурная схема дискретной (цифровой) САР загрузки дробилки в виде непрерывной математической модели

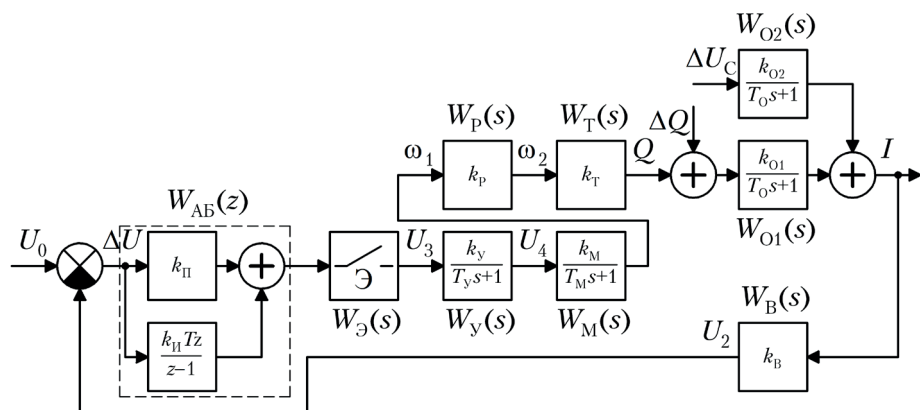


Рис. 4.26. Структурная схема цифровой САР загрузки дробилки в виде непрерывно-дискретной математической модели

На рис. 4.27 и 4.29, для иллюстрации, показаны компьютерные модели цифровой САР загрузки дробилки в среде SimInTech, а на рис. 4.28 и 4.30 – результаты их моделирования.

При моделировании приняты: задающее воздействие  $U_0 = 19,8$  В; возмущения на систему  $\Delta U_C = +38$  В в момент времени 15 с,  $\Delta Q = -1$  кг/с в момент времени 30 с; передаточные коэффициенты  $k_{\Pi} = 0,2017$  и  $k_{\Pi} = 0,1779$ .

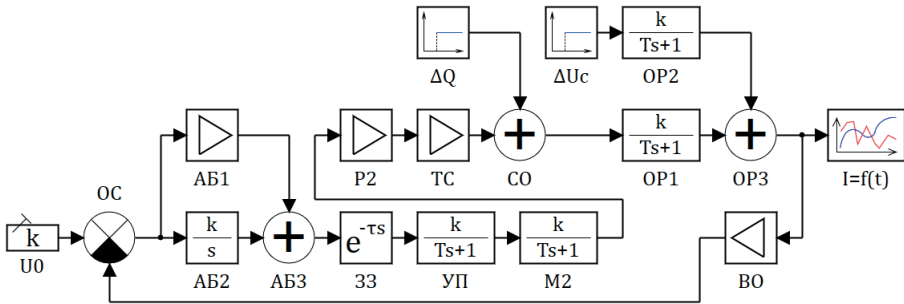


Рис. 4.27. Непрерывная модель САР загрузки дробилки в среде SimInTech

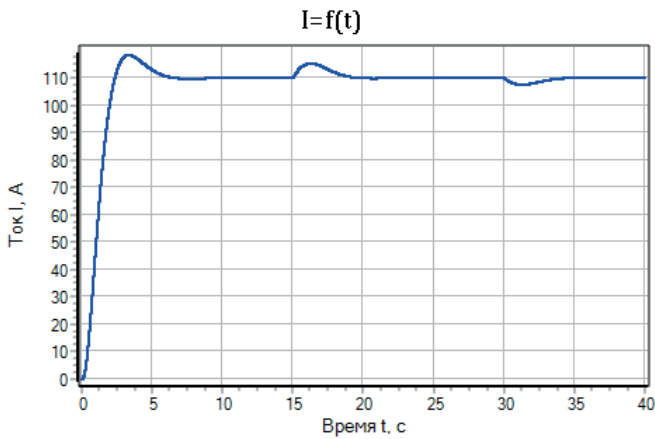


Рис. 4.28. График переходного процесса в непрерывной модели САР

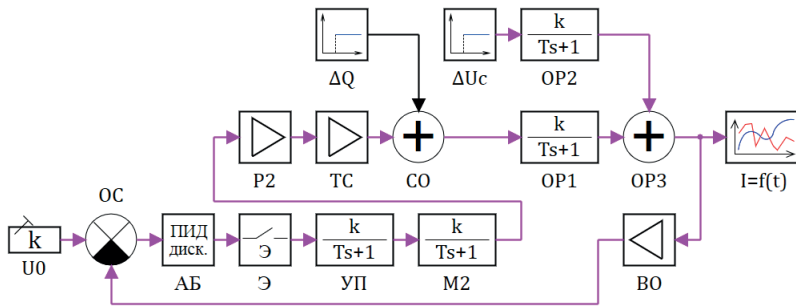


Рис. 4.29. Непрерывно-дискретная модель САР загрузки дробилки в среде SimInTech

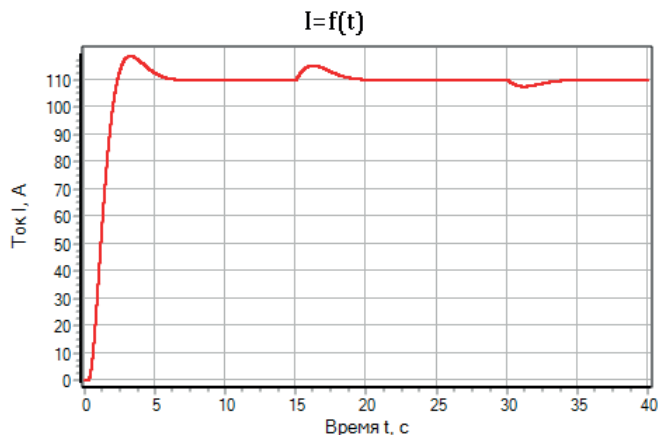


Рис. 4.30. График переходного процесса в непрерывно-дискретной модели САР

Сравнительный анализ результатов моделирования САР загрузки дробилки на основе ее непрерывной (рис. 4.27) и непрерывно-дискретной (рис. 4.29) моделей выявил, что графики полученных переходных процессов практически идентичны.

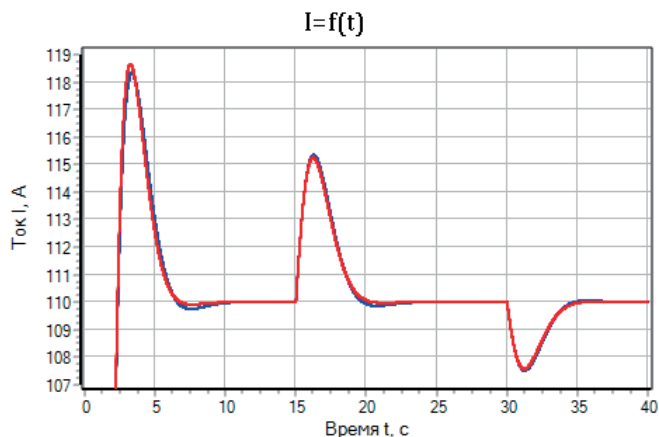


Рис. 4.31. Совмещенные графики переходных процессов в непрерывной и непрерывно-дискретной моделях САР

**Примечание:** если для исследования цифровой САР принята непрерывно-дискретная модель, то предварительно, как отмечалось выше, необходимо определить дискретную передаточную функцию заданного алгоритмического блока. Ее можно найти на основе одного из трех методов:

- используя дискретное преобразование Лапласа (Д.9);
- с помощью табл. Д.2;

- применяя преобразования Эйлера (Д.13) или Тустена (Д.14).

Из этих методов наиболее предпочтителен последний метод, поскольку в большинстве микроЭВМ вычислительный процесс реализуется на основе метода прямой (Эйлера) или трапеции (Тустена). Для реализации дискретного *ПИД-регулятора* (рис. 4.29) в среде SimInTech использовано преобразование Эйлера.

В качестве примера операцию такого преобразования рассмотрим применительно к передаточной функции *ПИ-закона регулирования*

$$W_{AB}(s) = W_{ПИ}(s) = k_{П} + \frac{k_{И}}{s},$$

используя преобразование Тустена.

В соответствии с преобразованием Тустена (Д.14) производим замену оператора  $s$  в передаточной функции  $W_{ПИ}(s)$  выражением  $\frac{2(z-1)}{T(z+1)}$ . В результате получим:

$$\begin{aligned} W_{ПИ}(z) &= W_{ПИ}(s) \Big|_{s=\frac{2(z-1)}{T(z+1)}} = k_{П} + \frac{k_{И}}{s} \Big|_{s=\frac{2(z-1)}{T(z+1)}} = k_{П} + \frac{k_{И}}{\frac{2(z-1)}{T(z+1)}} = \\ &= \frac{k_{П} 2(z-1) + k_{И} T(z+1)}{2(z-1)} = \frac{(k_{П} + 0,5k_{И}T)z + (-k_{П} + 0,5k_{И}T)}{z-1}. \end{aligned}$$

Полученную передаточную функцию при моделировании в среде SimInTech можно реализовать с помощью блока *Дискретная передаточная функция общего вида* (см. приложение Ж).

# К построению структурных схем систем автоматического регулирования



Для успешного освоения методов моделирования САР, рассматриваемых в настоящем учебном пособии, его пользователи должны иметь определенные знания по основным положениям теории автоматического регулирования и, в частности, по таким базовым понятиям, как функциональные элементы и схемы, передаточные функции и структурные схемы, необходимым при разработке структурных математических моделей. Учитывая, что пособие предназначено для широкого круга обучающихся, использующих разнообразные учебники по теории автоматического управления и регулирования, в которых нет единообразия в некоторых терминах и определениях, авторы посчитали целесообразным, для систематизации, рассмотреть в данном приложении термины, понятия и отдельные методы, используемые в пособии при построении структурных математических моделей.

---

**Примечание:** материал данного приложения является не только справочно-систематизирующим, но и практическим руководством при выполнении большинства заданий приложений Б и В, исходные математические модели САР в которых заданы в виде систем дифференциальных и алгебраических уравнений, на основе которых обучающиеся должны формировать модели в виде структурных схем.

---

## А.1. Функциональные элементы и схемы

Первым этапом составления структурной математической модели является разработка **функциональной схемы**, которая отражает функциональное назначение отдельных элементов системы и их взаимосвязи (элемент обеспечивает качественное или количественное преобразование входной физической величины и передачу сигнала от предыдущего элемента к последующему).

В терминологии, относящейся к элементам САР, используемой в различных учебниках и пособиях, нет единой трактовки: в одних книгах их называют непосредственно элементами, в других – устройствами, органами. В данном пособии использована терминология, принятая в [9, 11], в соответствии с которой функциональные элементы подразделяют на: **воспринимающие, преобразующие, ис-**

полнительные, регулирующие, задающие и корректирующие органы (устройства), а также на устройства сложения и вычитания сигналов.

**Воспринимающие органы (устройства)** выполняют функции измерения и преобразования контролируемой или управляемой величины объекта управления в сигнал, удобный для передачи и дальнейшей обработки. Примеры: датчики для измерения температуры (термопары, терморезисторы), влажности, линейных и угловых скоростей и ускорений, силы и т. д.

**Усилительные органы (устройства)**, усилители: их функции – не изменяя физической природы сигнала, увеличивать его до требуемого значения. В автоматических системах применяются механические, гидравлические, электронные, магнитные, электромеханические (электромагнитные реле, магнитные пускатели), электромашинные усилители и т. п.

**Преобразующие органы (устройства)** выполняют функции преобразования сигналов одной физической природы в сигналы другой физической природы для удобства дальнейшей передачи и обработки. Примеры: преобразователи неэлектрических величин в электрические.

**Исполнительные органы (устройства)** предназначены для изменения значения управляющего воздействия на объекте управления, если объект представляет собой единое целое с управляющим органом, либо для изменения входных величин (координат) **регулирующего органа**. По принципу работы и конструкции исполнительные и регулирующие элементы многообразны. Примеры: нагревательные элементы в системах управления температурой, вентили и клапаны с электрическим приводом в системах регулирования расхода жидкости и газа и т. д.

**Задающие органы (устройства)** выполняют функции задания требуемого значения управляемой величины.

**Корректирующие органы (устройства)** служат для коррекции САР с целью улучшения их работы.

Все рассмотренные элементы условно изображают в виде, показанном на рис. А.1.

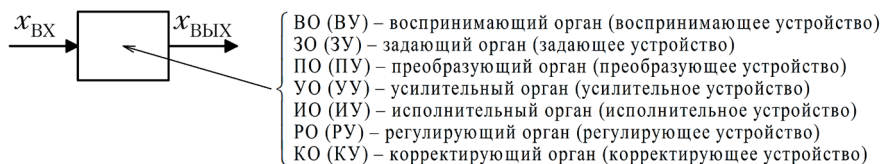


Рис. А.1. Условное обозначение элементов САР:

$x_{BX}$  – входная величина (координата, входной сигнал);

$x_{BYX}$  – выходная величина (координата, выходной сигнал)

Для сложения и вычитания сигналов применяют соответственно **устройства сложения и вычитания**. Они изображены на рис. А.2.

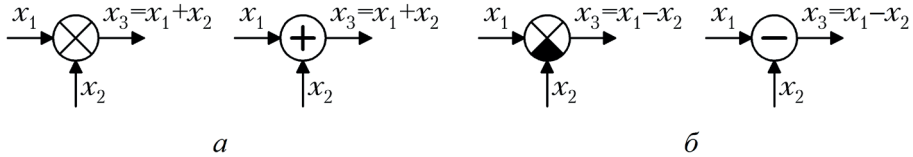


Рис. А.2. Графическое изображение устройств сложения (а) и вычитания (б) сигналов

При большом количестве входных величин (сигналов) устройства сложения и вычитания изображают в виде прямоугольников (рис. А.3).

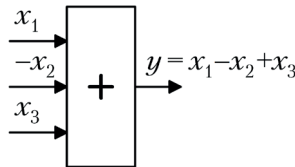


Рис. А.3. Графическое изображение устройства сложения и вычитания с несколькими входными сигналами

Традиционное представление функциональных схем САР с использованием функциональных элементов, рассмотренное выше, является не единственным. Есть и другой способ, когда на функциональных схемах показывают непосредственно технические средства, на которых построена система. В учебном пособии использованы оба варианта представления функциональных схем САР.

## А.2. Передаточные функции и структурные схемы

Громоздкость и сложность исследования САР путем непосредственного решения уравнений динамики (систем интегрально-дифференциальных и алгебраических уравнений), описывающих их динамические режимы, побудили к поиску более простых методов анализа и расчета САР. В результате были разработаны методы, в основу которых положены более удобные для использования динамические характеристики. К их числу относятся так называемые **передаточные функции**, базирующиеся на таких понятиях, как **оригинал** и **изображение функции**. Если оригинал  $f(t)$  представляет собой функцию времени  $t$ , то ее изображение  $F(s)$  есть функция комплексной переменной  $s = c + j\omega$ , где  $j = \sqrt{-1}$ , определяемое прямым интегральным преобразованием Лапласа:

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt, \quad (\text{А.1})$$

где  $L$  – символ прямого преобразования Лапласа.

Применение преобразования Лапласа к дифференциальным уравнениям позволяет представить их в виде алгебраических уравнений. Дифференциальные уравнения существенно упрощаются при нулевых начальных условиях, поскольку изображения производных функции  $f(t)$  при нулевых начальных условиях определяются достаточно просто как:

$$\begin{cases} L[f'(t)] = sF(s); \\ L[f''(t)] = s^2F(s); \\ \dots \\ L[f^n(t)] = s^nF(s). \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

---

**Примечание:** в формулах (A.1) и (A.2) для оригиналов и изображений использованы общепринятые обозначения соответственно  $f(t)$  и  $F(s)$ . То есть оригиналы обозначают строчными буквенными символами, а изображения – заглавными. Выполнить такое соотношение обозначений на практике не всегда представляется возможным по той причине, что зачастую при математическом описании реальных элементов и объектов управления их входные и выходные величины (переменные), наряду со строчными буквами, обозначают заглавными буквами. В связи с этим для выбора символьного обозначения изображений целесообразно руководствоваться следующим:  $f(t) \Rightarrow f(s)$  или  $F(t) \Rightarrow F(s)$ .

---

Передаточную функцию получают на основе дифференциального уравнения после применения к нему преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях, используя следующее правило: исходное дифференциальное уравнение с помощью (A.2) переводят в область изображения, выносят из правой и левой частей уравнения за скобку изображения входной и выходной величин (переменной). Передаточную функцию определяют как отношение изображения выходной величины к изображению входной величины.

Поясним это правило применительно к элементу (звену) САР, динамические свойства которого описываются следующим дифференциальным уравнением с нулевыми начальными условиями:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = bx(t), \quad (\text{A.3})$$

где  $y(t)$ ,  $x(t)$  – выходная и входная величины;

$a_0, \dots, a_2, b$  – постоянные коэффициенты.

Преобразуем уравнение (A.3) по Лапласу как

$$a_2 s^2 y(s) + a_1 s y(s) + a_0 y(s) = bx(s), \quad (\text{A.4})$$

где  $y(s)$  и  $x(s)$  – изображения по Лапласу  $y(t)$  и  $x(t)$  при нулевых начальных условиях.

Вынесем из правой и левой частей уравнения (A.4) соответственно  $y(s)$  и  $x(s)$ , в результате чего получим:



$$y(s)(a_2s^2 + a_1s + a_0) = x(s)b. \quad (\text{A.5})$$

Из уравнения (A.5) находим изображение  $y(s)$ :

$$y(s) = \frac{b}{a_2s^2 + a_1s + a_0} x(s). \quad (\text{A.6})$$

Уравнение (A.6) определяет связь изображения  $y(s)$  выходной величины с изображением  $x(s)$  входной величины посредством оператора

$$\frac{b}{a_2s^2 + a_1s + a_0},$$

который называют передаточной функцией и обозначают как

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b}{a_2s^2 + a_1s + a_0}. \quad (\text{A.7})$$

Передаточная функция (A.7), представляющая математическую модель звена, соответствующую дифференциальному уравнению (A.3), полностью характеризует его динамику; она определяется только параметрами звена и не зависит от начальных условий и значений входного воздействия.

Математические модели на основе передаточных функций принято изображать графически в виде так называемых структурных схем (рис. A.4).

На структурных схемах для физической наглядности допускается вместо изображений показывать непосредственно переменные (для рис. A.4  $x(t)$ ,  $y(t)$ ) или, опуская символ времени  $t$  для упрощения записи, —  $x$ ,  $y$ ).

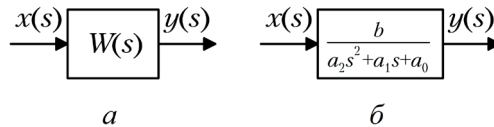


Рис. А.4. Структурная схема элемента,  
описываемого передаточной функцией (A.7):  
а — с отображением символа передаточной функции;  
б — с отображением формулы передаточной функции

Если элемент (объект регулирования) системы имеет одну выходную величину и несколько входных, то он будет описываться несколькими передаточными функциями. Их число будет равно числу входных величин. В таких случаях передаточные функции определяют по каждому воздействию. Методику определения таких передаточных функций поясним на примере термической камеры [см. п. 1.1.1, формула (1.4)], которая описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T_K \frac{d\theta_K}{dt} + \theta_K = k_K \theta_H + k_O \theta_O. \quad (\text{A.8})$$

Представим термическую камеру графически как объект регулирования в виде, показанном на рис. А.5.

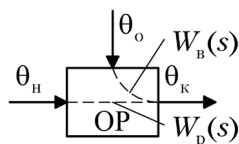


Рис. А.5. Термическая камера как объект регулирования (ОР)

Поскольку термическая камера имеет одну выходную величину  $\theta_k$  и два входных воздействия  $\theta_n$  и  $\theta_o$ , то она будет описываться двумя передаточными функциями:  $W_p(s)$  – передаточной функцией по регулируемому воздействию и  $W_b(s)$  – передаточной функцией по возмущению.

Преобразуем исходное дифференциальное уравнение (А.8) по Лапласу при нулевых начальных условиях к следующему виду:

$$T_k s \theta_k(s) + \theta_k(s) = k_k \theta_n(s) + k_o \theta_o(s),$$

где  $\theta_k(s) = L(\theta_k)$  – изображение по Лапласу регулируемой величины  $\theta_k$ ;

$s \theta_k(s) = L\left(\frac{d\theta_k}{dt}\right)$  – изображение по Лапласу производной от  $\theta_k$ ;

$\theta_n(s) = L(\theta_n)$  – изображение по Лапласу регулирующего воздействия  $\theta_n$ ;

$\theta_o(s)$  – изображение по Лапласу возмущающего воздействия  $\theta_o$ .

Вынесем за скобку из левой части последнего уравнения общий множитель  $\theta_k(s)$ , получим:

$$\theta_k(s)[T_k s + 1] = k_k \theta_n(s) + k_o \theta_o(s), \quad (\text{А.9})$$

на основе (А.9) определим изображение регулируемой величины:

$$\theta_k(s) = \frac{k_k}{T_k s + 1} \theta_n(s) + \frac{k_o}{T_k s + 1} \theta_o(s). \quad (\text{А.10})$$

Из уравнения (А.10), используя принцип суперпозиции, найдем передаточные функции термической камеры по регулируемому и возмущающему воздействиям:

$$W_p(s) = \frac{\theta_k(s)}{\theta_n(s)} = \frac{k_k}{T_k s + 1}; \quad (\text{А.11})$$

$$W_b(s) = \frac{\theta_k(s)}{\theta_o(s)} = \frac{k_o}{T_k s + 1}. \quad (\text{А.12})$$

Структурные схемы камеры, составленные на основе рис. А.5 и передаточных функций (А.11), (А.12), показаны на рис. А.6.

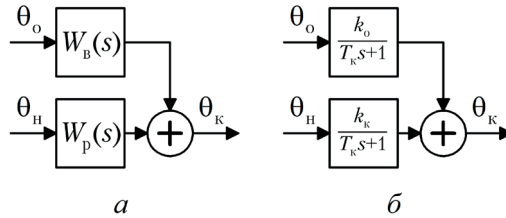


Рис. А.6. Структурные схемы термической камеры:  
а – с отображением символов передаточных функций;  
б – с отображением формул передаточных функций

Кроме рассмотренного метода, структурные схемы можно составлять непосредственно на основе дифференциальных уравнений, разрешенных относительно старшей производной при нулевых начальных условиях и записанных в операторной форме. При этом в качестве оператора дифференцирования формально допускается применять символ  $s$ , используемый в (А.1), приняв  $s = \frac{d}{dt}$ . Сущность такого подхода проиллюстрируем применительно к уравнению (А.3).

Запишем уравнение (А.3) в операторной форме и разрешим его относительно старшей производной:

$$a_2 s^2 y(t) + a_1 s y(t) + a_0 y(t) = b x(t);$$

$$s^2 y(t) = -\frac{a_1}{a_2} s y(t) - \frac{a_0}{a_2} y(t) + \frac{b}{a_2} x(t). \quad (\text{А.13})$$

Изобразим уравнение (А.13) в виде суммирующего звена (рис. А.7):

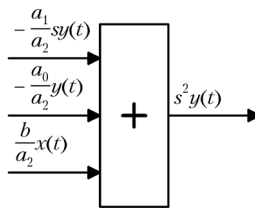


Рис. А.7. Структурная схема уравнения (А.13)  
в виде сумматора

Представим компоненты правой части уравнения (А.13) элементарными структурными схемами в виде пропорциональных звеньев (рис. А.8).

Визуальный анализ элементарных структурных схем, приведенных на рис. А.8, показывает, что на вход звена 1 необходимо подавать производную  $s y(t)$ , а на вход звена 2 – непосредственно искомую функцию  $y(t)$ . Значение  $s y(t)$ , очевидно, можно получить путем однократного интегрирования второй производной  $s^2 y(t)$ , а значение  $y(t)$  – соответственно ее двукратным интегрированием. Для это-

го структурную схему (рис. А.7) дополним двумя последовательно включенными интеграторами, как показано на рис. А.9 (интеграторы обозначают графическим символом интеграла  $\int$  или в виде аналитической записи  $-1/s$ ).

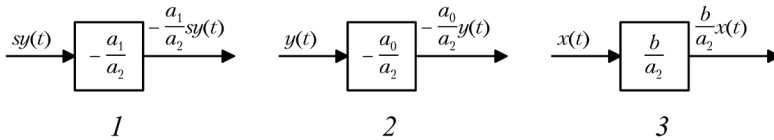


Рис. А.8. Структурные схемы составляющих правой части уравнения (А.13)

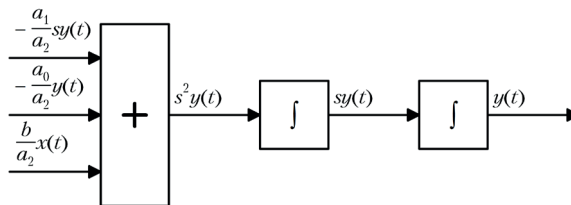


Рис. А.9. Промежуточная структурная схема уравнения (А.13) с добавлением двух интеграторов

Объединяя рис. А.8 и А.9 в одну схему и соединяя выходы интеграторов с соответствующими звеньями структурных схем 1 и 2 (рис. А.8), получим окончательную структурную схему звена описываемого дифференциального уравнения (А.13) в виде, показанном на рис. А.10.

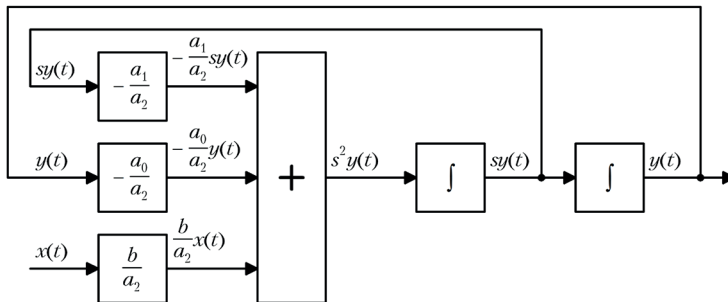


Рис. А.10. Структурная схема звена, описываемого линейным дифференциальным уравнением (А.13)

Из анализа рассмотренных методов построения структурных схем следует, что первый метод (на основе передаточных функций) проще второго метода (на основе дифференциальных уравнений). По этой причине для линейных систем преимущественное распространение нашел первый метод. Второй метод предпоч-



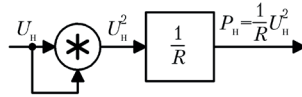


Рис. А.12. Структурная схема  
нелинейной зависимости  $P_n = f(U_n) = U_n^2/R$

В заключение следует отметить, что передаточные функции можно определять не только с помощью преобразования Лапласа (А.1), но и на основе формального правила, сущность которого заключается в следующем: дифференциальное уравнение записывают в операторной форме; затем из правой и левой частей уравнения выносят переменные и передаточную функцию находят как отношение выходной величины к входной. Так, например, применяя это правило к уравнению (А.3), передаточная функция определится как

$$W(s) = \frac{y(t)}{x(t)} = \frac{b}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (\text{А.16})$$

С точки зрения математической корректности метод отыскания передаточных функций с помощью преобразования Лапласа (А.1) безупречен. Второй метод – непосредственно на основе дифференциальных уравнений – является чисто формальным. Поскольку передаточные функции, полученные на основе этих методов, имеют одинаковый вид (см. формулы (А.7) и (А.16)), то второй метод также нашел практическое применение.

*В настоящем учебном пособии для определения передаточных функций используются метод на основе преобразования Лапласа (А.1) и в отдельных случаях формальное правило. Что касается структурных схем, то для их построения главным образом используются передаточные функции и в некоторых случаях могут встречаться структурные схемы, составленные непосредственно на основе дифференциальных уравнений.*

# Задания по линейным системам автоматического регулирования



Описания линейных САР, приведенные в п. Б.1–Б.10, предназначены для формирования разнообразных вариантов заданий по анализу (оценке устойчивости и качества) и структурно-параметрическому синтезу (определению оптимальных параметров) систем. Они применимы для самостоятельных занятий, лабораторных работ и курсового проектирования.

Задания, приведенные в п. Б.11–Б.16, предназначены для лабораторных работ 2, 3, 4 и самостоятельных занятий при освоении компьютерных методов анализа и синтеза линейных САР (САУ).

При формировании этих заданий за основу взяты задачи, примеры и задания, рассмотренные в [4, 9, 13].

## Б.1. Система автоматического регулирования температуры в помещении

Схема, показанная на рис. Б.1, представляет САР температуры в помещении, где: 1 – отапливаемое помещение; 2 – теплообменник (калорифер); 3 – измерительная мостовая схема; 4 – двухфазный исполнительный двигатель; 5 – дифференциальный магнитный усилитель; 6 – клапан (заслонка).

Объектом регулирования в данной системе является помещение, регулируемая величина которого – температура внутри помещения  $\theta$ , регулирующее (управляющее) воздействие – температура воздуха  $\theta_K$ , поступающего из калорифера, и возмущающее воздействие – изменения внешних факторов  $f$  (в общем случае изменение температуры атмосферного воздуха, его влажности, скорости ветра). При исследовании системы в качестве основного возмущения следует рассматривать изменение температуры окружающего воздуха.

Воспринимающим органом (датчиком, чувствительным элементом) в данной САР является терморезистор  $R_d$ , включенный в мостовую схему, обеспечивающую с помощью резистора  $R_0$  задание необходимого значения температуры в помещении и выполняющую также функции сравнивающего органа (элемента сравнения). Усиление сигнала  $\Delta U$  (сигнала рассогласования) измерительной мостовой схемы обеспечивается посредством усилителя. Усиленный сигнал  $U$  обеспечивает вращение двухфазного исполнительного двигателя, который изменяет величину

перемещения клапана (заслонки) на трубопроводе подачи пара в калорифер, чем достигается изменение температуры воздуха на выходе калорифера – регулирующего воздействия на объекте регулирования.

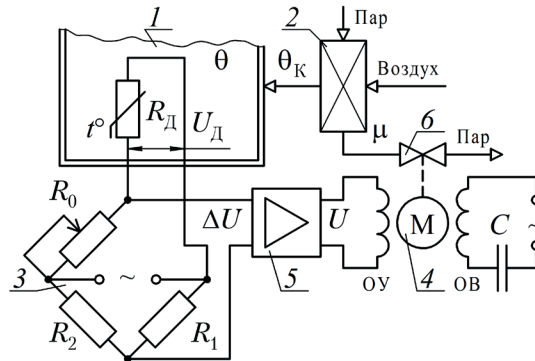


Рис. Б.1. Схема САР температуры в помещении

Динамические свойства объекта регулирования и элементов системы описываются следующими уравнениями:

- объект регулирования –  $T_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_K + kf$ ;
- датчик –  $U_d = k_1 \theta$ ;
- сравнивающий орган –  $\Delta U = U_0 - U_d$ ;
- магнитный усилитель –  $T_4 \frac{dU}{dt} + U = k_4 \Delta U$ ;
- двигатель совместно с клапаном –  $T_2 \frac{d^2 \mu}{dt^2} + \frac{d\mu}{dt} = k_2 U$ ;
- калорифер –  $T_3 \frac{d\theta_K}{dt} + \theta_K = k_3 \mu$ ,

где  $T_0, T_2, T_3, T_4$  – постоянные времени, с;

$\theta$  – значение температуры воздуха в помещении, °С;

$\theta_K$  – значение температуры воздуха на выходе калорифера, °С;

$k, k_1, k_2, k_3, k_4$  – коэффициенты передачи;

$f$  – возмущающее воздействие на объект регулирования, °С;

$U_d$  – падение напряжения на термодатчике, В;

$\Delta U$  – напряжение на выходе мостовой схемы (сигнал рассогласования), В;

$U_0$  – задающий сигнал, В;

$U$  – напряжение на выходе магнитного усилителя, В;

$\mu$  – линейное перемещение клапана, см.

Значения параметров элементов САР по вариантам даны в табл. Б.1. Заданное значение температуры в помещении  $20 \pm 1$  °С.



Таблица Б.1. Значения параметров элементов САР

| Вариант | $T_0, \text{с}$ | $T_2, \text{с}$ | $T_3, \text{с}$ | $T_4, \text{с}$ | $k$ | $k_1, \text{В/}^\circ\text{C}$ | $k_2, \text{см/(В·с)}$ | $k_3, \text{}^\circ\text{C/см}$ | $k_4$ | $f, \text{}^\circ\text{C}$ |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|--------------------------------|------------------------|---------------------------------|-------|----------------------------|
| 1       | 1000            | 0,060           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 2     | -11                        |
| 2       | 800             | 0,070           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 4     | 12                         |
| 3       | 900             | 0,080           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 6     | -8                         |
| 4       | 700             | 0,090           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 10    | 6                          |
| 5       | 500             | 0,100           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 9     | -5                         |
| 6       | 100             | 0,050           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 12    | 13                         |
| 7       | 120             | 0,055           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 14    | 12                         |
| 8       | 200             | 0,060           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 15    | -15                        |
| 9       | 300             | 0,060           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 20    | 17                         |
| 10      | 400             | 0,080           | 20              | 0,5             | 0,2 | 0,2                            | 0,002                  | 10                              | 10    | -18                        |

## Б.2. Система автоматического регулирования температуры в печи

На рис. Б.2 приведена схема САР температуры в печи для обжига кирпича, где: 1 – печь; 2 – измерительная мостовая схема; 3 – дифференциальный магнитный усилитель; 4 – двухфазный электродвигатель; 5 – редуктор; 6 – клапан.

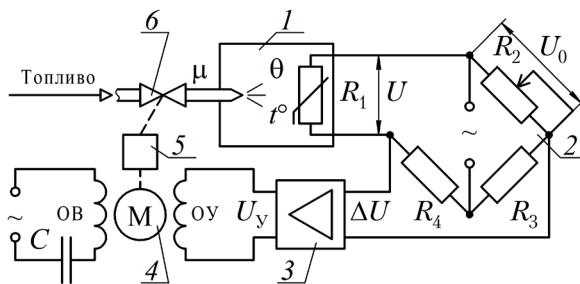


Рис. Б.2. Схема САР температуры в печи

В данной системе печь представляет собой объект регулирования, регулируемой величиной которого является температура  $\theta$  в печи, а регулирующим (управляющим) воздействием – линейное перемещение клапана  $\mu$ , от величины которого зависит количество топлива, подаваемого в форсунку, а следовательно, и количество теплоты, выделяемой при его сгорании.

Внешним возмущающим воздействием  $f$  является совокупность разнообразных факторов: исходной влажности, температуры обжигаемого кирпича, изменения температуры и влажности атмосферного воздуха. При исследовании системы можно ограничиться учетом влияния на объект регулирования исходной влажности кирпича, рассматривая ее как основное возмущающее воздействие.

Функции воспринимающего органа в САР выполняет медный терморезистор  $R_1$ , включенный в мостовую схему, обеспечивающую задание требуемого значения температуры в печи посредством резистора  $R_2$ . Мостовая схема также сравнивает напряжение  $U$ , пропорциональное температуре в печи  $\theta$ , с задающим напряжением  $U_0$ , то есть она, помимо функций задающего органа, выполняет функции сравнивающего органа (элемента).

Напряжение разбаланса мостовой схемы  $\Delta U$  (сигнала рассогласования) усиливается усилителем, выходное напряжение которого управляет исполнительным двигателем. Последний через редуктор перемещает клапан, т. е. изменяет величину регулирующего воздействия  $\mu$  на входе объекта регулирования.

Динамические свойства САР описываются следующими уравнениями:

- объект регулирования –  $T_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = k_0 \mu - k_1 f$ ;
- датчик температуры –  $U = k_2 \theta$ ;
- сравнивающий орган –  $\Delta U = U_0 - U$ ;
- дифференциальный магнитный усилитель –  $T_1 \frac{dU_y}{dt} + U_y = k_3 \Delta U$ ;
- исполнительный двигатель с редуктором и клапаном –  $T_2 \frac{d^2 \mu}{dt^2} + \frac{d\mu}{dt} = k_4 U_y$ ,

где  $T_0, T_1, T_2$  – постоянные времени, с;

$\theta$  – значение температуры воздуха в печи, °C;

$k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  – коэффициенты передачи;

$\mu$  – линейное перемещение клапана, см;

$f$  – возмущающее воздействие на объект регулирования, %;

$U$  – падение напряжения на терморезисторе, В;

$\Delta U$  – сигнал разбаланса мостовой схемы (сигнал рассогласования), В;

$U_0$  – падение напряжения на задающем резисторе  $R_2$ , В;

$U_y$  – напряжение на выходе усилителя, В.

Значения параметров САР по вариантам указаны в табл. Б.2. Заданное значение температуры в печи  $950 \pm 10$  °C.

**Таблица Б.2. Значения параметров элементов САР**

| Вариант | $T_0$ , с | $T_1$ , с | $T_2$ , с | $k_0$ , °C/см | $k_1$ , °C/% | $k_2$ , В/°C | $k_3$ | $k_4$ , см/(В·с) | $f$ , % |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------------|--------------|--------------|-------|------------------|---------|
| 1       | 2,0       | 0,06      | 0,050     | 50            | 2            | 0,8          | 5     | 0,02             | 50      |
| 2       | 1,8       | 0,06      | 0,040     | 50            | 2            | 0,8          | 4     | 0,02             | 60      |
| 3       | 1,7       | 0,06      | 0,030     | 50            | 2            | 0,8          | 3     | 0,02             | 70      |
| 4       | 1,6       | 0,06      | 0,020     | 50            | 2            | 0,8          | 5     | 0,02             | 60      |
| 5       | 1,5       | 0,06      | 0,015     | 50            | 2            | 0,8          | 6     | 0,02             | 60      |
| 6       | 1,4       | 0,06      | 0,016     | 50            | 2            | 0,8          | 7     | 0,02             | 50      |
| 7       | 1,3       | 0,06      | 0,017     | 50            | 2            | 0,8          | 5     | 0,02             | 50      |
| 8       | 1,2       | 0,06      | 0,022     | 50            | 2            | 0,8          | 4     | 0,02             | 45      |
| 9       | 5,0       | 0,06      | 0,024     | 50            | 2            | 0,8          | 2     | 0,02             | 50      |
| 10      | 4,5       | 0,06      | 0,026     | 50            | 2            | 0,8          | 2     | 0,02             | 45      |

### Б.3. Система автоматического регулирования температуры теплоносителя зерносушилки

На рис. Б.3 показана схема САР температуры теплоносителя, поступающего в шахтную зерносушилку 1 из камеры смешивания 2, которая является объектом регулирования. В этой камере холодный воздух при температуре  $\theta_x$  смешивается с горячим воздухом температурой  $\theta_r$ . Соотношение горячего и холодного воздуха, а следовательно, и температура воздуха в камере смешивания  $\theta_c$  зависят от угла поворота  $\varphi$  заслонки 7. Температура теплоносителя на входе зерносушилки измеряется терморезистором  $R_d$ , включенным в мостовую схему 3, которая не только обеспечивает с помощью резистора  $R_0$  требуемую температуру, но и сравнивает напряжение  $U_d$ , пропорциональное температуре  $\theta_c$ , с задающим напряжением  $U_0$  (мостовая схема одновременно выполняет функции задающего и воспринимающего органов).

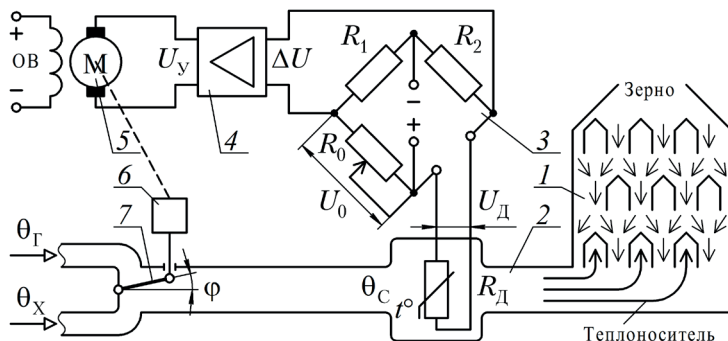


Рис. Б.3. Схема САР температуры теплоносителя, поступающего в зерносушилку

Сигнал разбаланса мостовой схемы (сигнал рассогласования)  $\Delta U$  усиливается усилителем 4, выходное напряжение которого  $U_y$  управляет исполнительным двигателем 5. Последний через редуктор 6 перемещает заслонку 7, тем самым изменяет величину регулирующего воздействия  $\varphi$  на входе объекта регулирования. За счет соответствующего изменения угла поворота заслонки и компенсируется отрицательное влияние внешних возмущений  $f$  (изменение температуры, влажности атмосферного воздуха и др.), действующих на объект регулирования. При исследовании САР в качестве главного возмущения следует рассматривать изменение температуры атмосферного воздуха, приняв условно, что его влажность не меняется.

Динамика элементов САР описывается следующими уравнениями:

- камера смешивания –  $T_c \frac{d\theta_c}{dt} + \theta_c = k_c \varphi + k_f f$ ;
- датчик температуры –  $T_d \frac{dU_d}{dt} + U_d = k_d \theta_c$ ;

- сравнивающий элемент –  $\Delta U = U_0 - U_{\text{д}}$ ;
- усилитель –  $U_{\text{у}} = k_{\text{у}} \Delta U$ ;
- электродвигатель совместно с редуктором (при условии, что момент сопро-

тивления на валу двигателя  $M_{\text{с}} = \text{const}$ ) –  $T_{\text{м}} T_{\text{э}} \frac{d^3 \varphi}{dt^3} + T_{\text{м}} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = k_{\text{э}} U$ ,

где  $T_{\text{с}}$ ,  $T_{\text{д}}$ ,  $T_{\text{м}}$ ,  $T_{\text{э}}$  – постоянные времени, с;  
 $k_{\text{с}}$ ,  $k_{\text{f}}$ ,  $k_{\text{д}}$ ,  $k_{\text{у}}$ ,  $k_{\text{э}}$  – коэффициенты передачи.

Размерность и значения переменных по вариантам даны в табл. Б.3. Заданная температура теплоносителя  $120 \pm 3^\circ \text{C}$ .

Таблица Б.3. Значения параметров элементов САР

| Вариант | $T_{\text{с}}, \text{с}$ | $T_{\text{д}}, \text{с}$ | $T_{\text{м}}, \text{с}$ | $T_{\text{э}}, \text{с}$ | $k_{\text{с}}, ^\circ \text{C/рад}$ | $k_{\text{f}}$ | $k_{\text{д}}, \text{В/}^\circ \text{C}$ | $k_{\text{у}}$ | $k_{\text{э}}, \text{рад/(В·с)}$ | $f, ^\circ \text{C}$ |
|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------|
| 1       | 2,0                      | 2,0                      | 0,015                    | 0,002                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 50             | 0,05                             | –10                  |
| 2       | 1,8                      | 1,5                      | 0,016                    | 0,005                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 60             | 0,05                             | 15                   |
| 3       | 1,4                      | 3,0                      | 0,018                    | 0,003                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 70             | 0,05                             | –20                  |
| 4       | 1,1                      | 2,5                      | 0,020                    | 0,004                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 80             | 0,05                             | 12                   |
| 5       | 1,0                      | 4,0                      | 0,015                    | 0,005                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 90             | 0,05                             | –14                  |
| 6       | 1,3                      | 1,3                      | 0,018                    | 0,002                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 100            | 0,05                             | 20                   |
| 7       | 0,8                      | 1,1                      | 0,020                    | 0,003                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 80             | 0,05                             | –10                  |
| 8       | 0,9                      | 1,7                      | 0,010                    | 0,004                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 85             | 0,05                             | 15                   |
| 9       | 1,4                      | 1,8                      | 0,012                    | 0,005                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 70             | 0,05                             | –20                  |
| 10      | 1,7                      | 1,9                      | 0,014                    | 0,002                    | 50                                  | 1              | 0,015                                    | 75             | 0,05                             | 10                   |

## Б.4. Система автоматического регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока

Схема САР, приведенная на рис. Б.4, обеспечивает стабилизацию угловой скорости двигателя постоянного тока, где: 1 – задающий резистор (потенциометр); 2 – тиристорный усилитель-преобразователь (тиристорный преобразователь совместно с усилителем напряжения по уровню); 3 – генератор; 4 – электродвигатель; 5 – тахогенератор; 6 – рабочая машина (рабочий механизм).

Двигатель постоянного тока совместно с рабочим механизмом является объектом регулирования. Регулируемая величина объекта – угловая скорость электродвигателя  $\omega$ , его регулирующее воздействие – напряжение  $U_{\text{р}}$ , подаваемое от генератора на якорь электродвигателя. Возмущающее воздействие на объекте регулирования – момент сопротивления  $M_{\text{с}}$ , создаваемый рабочей машиной. Угловая скорость электродвигателя  $\omega$  контролируется тахогенератором, сигнал которого  $U_{\text{тг}}$ , пропорциональный скорости, сравнивается с задающим сигналом  $U_{\text{з}}$ . Сигнал рассогласования  $\Delta U$  усиливается тиристорным усилителем-преобразователем и воздействует на обмотку возбуждения генератора, выполняющего функции исполнительного органа (элемента).

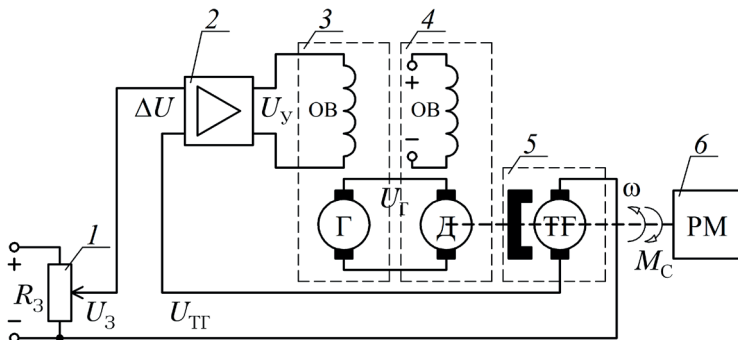


Рис. Б.4. Система автоматического регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующими уравнениями:

- объект регулирования –  $T_D \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_D U_\Gamma - k_M M_C$ ;
- датчик (воспринимающий орган) –  $U_{TT} = k_{TT} \omega$ ;
- сравнивающий орган –  $\Delta U = U_3 - U_{TT}$ ;
- тиристорный усилитель-преобразователь –  $T_Y \frac{dU_Y}{dt} + U_Y = k_Y \Delta U$ ;
- генератор –  $T_\Gamma \frac{dU_\Gamma}{dt} + U_\Gamma = k_\Gamma U_Y$ ,

где  $T_D, T_Y, T_\Gamma$  – постоянные времени, с;  
 $k_D, k_M, k_{TT}, k_Y, k_\Gamma$  – коэффициенты передачи.

Числовые значения параметров САР для различных вариантов приведены в табл. Б.4. Заданное значение угловой скорости  $40 \pm 1$  рад/с.

Таблица Б.4. Значения параметров элементов САР

| Вариант | $T_D$ , с | $T_Y$ , с | $T_\Gamma$ , с | $k_D$ , рад/(с·В) | $k_M$ , рад/(с·Н·м) | $k_{TT}$ , В·с/рад | $k_Y$ | $k_\Gamma$ | $M_C$ , Н·м |
|---------|-----------|-----------|----------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------|------------|-------------|
| 1       | 0,50      | 0,020     | 0,10           | 1,00              | 0,020               | 1,0                | 4,0   | 2,0        | 50          |
| 2       | 0,60      | 0,015     | 0,12           | 0,95              | 0,030               | 0,9                | 5,0   | 1,8        | 60          |
| 3       | 0,70      | 0,018     | 0,15           | 0,85              | 0,040               | 0,8                | 4,5   | 1,7        | 70          |
| 4       | 0,80      | 0,022     | 0,20           | 0,80              | 0,050               | 0,7                | 6,0   | 1,5        | 80          |
| 5       | 0,65      | 0,020     | 0,16           | 1,50              | 0,060               | 0,6                | 5,8   | 1,6        | 90          |
| 6       | 0,75      | 0,025     | 0,25           | 1,40              | 0,070               | 0,5                | 4,2   | 2,0        | 100         |
| 7       | 0,80      | 0,020     | 0,22           | 1,30              | 0,080               | 0,4                | 3,5   | 2,7        | 80          |
| 8       | 0,75      | 0,028     | 0,30           | 1,20              | 0,020               | 0,5                | 6,2   | 2,1        | 90          |
| 9       | 0,50      | 0,018     | 0,16           | 1,00              | 0,013               | 0,6                | 6,5   | 2,3        | 60          |
| 10      | 0,80      | 0,014     | 0,20           | 1,25              | 0,015               | 0,7                | 7,0   | 2,5        | 70          |

## Б.5. Система автоматического регулирования частоты синхронного генератора

На рис. Б.5 приведена схема САР частоты  $f$  ЭДС  $E$  синхронного генератора, где: 1 – синхронный генератор; 2 – дизельный двигатель; 3 – рейка; 4 – топливный насос; 5 – центробежный маятник; 6 – грузы маятника; 7 – рычаги; 8 – втулка; 9 – рычаг; 10 – винт; 11 – пружина; 12 – золотник; 13 – гидроцилиндр; 14 – плунжер; 15 – поршень.

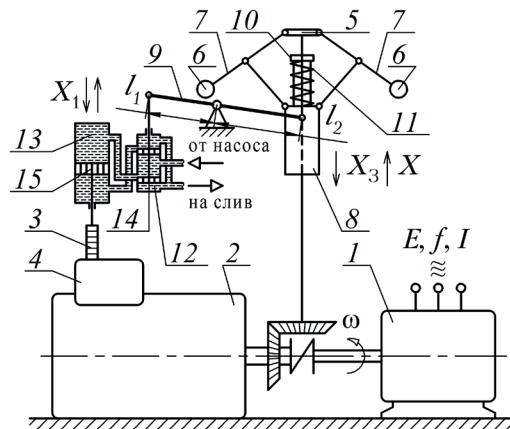


Рис. Б.5. Система автоматического регулирования частоты синхронного генератора

В качестве приводной машины синхронного генератора используется дизельный двигатель 2. В данной системе объектом регулирования является дизельный двигатель, регулируемая величина которого – угловая скорость  $\omega$ , однозначно определяющая частоту  $f$ . Регулирование угловой скорости дизеля обеспечивается перемещением  $X_p$  рейки 3 топливного насоса 4. При перемещении рейки вниз количество топлива, подаваемого в дизель, уменьшается, что приводит к снижению угловой скорости. Перемещение рейки вверх вызывает обратный эффект. Внешним возмущением, вызывающим изменения угловой скорости  $\omega$ , является момент сопротивления на валу дизеля, величина которого пропорциональна току  $I$  нагрузки генератора.

Угловая скорость контролируется с помощью центробежного маятника, грузы 6 которого за счет центробежных сил, пропорциональных  $\omega$ , перемещают через систему рычагов 7 втулку 8, шарнирно связанную с рычагом 9. Рычаг 9 сочленен с золотником 12, который управляет потоком масла под давлением, подавая его в верхнюю или нижнюю полость исполнительного гидроцилиндра 13. С увели-

чением скорости  $\omega$  грузы 6 поднимаются, рычаг 9 смещает вниз плунжер 14 золотника 12. При этом масло от насоса подается в верхнюю полость гидроцилиндра 13, поршень 15 которого совместно с рейкой 3 перемещается вниз, уменьшая количество топлива, подаваемого в дизель. В результате этого скорость  $\omega$  снижается до заданного значения. При снижении скорости  $\omega$  втулка 8 под действием силы тяжести грузов и пружины 11 перемещается вниз. В результате этого рычаг 9 смещает плунжер 14 золотника 12 вверх, обеспечивая доступ масла в нижнюю полость цилиндра 13 и, как следствие, перемещение рейки 3 вверх и увеличение количества топлива, подаваемого в двигатель. Вследствие этого скорость  $\omega$  увеличивается до заданного значения.

Центробежный маятник в данной САР выполняет функции воспринимающего, задающего и сравнивающего органа. Он преобразует угловую скорость  $\omega$  в перемещение втулки 8. Перемещение  $X$  сравнивается с предварительным перемещением  $X_3$  втулки 8, которое обеспечивается силой пружины 11 при задании требуемого значения угловой скорости винтом 10, позволяющим изменять силу сжатия пружины 11. Таким образом достигается сравнение двух величин как  $\Delta X = X_3 - X$ . Результирующее перемещение  $\Delta X$  есть не что иное, как сигнал согласования, который через рычаг 9, золотник 12 и гидроцилиндр 13 управляет рейкой 3 топливного насоса 4.

Динамика САР описывается следующей системой уравнений:

- уравнение дизельного двигателя –  $T_0 \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_0 X_P - k_1 \Delta I$ ;
- уравнение центробежного маятника как воспринимающего органа –  $T_1^2 \frac{dX^2}{dt^2} + T_2 \frac{dX}{dt} + X = k_B \omega$ ;
- уравнение сравнивающего органа –  $\Delta X = X_3 - X$ ;
- уравнение рычага (усилительного органа) –  $X_1 = k_P \Delta X$ ;
- уравнение гидроцилиндра с гидрозолотником и рейкой топливного насоса (исполнительного органа) –  $\frac{dX_P}{dt} = k_{II} X_1$ ,

где  $T_0, T_1, T_2$  – постоянные времени, с;

$k_0, k_1, k_B, k_P, k_{II}$  – коэффициенты передачи.

Коэффициент передачи рычага определяется отношением  $k_P = l_1/l_2$  и является варьируемой величиной.

Числовые значения параметров САР для различных вариантов приведены в табл. Б.5. Заданное значение угловой скорости  $50 \pm 0,5$  рад/с.

Таблица Б.5. Значения параметров элементов САР

| Вариант | $T_0$ , с | $T_1$ , с | $T_2$ , с | $k_0$ , рад/(с·мм) | $k_1$ , рад/(с·А) | $k_B$ , мм·с/рад | $k_P$ | $k_{\text{И}}$ | $\Delta I$ , А |
|---------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-------------------|------------------|-------|----------------|----------------|
| 1       | 0,8       | 0,040     | 0,060     | 17                 | 0,5               | 0,01             | 12    | 5,0            | 18             |
| 2       | 0,7       | 0,038     | 0,055     | 14                 | 0,5               | 0,01             | 10    | 4,0            | –20            |
| 3       | 0,6       | 0,032     | 0,045     | 11                 | 0,5               | 0,01             | 14    | 9,0            | 15             |
| 4       | 0,5       | 0,022     | 0,037     | 18                 | 0,5               | 0,01             | 13    | 8,0            | 18             |
| 5       | 1,2       | 0,015     | 0,033     | 17                 | 0,5               | 0,01             | 11    | 5,0            | –13            |
| 6       | 1,6       | 0,010     | 0,021     | 16                 | 0,5               | 0,01             | 15    | 3,5            | 17             |
| 7       | 1,4       | 0,030     | 0,050     | 13                 | 0,5               | 0,01             | 12    | 5,2            | –15            |
| 8       | 1,2       | 0,025     | 0,040     | 15                 | 0,5               | 0,01             | 10    | 4,0            | 22             |
| 9       | 0,8       | 0,020     | 0,060     | 20                 | 0,5               | 0,01             | 8     | 5,0            | 18             |
| 10      | 1,5       | 0,040     | 0,090     | 19                 | 0,5               | 0,01             | 13    | 7,0            | –30            |

## Б.6. Система автоматического регулирования температуры в атмосфере теплицы

Технология выращивания растений в теплицах предусматривает их вентиляцию, основное назначение которой следующее:

- регулировать температуру воздуха;
- удалять воздух, из которого поглощен диоксид углерода – углекислый газ (он необходим для стимулирования ассимиляции растений);
- предотвращать возникновение вокруг растений участков с относительно влажным воздухом.

В теплицах, как правило, применяют форточную систему вентиляции. Для этих целей используют форточки (фрамуги) подветренных верхних остекленных скатов теплиц. Наиболее просто с точки зрения технической реализации режимом вентиляции можно управлять с помощью САР температуры воздуха в теплице. Один из возможных вариантов такой САР показан на рис. Б.6.

Объектом регулирования в этой системе является теплица 1, регулируемой величиной – температура воздуха  $\theta$  в теплице, регулирующим воздействием – угол поворота  $\varphi$  фрамуги 2, а главным возмущающим воздействием – изменение температуры атмосферного воздуха  $\theta_A$ . Температура в теплице  $\theta$  измеряется терморезистором  $R_D$ , включенным в мостовую схему 3. Резистором  $R_0$  задается необходимое значение температуры. Мостовая схема также обеспечивает сравнение напряжения  $U$ , снимаемого с терморезистора  $R_D$ , с задающим напряжением  $U_0$ . В результате сравнения этих напряжений получается сигнал рассогласования  $\Delta U$ , который усиливается усилителем 4. Усиленный сигнал  $U_y$  через двигатель постоянного тока 6, редуктор 7, шестеренку 5 и рейку 8 управляет фрамугой 2, чем обеспечивается изменение регулирующего воздействия  $\varphi$  на входе объекта регулирования.



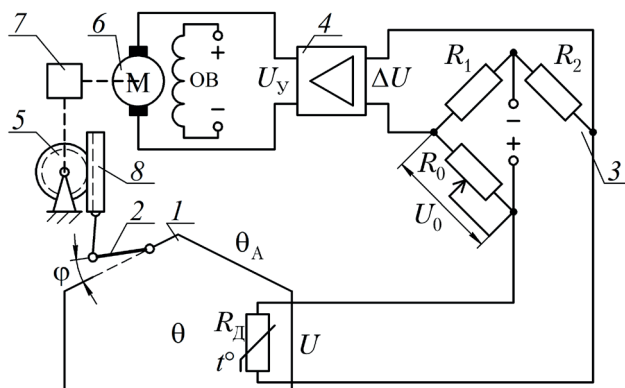


Рис. Б.6. Схема САР температуры воздуха в теплице

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующими уравнениями:

- теплица –  $T_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = k_0 \varphi(t - \tau) + k_A \theta_A$ ;
  - датчик –  $T_D \frac{dU}{dt} + U = k_D \theta$ ;
  - схема сравнения сигналов –  $\Delta U = U_0 - U$ ;
  - усилитель –  $U_Y = k_Y \Delta U$ ;
  - фрамуга совместно с двигателем, редуктором и реечным механизмом –  $\frac{d\varphi}{dt} = k_\Phi U_Y$ ,
- где  $T_0, T_D$  – постоянные времени, с;  
 $k_0, k_A, k_Y, k_\Phi$  – коэффициенты передачи;  
 $\tau$  – время запаздывания, с.

**Примечание:** изображение по Лапласу запаздывающей функции  $\varphi(t - \tau)$  при нулевых начальных условиях  $\varphi(t - \tau) \rightarrow \varphi(s)e^{-\tau s}$ .

Значения параметров элементов САР по вариантам даны в табл. Б.6. Заданное значение температуры воздуха  $25 \pm 1$  °С.

Таблица Б.6. Значения параметров элементов САР

| Вариант | $T_0$ , с | $T_D$ , с | $k_0$ , °С/рад | $k_A$ | $k_Y$ | $k_\Phi$ , рад/В | $\tau$ , с | $\theta_A$ , °С |
|---------|-----------|-----------|----------------|-------|-------|------------------|------------|-----------------|
| 1       | 180       | 12        | 10             | 0,3   | 20    | 0,003            | 30         | –15             |
| 2       | 175       | 11        | 10             | 0,3   | 24    | 0,003            | 35         | 18              |
| 3       | 170       | 11        | 10             | 0,3   | 18    | 0,003            | 37         | –20             |
| 4       | 160       | 10        | 10             | 0,3   | 25    | 0,003            | 31         | 19              |
| 5       | 185       | 13        | 10             | 0,3   | 21    | 0,003            | 39         | –18             |

Таблица Б.6 (окончание)

| Вариант | $T_0$ , с | $T_d$ , с | $k_0$ , °С/рад | $k_A$ | $k_y$ | $k_{\Phi}$ , рад/В | $\tau$ , с | $\theta_A$ , °С |
|---------|-----------|-----------|----------------|-------|-------|--------------------|------------|-----------------|
| 6       | 190       | 15        | 10             | 0,3   | 19    | 0,003              | 32         | 17              |
| 7       | 200       | 16        | 10             | 0,3   | 16    | 0,003              | 30         | –16             |
| 8       | 160       | 10        | 10             | 0,3   | 17    | 0,003              | 36         | 15              |
| 9       | 173       | 11        | 10             | 0,3   | 19    | 0,003              | 40         | –14             |
| 10      | 182       | 12        | 10             | 0,3   | 18    | 0,003              | 32         | 13              |

## Б.7. Система автоматического регулирования давления в ресивере

На рис. Б.7 приведена схема САР давления  $P$  в ресивере (воздухосборнике) 1, который является в данной системе объектом регулирования. Давление в ресивере регулируется посредством изменения количества воздуха  $Q$ , зависящего от положения заслонки 2, т. е. от ее линейного перемещения  $X_C$ , которое можно рассматривать как регулирующее воздействие на входе объекта регулирования. Внешним возмущением, вызывающим отклонение регулируемой величины – давления  $P$ , является изменение расхода сжатого воздуха  $Q_C$ .

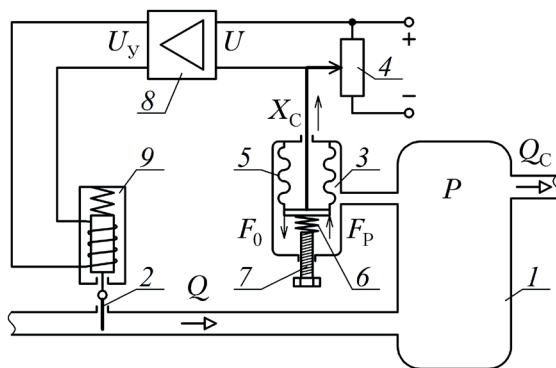


Рис. Б.7. Схема САР давления в ресивере

Давление в данной системе контролируется с помощью сильфонного датчика 3, выходная величина которого – перемещение  $X_C$  сильфона 5 однозначно зависит от разности сил  $\Delta F = F_0 - F_P$ , где  $F_P$  – сила, создаваемая давлением  $P$ ;  $F_0$  – сила натяжения пружины 6, которое можно изменять винтом 7.

Перемещение сильфона  $X_C$  с помощью потенциометрического преобразователя 4 преобразуется в электрический сигнал – напряжение  $U$ , которое усиливается электронным усилителем 8. Выходной сигнал усилителя  $U_y$  управляет электромагнитным приводом 9, связанным с заслонкой 2.

В данной САР сильфонный датчик выполняет функции воспринимающего, задающего и сравнивающего органов. Как воспринимающий орган он контролирует

ет давление  $P$ , преобразуя его в силу  $F_p$ . Задание требуемого давления в ресивере обеспечивается посредством силы  $F_0$ . Как сравнивающий орган сильфон обеспечивает сравнение величин  $F_0$  и  $F_p$ , в результате чего, как отмечалось ранее, получается  $\Delta F = F_0 - F_p$  – сигнал рассогласования.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР описываются следующей системой уравнений:

- ресивер –  $T_0 \frac{dP}{dt} + P = k_0 X_3 - k_Q Q_C$ ;
- воспринимающий орган –  $F_p = k_B P$ ;
- сравнивающий орган –  $\Delta F = F_0 - F_p$ ;
- сильфон –  $T_2^2 \frac{d^2 X_C}{dt^2} + T_1 \frac{dX_C}{dt} + X_C = k_C \Delta F$ ;
- потенциометрический преобразователь –  $U = k_{\Pi} X_C$ ;
- усилитель –  $U_Y = k_Y U$ ;
- электромагнитный привод совместно с заслонкой –  $T_3 \frac{dX_3}{dt} + X_3 = k_3 U$ ,

где  $T_0, T_1, T_2, T_3$  – постоянные времени, с;

$k_0, k_Q, k_B, k_C, k_{\Pi}, k_Y, k_3$  – коэффициенты передачи.

Значения параметров элементов САР по вариантам даны в табл. Б.7. Заданное значение давления  $400 \pm 10$  кПа.

**Таблица Б.7. Значения параметров элементов САР**

| Вариант | $T_0$ , с | $T_1$ , с | $T_2$ , с | $T_3$ , с | $k_0$ , кПа/мм | $k_Q$ , (кПа·с)/м <sup>3</sup> | $k_B$ , Н/кПа | $k_C$ , мм/Н | $k_{\Pi}$ , В/мм | $k_Y$ | $k_3$ , мм/В | $Q_C$ , м <sup>3</sup> /с |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|--------------------------------|---------------|--------------|------------------|-------|--------------|---------------------------|
| 1       | 1,30      | 0,20      | 0,045     | 0,01      | 5              | 400                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 20    | 2            | 1,0                       |
| 2       | 1,20      | 0,25      | 0,040     | 0,01      | 5              | 360                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 30    | 2            | 2,0                       |
| 3       | 0,60      | 0,34      | 0,022     | 0,01      | 5              | 380                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 25    | 2            | 3,0                       |
| 4       | 0,15      | 0,25      | 0,035     | 0,01      | 5              | 340                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 24    | 2            | 1,5                       |
| 5       | 0,70      | 0,30      | 0,040     | 0,01      | 5              | 320                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 22    | 2            | 1,2                       |
| 6       | 0,80      | 0,18      | 0,025     | 0,01      | 5              | 300                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 21    | 2            | 2,0                       |
| 7       | 0,50      | 0,25      | 0,030     | 0,01      | 5              | 280                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 20    | 2            | 1,1                       |
| 8       | 0,65      | 0,20      | 0,020     | 0,01      | 5              | 360                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 25    | 2            | 1,2                       |
| 9       | 0,70      | 0,40      | 0,025     | 0,01      | 5              | 400                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 26    | 2            | 1,3                       |
| 10      | 0,55      | 0,25      | 0,035     | 0,01      | 5              | 410                            | 0,5           | 0,5          | 0,5              | 27    | 2            | 1,4                       |

## **Б.8. Астатическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины**

На электростанциях при производстве электроэнергии предъявляются определенные требования к стабильности частоты  $f$  генерируемой ЭДС. Частота  $f$  однозначно определяется угловой скоростью  $\omega$  рабочего колеса гидротурбины. В связи

с этим гидротурбины на электростанциях оснащаются САР угловой скорости. На рис. Б.8 показана схема одного из вариантов такой системы.

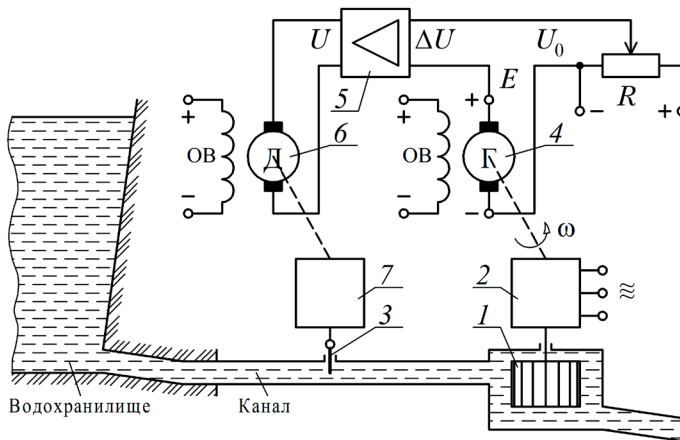


Рис. Б.8. Схема САР угловой скорости рабочего колеса гидротурбины

В данной системе объектом регулирования является гидротурбина 1, регулируемая величина которой – угловая скорость  $\omega$ . Она при постоянном расходе воды изменяется в зависимости от нагрузки на валу турбины, т. е. от мощности  $P$ , которая потребляется от генератора 2 (с увеличением мощности угловая скорость снижается, а с уменьшением – возрастает). Таким образом, мощность  $P$  является внешним возмущающим воздействием на объекте регулирования. Для регулирования угловой скорости имеется заслонка 3, с помощью которой изменяется расход воды через турбину. Он однозначно зависит от вертикального перемещения  $X$  заслонки. Следовательно, перемещение  $X$  заслонки можно рассматривать как регулирующее воздействие объекта регулирования. Угловая скорость  $\omega$  контролируется посредством тахогенератора 4, ЭДС  $E$  которого сравнивается с задающим напряжением  $U_0$ . Сигнал рассогласования  $\Delta U$  через усилитель 5 управляет посредством электродвигателя 6 и редуктора 7 заслонкой 3.

Динамические свойства САР описываются следующими уравнениями:

- гидротурбина –  $T_0 \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_0 X - k_1 P$ ;
- тахогенератор –  $E = k_T \omega$ ;
- сравнивающий орган –  $\Delta U = U_0 - E$ ;
- электронный усилитель –  $U = k_y \Delta U$ ;
- электродвигатель совместно с редуктором и заслонкой –

$$T_M T_{\Xi} \frac{d^3 X}{dt^3} + T_M \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{dX}{dt} = k_{\Xi} U,$$

где  $T_0, T_M, T_{\Xi}$  – постоянные времени, с;

$k_0, k_1, k_T, k_y, k_{\Xi}$  – коэффициенты передачи.

Числовые значения параметров САР для различных вариантов приведены в табл. Б.8. Заданное значение угловой скорости  $30 \pm 0,3$  рад/с.

**Таблица Б.8. Значения параметров элементов САР**

| Вариант | $T_0$ , с | $T_M$ , с | $T_\Sigma$ , с | $k_0$ , рад/(с·см) | $k_1$ , рад/(с·кВт) | $k_T$ , В·с/рад | $k_y$ | $k_\Sigma$ , см/В | $P$ , кВт |
|---------|-----------|-----------|----------------|--------------------|---------------------|-----------------|-------|-------------------|-----------|
| 1       | 4,0       | 0,020     | 0,005          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 80    | 0,02              | 100       |
| 2       | 3,5       | 0,019     | 0,004          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 100   | 0,02              | 80        |
| 3       | 4,1       | 0,018     | 0,003          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 90    | 0,02              | 70        |
| 4       | 4,2       | 0,017     | 0,002          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 85    | 0,02              | 90        |
| 5       | 4,5       | 0,016     | 0,002          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 100   | 0,02              | 95        |
| 6       | 3,9       | 0,015     | 0,002          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 110   | 0,02              | 85        |
| 7       | 4,0       | 0,014     | 0,002          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 120   | 0,02              | 75        |
| 8       | 4,3       | 0,020     | 0,005          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 85    | 0,02              | 60        |
| 9       | 3,6       | 0,018     | 0,003          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 90    | 0,02              | 100       |
| 10      | 3,8       | 0,016     | 0,002          | 8                  | 0,08                | 1,0             | 100   | 0,02              | 95        |

## Б.9. Статическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины

На электростанциях при производстве электроэнергии предъявляются определенные требования к стабильности частоты  $f$  генерируемой ЭДС. Частота  $f$  однозначно определяется угловой скоростью  $\omega$  рабочего колеса гидротурбины. В связи с этим гидротурбины на электростанциях оснащаются САР угловой скорости. На рис. Б.9 приведен вариант статической САР.

В данной системе объектом регулирования является гидротурбина 1, регулируемая величина которой – угловая скорость  $\omega$ . Она при постоянном расходе воды изменяется в зависимости от нагрузки на валу турбины, т. е. от мощности  $P$ , которая потребляется от генератора 2 (с увеличением мощности угловая скорость снижается, а с уменьшением – возрастает). Таким образом, мощность  $P$  является внешним возмущающим воздействием на объекте регулирования. Для регулирования угловой скорости имеется заслонка 3, с помощью которой изменяется расход воды через турбину. Он однозначно зависит от вертикального перемещения  $X$  заслонки. Следовательно, перемещение  $X$  заслонки можно рассматривать как регулирующее воздействие объекта регулирования. Угловая скорость  $\omega$  контролируется посредством тахогенератора 4, ЭДС  $E$  которого сравнивается с задающим напряжением  $U_0$ . Сигнал рассогласования  $\Delta U$  через усилитель 5 управляет посредством длинноходового электромагнитного исполнительного механизма 6 заслонкой 3.

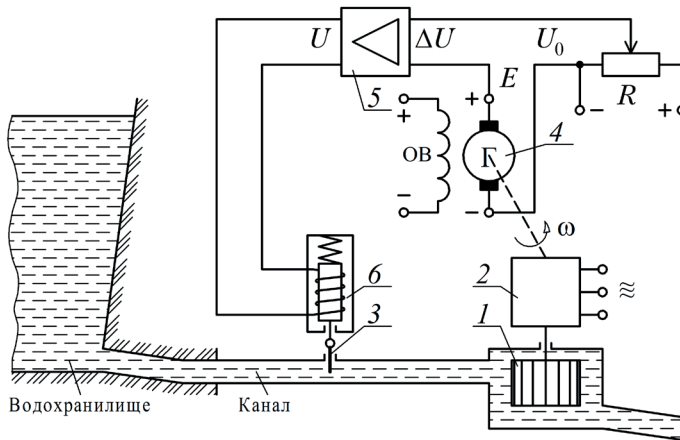


Рис. Б.9. Схема САУ угловой скорости гидротурбины

Динамические свойства САУ описываются следующими уравнениями:

- гидротурбина –  $T_0 \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_0 X - k_1 P$ ;
- тахогенератор –  $E = k_T \omega$ ;
- сравнивающий орган –  $\Delta U = U_0 - E$ ;
- электронный усилитель –  $U = k_Y \Delta U$ ;
- электромагнитный исполнительный механизм совместно с заслонкой –

$$T_1 T_2 \frac{d^2 X}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dX}{dt} + X = k_E U,$$

где  $T_0, T_1, T_2$  – постоянные времени, с;  
 $k_0, k_1, k_T, k_Y, k_E$  – коэффициенты передачи.

Числовые значения параметров САУ для различных вариантов приведены в табл. Б.9. Заданное значение угловой скорости  $30 \pm 0,3$  рад/с.

Таблица Б.9. Значения параметров элементов САУ

| Вариант | $T_0$ ,<br>с | $T_1$ ,<br>с | $T_2$ ,<br>с | $k_0$ ,<br>рад/(с·см) | $k_1$ ,<br>рад/(с·кВт) | $k_T$ ,<br>В·с/рад | $k_Y$ | $k_E$ ,<br>см/В | $\Delta P$ ,<br>кВт |
|---------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|------------------------|--------------------|-------|-----------------|---------------------|
| 1       | 3,5          | 0,0012       | 0,010        | 8                     | 0,010                  | 1,0                | 80    | 0,05            | –100                |
| 2       | 4,0          | 0,0013       | 0,011        | 7                     | 0,015                  | 1,0                | 100   | 0,05            | 80                  |
| 3       | 4,15         | 0,0011       | 0,012        | 6                     | 0,016                  | 1,0                | 90    | 0,05            | –70                 |
| 4       | 3,2          | 0,0010       | 0,013        | 5                     | 0,010                  | 1,0                | 85    | 0,05            | 90                  |
| 5       | 4,5          | 0,0015       | 0,014        | 9                     | 0,010                  | 1,0                | 100   | 0,05            | –95                 |
| 6       | 3,9          | 0,0012       | 0,010        | 4                     | 0,011                  | 1,0                | 110   | 0,05            | 85                  |
| 7       | 4,1          | 0,0010       | 0,009        | 7                     | 0,015                  | 1,0                | 120   | 0,05            | –75                 |
| 8       | 4,25         | 0,0010       | 0,008        | 6                     | 0,018                  | 1,0                | 85    | 0,05            | 60                  |
| 9       | 3,6          | 0,0010       | 0,011        | 5                     | 0,010                  | 1,0                | 90    | 0,05            | –100                |
| 10      | 3,8          | 0,0013       | 0,012        | 8                     | 0,010                  | 1,0                | 100   | 0,05            | 95                  |

## Б.10. Система автоматического регулирования перемещения рабочего органа робота-манипулятора

САР [13] (рис. Б.10, Б.11) состоит из двигателя постоянного тока 1, одноступенчатого редуктора, состоящего из двух шестерен 2, вала нагрузки 3, на котором установлен датчик угловых перемещений 5, связанный со сравнивающим устройством 6. Двигатель по цепи якоря управляется посредством усилителя-преобразователя 7, представляющего собой тиристорный регулируемый выпрямитель, управляемого выходным сигналом предварительного усилителя 8. Система обеспечивает регулирование угла  $\varphi_H$  рабочего органа 4 в соответствии с заданным сигналом  $U_3$ .

Структурная схема системы показана на рис. Б.12.

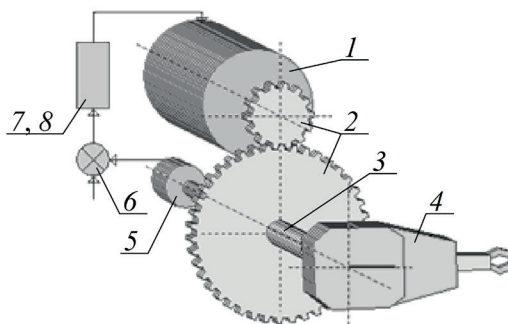


Рис. Б.10. Схема САР с отображением конструктивных и функциональных элементов

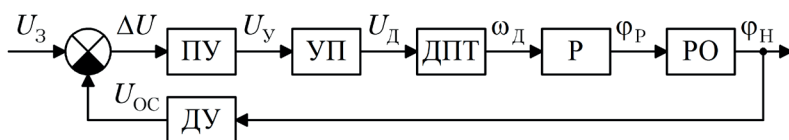


Рис. Б.11. Функциональная схема САР:

РО – рабочий орган (рука манипулятора); Р – редуктор;  
ДПТ – двигатель постоянного тока; УП – усилитель-преобразователь;  
ПУ – предварительный усилитель; ДУ – датчик угловых перемещений

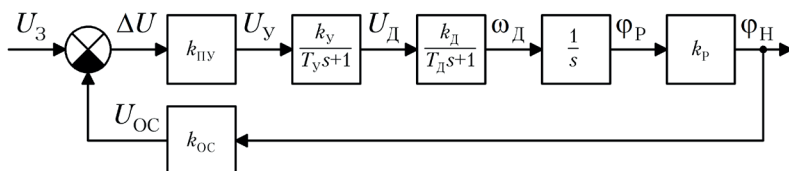


Рис. Б.12. Структурная схема САР

Для улучшения динамических свойств системы введена гибкая обратная связь за счет использования тахогенератора 9, установленного на валу двигателя (рис. Б.13, Б.14).

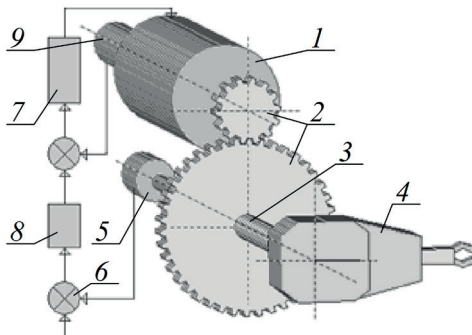


Рис. Б.13. Схема скорректированной САР с отображением конструктивных и функциональных элементов

Параметры  $T_d$  и  $k_d$  определяются следующим формулами:

$$T_d = \frac{J_{\text{ДПТ}} + J_H k_p^2}{\beta k_p};$$

$$k_d = \frac{k_{\text{ДПТ}}}{\beta k_p},$$

где  $J_{\text{ДПТ}}$  и  $J_H$  – момент инерции двигателя и нагрузки, кг·м<sup>2</sup>;

$k_{\text{ДПТ}}$  – коэффициент передачи двигателя, рад/(с·В);

$k_p$  – коэффициент передачи редуктора;

$\beta$  – коэффициент вязкого трения рабочего органа (руки робота), Н·м·с/рад.

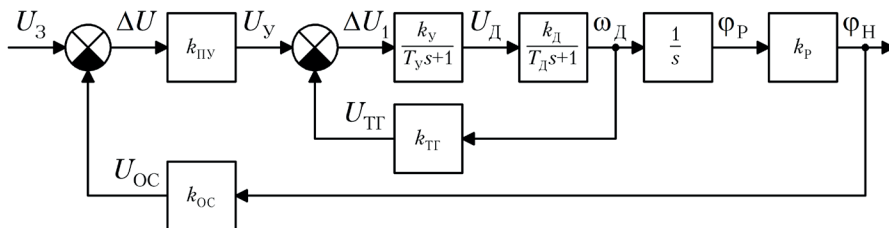


Рис. Б.14. Структурная схема скорректированной САР

Параметры передаточных функций (рис. Б.12 и Б.14) для различных вариантов приведены в табл. Б.10.



Таблица Б.10. Значения параметров элементов САП

| Вариант | $T_y, \text{с}$ | $J_{\text{дпт}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$ | $J_n, \text{кг}\cdot\text{м}^2$ | $\beta, \text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$ | $k_p$ | $k_{\text{ос}}, \text{В}/\text{рад}$ | $k_{\text{пу}}$ | $k_y$ | $k_{\text{дпт}}, \text{рад}/(\text{с}\cdot\text{В})$ | $k_{\text{тг}}, \text{В}\cdot\text{с}/\text{рад}$ |
|---------|-----------------|--------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------|-----------------|-------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1       | 0,003           | 0,03                                       | 0,35                            | 1,5                                                    | 14/42 | 2,0                                  | 10              | 2     | 1,2                                                  | 0,65                                              |
| 2       | 0,004           | 0,02                                       | 0,45                            | 1,4                                                    | 8/48  | 3,0                                  | 15              | 4     | 1,0                                                  | 0,55                                              |
| 3       | 0,005           | 0,04                                       | 0,50                            | 1,3                                                    | 12/44 | 4,0                                  | 20              | 6     | 0,9                                                  | 0,45                                              |
| 4       | 0,006           | 0,01                                       | 0,25                            | 1,2                                                    | 28/28 | 5,0                                  | 25              | 8     | 0,6                                                  | 0,35                                              |
| 5       | 0,007           | 0,03                                       | 0,20                            | 1,1                                                    | 20/36 | 6,0                                  | 12              | 10    | 1,1                                                  | 0,25                                              |
| 6       | 0,008           | 0,02                                       | 0,15                            | 1,6                                                    | 22/34 | 2,5                                  | 14              | 9     | 0,7                                                  | 0,50                                              |
| 7       | 0,010           | 0,05                                       | 0,30                            | 1,7                                                    | 16/40 | 3,5                                  | 16              | 7     | 0,8                                                  | 0,40                                              |
| 8       | 0,012           | 0,06                                       | 0,40                            | 1,8                                                    | 18/38 | 4,5                                  | 18              | 5     | 0,5                                                  | 0,30                                              |
| 9       | 0,009           | 0,04                                       | 0,55                            | 1,9                                                    | 24/32 | 5,5                                  | 22              | 3     | 0,4                                                  | 0,20                                              |
| 10      | 0,011           | 0,02                                       | 0,60                            | 2,0                                                    | 26/30 | 6,5                                  | 28              | 11    | 1,3                                                  | 0,15                                              |

## Б.11. Следящая система

Функциональная и структурная схемы системы приведены на рис. Б.15 и Б.16, где: СД – сельсин-датчик; СП – сельсин-приемник; ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель; КЭ1 – последовательный корректирующий элемент (дифференциатор на операционном усилителе); УПТ – усилитель постоянного тока; ЭМУ – электромашинный усилитель; ИД – исполнительный двигатель; Р – редуктор; КЭ2 – параллельный корректирующий элемент (тахогенератор).

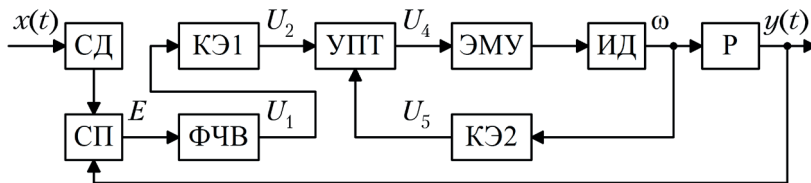


Рис. Б.15. Функциональная схема следящей системы

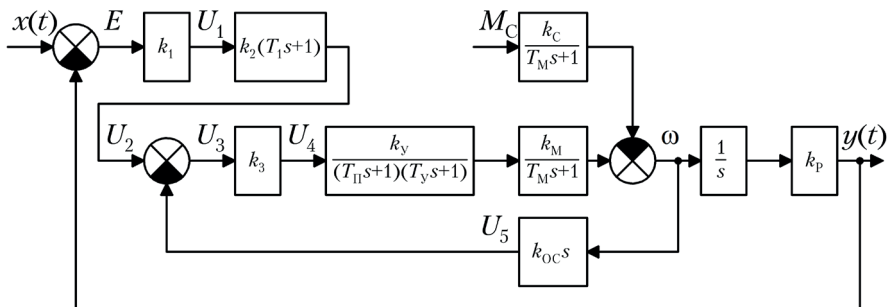


Рис. Б.16. Структурная схема следящей системы

Из анализа схем (рис. Б.15 и Б.16) следует, что в данной системе с помощью КЭ1 реализуется алгоритм *ПД-закона регулирования*, а с помощью КЭ2 – гибкая обратная связь по угловой скорости. Значения параметров системы по вариантам приведены в табл. Б.11.

**Таблица Б.11. Значения параметров элементов САР**

| Вариант | $T_1, \text{с}$ | $T_n, \text{с}$ | $T_y, \text{с}$ | $T_m, \text{с}$ | $k_1$ | $k_2$ | $k_3$ | $k_y$ | $k_m$ | $k_c$ | $k_p$ | $k_{oc}$ | $x(0)$ | $M_c, \text{Н·м}$ |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------|-------------------|
| 1       | 0,220           | 0,5             | 0,2             | 3,0             | 0,8   | 50    | 0,2   | 100   | 2     | 0,01  | 0,5   | 5        | 0,1    | 5                 |
| 2       | 0,022           | 0,6             | 0,1             | 3,0             | 0,9   | 5     | 0,1   | 200   | 2     | 0,01  | 0,5   | 5        | 0,2    | 5                 |
| 3       | 0,220           | 0,7             | 0,1             | 2,0             | 0,9   | 1     | 0,1   | 300   | 2     | 0,02  | 0,5   | 10       | 0,3    | 5                 |
| 4       | 0,022           | 0,5             | 0,1             | 2,5             | 1     | 100   | 0,5   | 100   | 2     | 0,02  | 1,0   | 10       | 0,5    | 5                 |
| 5       | 0,022           | 0,6             | 0,2             | 3,0             | 2     | 50    | 0,7   | 200   | 5     | 0,02  | 1,0   | 10       | 0,7    | 10                |
| 6       | 0,220           | 0,7             | 0,2             | 3,0             | 3     | 10    | 0,8   | 300   | 5     | 0,03  | 1,0   | 20       | 0,9    | 10                |
| 7       | 0,022           | 0,5             | 0,3             | 3,5             | 4     | 1     | 0,9   | 300   | 5     | 0,03  | 1,2   | 20       | 1,1    | 10                |
| 8       | 0,220           | 0,6             | 0,3             | 3,5             | 5     | 1     | 1,0   | 200   | 5     | 0,03  | 1,2   | 40       | 1,3    | 20                |
| 9       | 0,022           | 0,7             | 0,4             | 4,0             | 6     | 50    | 1,2   | 200   | 10    | 0,03  | 1,5   | 30       | 1,5    | 20                |
| 10      | 0,022           | 0,5             | 0,4             | 4,0             | 8     | 50    | 1,5   | 100   | 10    | 0,04  | 1,5   | 0,5      | 1,6    | 20                |
| 11      | 0,022           | 0,6             | 0,4             | 4,5             | 3     | 50    | 1,7   | 100   | 10    | 0,04  | 2,0   | 0,5      | 1,7    | 30                |
| 12      | 0,220           | 0,7             | 0,5             | 4,5             | 3     | 100   | 2,0   | 50    | 10    | 0,04  | 2,0   | 0,5      | 1,8    | 30                |
| 13      | 0,022           | 0,5             | 0,5             | 5,0             | 15    | 1     | 2,2   | 50    | 7     | 0,05  | 1,0   | 50       | 1,9    | 40                |
| 14      | 0,500           | 0,6             | 0,5             | 5,0             | 15    | 1     | 2,5   | 100   | 7     | 0,05  | 1,0   | 5        | 2,0    | 50                |
| 15      | 0,010           | 0,7             | 0,5             | 5,0             | 18    | 50    | 3,0   | 100   | 7     | 0,05  | 0,5   | 5        | 2,1    | 50                |

Применительно к заданному варианту (табл. Б.11) необходимо выполнить следующее.

1. Для системы с *П-законом регулирования* (в корректирующих элементах КЭ1 и КЭ2  $s = 0$ ) выполните ее моделирование при нулевых начальных условиях и оцените качество процесса регулирования.
2. Выполните моделирование исходной системы (рис. Б.16) при нулевых начальных условиях и оцените качество процесса регулирования. Сравните результаты, полученные при выполнении п. 1.
3. Выполните параметрическую оптимизацию исходной системы (рис. Б.16), приняв в качестве оптимизируемых параметров  $k_1, k_2, k_{oc}, T_1$ . Критерии оптимальности задайте, исходя из условий: процесс регулирования должен быть без перерегулирования длительностью не больше  $3T_m$ .

## Б.12. Гидравлическая система автоматического регулирования скорости вращения паровой турбины

Система (рис. Б.17) предназначена для автоматического регулирования скорости вращения (числа оборотов) паровой турбины во время ее пуска (разворота) и ста-



отсечного золотника (ОЗ) прекращает движение регулирующего клапана (РК).

В установившемся режиме давление  $P_X = \text{const}$ , и золотник 1 ДС занимает всегда одно и то же положение, т. е.  $F_Y = \text{const}$ . Тогда  $F_X + F_Z = \text{const}$ , или  $\Delta F_X + \Delta F_Z = \text{const}$ , т. е. изменение сливного сечения МУТ компенсируется изменением сливного сечения ОС. Так как вследствие изменения нагрузки генератора РК занял новое положение, то новые условия равновесия в системе возникают при новой скорости вращения турбины. Таким образом, САР поддерживает заданные обороты с некоторой статической погрешностью, которая называется неравномерностью регулирования  $\Delta$  и регламентируется в пределах  $\Delta = 4 \dots 5\%$ . Другими словами, данная система управления является статической.

Для задания оборотов турбины используется МУТ. Если, например, переместить его буксу 3 вверх, то из-за уменьшения усилия пружины 4 поршень 5 под действием давления масла импеллера также переместится вверх и увеличит сечение  $F_X$ . Так как  $\Delta F_X = -\Delta F_Z$ , то РК переместится вниз и уменьшит обороты турбины.

Рассматриваемая САР является нелинейной. Для небольших отклонений переменных ее линейная модель имеет достаточную для практических целей точность, которая в виде структурной схемы приведена на рис. Б.18.

На структурной схеме турбина представлена инерционным звеном с постоянной времени  $T_0$ , импеллера – пропорциональным звеном с коэффициентом передачи  $k_{OC}$ , главный сервомотор с отсечным золотником – интегратором с постоянной времени  $T_M$ . Передаточная функция с параметрами  $k_1$  и  $T_1$  отображает динамические свойства объема пара после регулирующего клапана. Значения параметров передаточных функций:  $T_0 = 20$  с;  $k_1 = k_2 = 0,5$ ;  $T_1 = 1,5$  с;  $T_M = 1$  с;  $k_{OC} = 0,1$ .

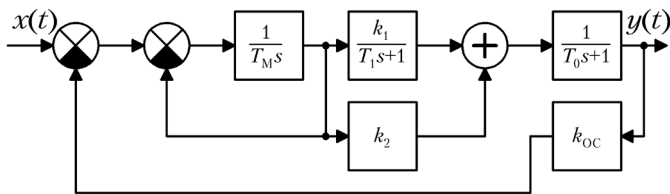


Рис. Б.18. Структурная схема САР

Целевое назначение данного задания – исследование влияния местных связей (прямой и обратной) на качество процесса регулирования и освоение методики структурно-параметрического синтеза систем в среде SimInTech. Для достижения этой цели необходимо (при нулевых начальных условиях и  $x(t) = 1(t)$ ) выполнить следующее.

1. Исключив из схемы (рис. Б.18) внутренние контуры (обратную и прямую связи), выполните моделирование системы и оцените качество процесса регулирования.
2. Выполните моделирование системы с включенной местной обратной связью и оцените качество процесса регулирования. Сравните результаты, полученные в пп. 1 и 2.

3. Выполните моделирование системы с включенной прямой связью (местную обратную связь при этом отключите) и оцените качество процесса регулирования. Сравните результаты, полученные в пп. 1–3.
4. Выполните моделирование исходной системы (рис. Б.18) и оцените качество процесса регулирования. Сравните результаты, полученные в пп. 1–4.
5. Выполните параметрическую оптимизацию исходной системы (рис. Б.18), приняв в качестве оптимизируемых параметров  $k_2$  и  $T_M$ . Критерии оптимальности задайте, исходя из условий: процесс регулирования должен быть без перерегулирования длительностью не больше  $4T_0$ .

## Б.13. Система автоматического регулирования угла крена самолета

Система автоматического управления положением самолета в пространстве при полете является типичным примером, когда используются обратные связи по нескольким переменным. В такой системе положение самолета изменяется с помощью элеронов, рулей высоты и руля направления, как показано на рис. Б.19. Манипулируя этими органами управления, пилот устанавливает желаемую траекторию полета.

Система, которая рассматривается в данном задании, представляет собой автоматическую систему управления, регулирующую угол крена  $\varphi$  путем отклонения элеронов. Отклонение элеронов на угол  $\theta$  приводит к возникновению вращающего момента благодаря давлению воздуха на поверхность крыльев. За счет этого момента происходит вращение самолета относительно горизонтальной оси. Элероны отклоняются с помощью гидравлического исполнительного механизма, динамические свойства которого описываются передаточной функцией  $1/s$ .

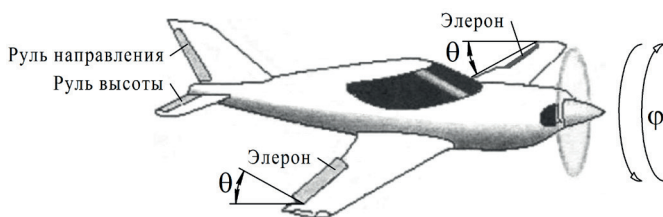


Рис. Б.19. Самолет и его органы управления (регулирования)

Действительный угол крена измеряется гироскопическим датчиком ( $k_1 = 1$ ) и сравнивается с заданным значением  $\varphi_3$ . Разность между  $\varphi_3$  и  $\varphi$  усиливается посредством усилителя и подается на вход исполнительного механизма, который управляет отклонением элеронов. В качестве корректирующего звена по скорости ( $d\varphi/dt$ ) использован также гироскопический датчик.

На рис. Б.20 приведена упрощенная автономная (независимо от движений самолета в других направлениях) модель системы регулирования крена в виде структурной схемы.

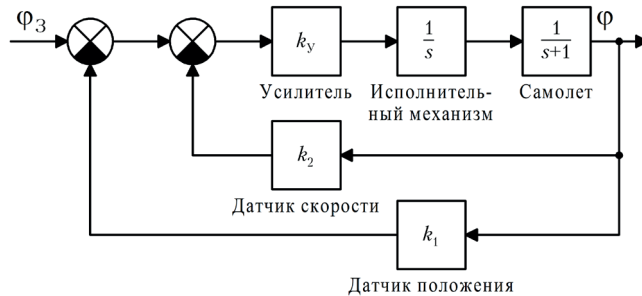


Рис. Б.20. Структурная схема САР

Необходимо, используя параметрическую оптимизацию в среде SimInTech, определить параметры  $k_y$  и  $k_2$ , при которых переходная характеристика при  $\Phi_3(t) = 1(t)$  имела перерегулирование не более 10 %, а время регулирования (для «трубки» 2 %) – не более 9 с.

## Б.14. Система автоматического регулирования скорости стола обрабатывающего станка

Схема системы показана на рис. Б.21.

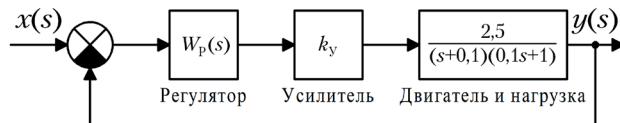


Рис. Б.21. Структурная схема САР

При регулировании скорости требуется поддерживать высокую точность в установившемся режиме для обеспечения качественной обрабатываемой поверхности. Для этого необходима нулевая статическая ошибка стабилизации скорости. С этой целью в системе для коррекции использован *ПИ-регулятор*, передаточная функция которого имеет следующий вид:

$$W_p(s) = k_{\Pi} + k_{\text{И}}/s.$$

Исследуйте САР (оцените ее устойчивость и качество) при следующих параметрах:  $k_y = 10$ ;  $k_{\Pi} = 0,5$ ;  $k_{\text{И}} = 0,06$ . А затем, используя параметрическую оптимизацию в среде SimInTech, определите параметры  $k_{\Pi}$  и  $k_{\text{И}}$ , для которых переходная характеристика при  $x(t) = 1(t)$  будет без перерегулирования и время регулирования – не более 5 с.

## Б.15. Система автоматического регулирования скорости самолета

На рис. Б.22 показана упрощенная модель системы управления скоростью самолета F-94 или X-15.

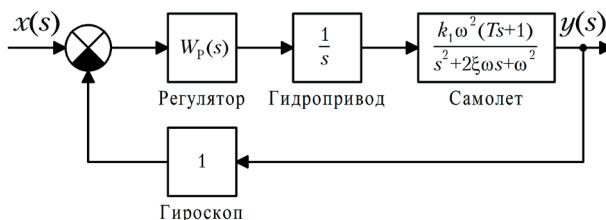


Рис. Б.22. Структурная схема САР скорости самолета

При скорости полета, в 4 раза превышающей скорость звука, на высоте 10 км передаточная функция самолета имеет следующие параметры:  $T = 1$ ;  $k_1 = 1$ ;  $\xi = 0,25$ ;  $\omega = 4$ . Требуется методом компьютерного моделирования в среде SimInTech синтезировать регулятор, реализующий *ПИД-закон регулирования* с передаточной функцией

$$W_P(s) = k_{\Pi} + k_{\text{И}}/s + k_{\text{Д}}s,$$

так чтобы реакция системы на ступенчатый входной сигнал  $x(t) = 1(t)$  имела перерегулирование не более 5% и время регулирования (при «трубке» 2%) менее 5 с.

## Б.16. Вариантные задания

Для одного из вариантов САР на основе приведенных ниже структурных схем (по заданию преподавателя) при нулевых начальных условиях и  $x(t) = 1(t)$  с помощью SimInTech выполните следующее.

1. Определите критическое значение коэффициента передачи  $k$ .
2. Определите приемлемое значение коэффициента передачи  $k$ , при котором перерегулирование не превосходит 30%.
3. Для значения коэффициента передачи  $k$ , найденного в п. 2, оцените запас устойчивости САР.
4. Исследуйте влияние передаточного коэффициента  $k$  на быстродействие САР.
5. Оцените статическую ошибку САР.

**Вариант Б.1.** Параметры передаточных функций схемы САР (рис. Б.23):  $k_1 = 2$ ;  $T_1 = 0,5$  с.

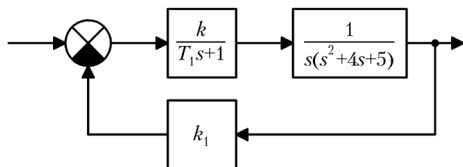


Рис. Б.23. Структурная схема САР

**Вариант Б.2.** Параметры передаточных функций схемы САР (рис. Б.24):  $k_2 = 3$ ;  $T_1 = 0,5$  с;  $T_2 = 1$  с;  $T_3 = 0,25$  с.

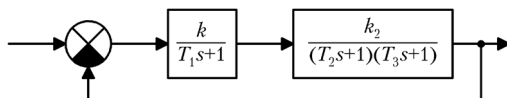


Рис. Б.24. Структурная схема САР

**Вариант Б.3.** Параметры передаточных функций схемы САР (рис. Б.25):  $T_1 = 2$  с;  $T_2 = 0,5$  с;  $T_3 = 0,25 \dots 0,50$  с.

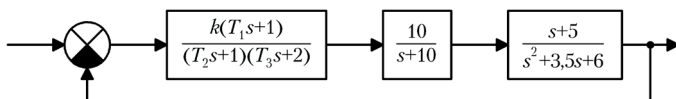


Рис. Б.25. Структурная схема САР

**Вариант Б.4.** Параметры передаточных функций схемы САР (рис. Б.26):  $k_2 = 1,5$ ;  $k_3 = 1$ ;  $k_4 = 1$ ;  $T_1 = 0,1$  с;  $T_2 = 1$  с.

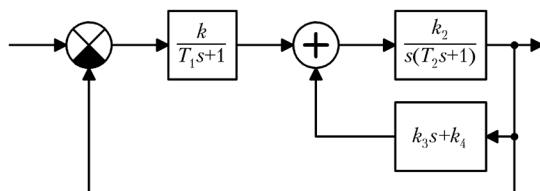


Рис. Б.26. Структурная схема САР

**Вариант Б.5.** Параметры передаточных функций показаны на структурной схеме САР (рис. Б.27).

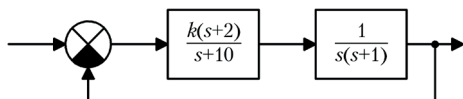


Рис. Б.27. Структурная схема САР



**Вариант Б.6.** Параметры передаточных функций схемы САР (рис. Б.28):  $k_2 = 1,5$ ;  $k_3 = 1$ ;  $T_1 = 0,1$  с;  $T_2 = 1$  с.

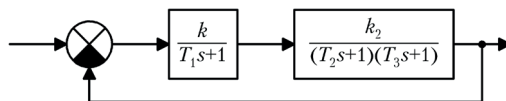


Рис. Б.28. Структурная схема САР

**Вариант Б.7.** Параметры передаточных функций схемы САР (рис. Б.29):  $k_2 = 1,5$ ;  $k_3 = 1$ ;  $T_1 = 0,1$  с;  $T_2 = 1$  с.

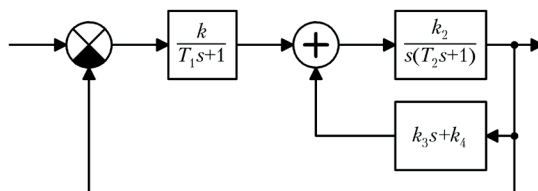


Рис. Б.29. Структурная схема САР

**Вариант Б.8.** Параметры передаточных функций схемы САР (рис. Б.30) приведены в табл. Б.12.

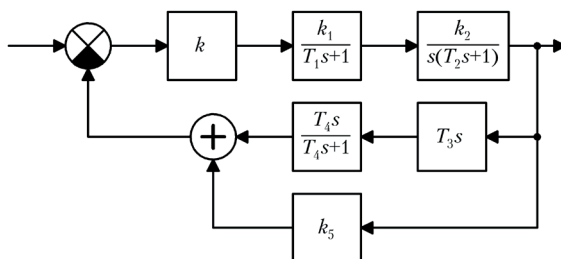


Рис. Б.30. Структурная схема САР

Таблица Б.12. Значения параметров элементов САР

| № п/п | $k_1$ | $k_2$ | $k_5$ | $T_1$ , с | $T_2$ , с | $T_3$ , с | $T_4$ , с |
|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1     | 0,12  | 350   | 1,0   | 0,01      | 0,200     | 0,04      | 0,55      |
| 2     | 0,12  | 340   | 1,0   | 0,01      | 0,200     | 0,04      | 0,55      |
| 3     | 0,11  | 360   | 1,0   | 0,01      | 0,018     | 0,04      | 0,50      |

**Вариант Б.9.** Параметры передаточных функций схемы САР (рис. Б.31):  $k_1 = 2,0$ ;  $k_2 = 1$ ;  $k_T = 80$ ;  $k_h = 0,4$ ;  $k_3 = 1,5$ ;  $k_p = 1$ ;  $R = 0,2$ ;  $L = 40$ ;  $T_1 = 0,01$  с;  $T_2 = 0,5$  с;  $J = (2,5...5,0)10^{-3}$ .

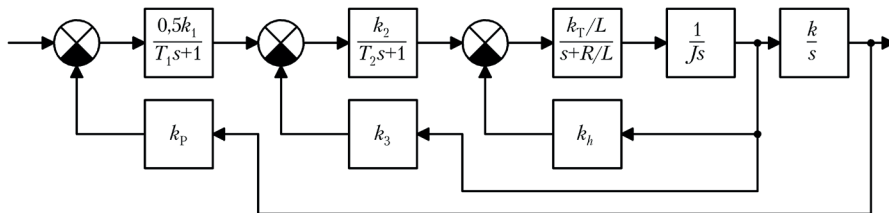


Рис. Б.31. Структурная схема САР

**Вариант Б.10.** Параметры передаточных функций схемы САР (рис. Б.32):  $k_1 = 0,25$ ;  $T = 0,5$  с;  $T_1 = 1$  с.

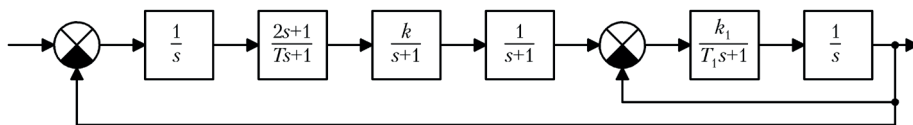


Рис. Б.32. Структурная схема САР

# Задания по нелинейным и дискретным системам автоматического регулирования



Описания систем, приведенные в пп. В.1–В.9, предназначены для формирования разнообразных вариантов заданий по исследованию процессов регулирования в релейных САР, особенностью которых является возможность существования, наряду со сходящимися переходными процессами (рис. 1.18а), автоколебательных процессов регулирования (рис. 1.18б). Они предназначены для самостоятельных занятий, лабораторных работ и курсового проектирования.

Описания систем, приведенные в пп. В.10–В.18, предназначены для формирования разнообразных вариантов заданий по исследованию дискретных (цифровых) САР – САР с микроЭВМ, ориентируемых как на применение непрерывных (рис. 1.42, 1.43), непрерывно-дискретных (рис. 1.44), так и дискретных (рис. Д.14 приложения Д) моделей САР с микроЭВМ и предназначенных для самостоятельных занятий, лабораторных работ и курсового проектирования. В качестве микроЭВМ можно использовать Ремиконт Р-130, временные характеристики которого, необходимые для определения периода квантования сигнала, приведены в п. Д.4 приложения Д.

Задания, приведенные в п. В.18, предназначены для лабораторной работы № 8, самостоятельных занятий при освоении компьютерных методов анализа и синтеза цифровых САР с микроЭВМ. Задания сформированы на основе [4, 7].

## В.1. Релейная система автоматического регулирования температуры в помещении

В САР (см. п. Б.1 приложения Б) магнитный усилитель заменен на релейный регулятор, статическая характеристика которого показана на рис. В.1.

В результате компьютерного моделирования данной САР при пороге срабатывания  $b$ , равном по абсолютному значению 1 В, для одного из вариантов (см. табл. Б.1), изменяя коэффициент возврата  $m$  от 1 до 0, определите его граничное значение, при котором в системе не будет автоколебательного режима (внешнее возмущение принять  $f = 0$ ).

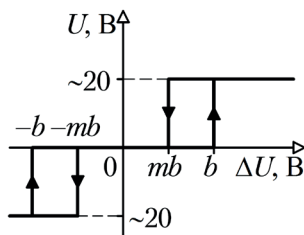


Рис. В.1. Статическая характеристика релейного регулятора:  
 $b$  — порог срабатывания (зона нечувствительности);  $m$  — коэффициент возврата;  
 $\sim 20, \sim -20$  — значения напряжения на выходе регулятора  
 (противоположные по фазе)

## В.2. Релейная система автоматического регулирования температуры в печи

В САР (см. п. Б.2 приложения Б) дифференциальный магнитный усилитель заменен на релейный регулятор, статическая характеристика которого приведена на рис. В.2.

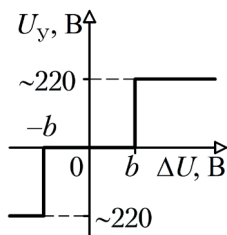


Рис. В.2. Статическая характеристика релейного регулятора:  
 $b$  — порог срабатывания (зона нечувствительности);  
 $\sim 220, \sim -220$  — значения напряжения на выходе регулятора  
 (противоположные по фазе)

Для одного из вариантов (см. табл. Б.2) посредством компьютерного моделирования САР определите граничное значение зоны нечувствительности между автоколебательными режимами работы системы и режимами с затухающими переходными процессами при внешнем возмущающем воздействии  $f = 0$ , варьируя значением зоны нечувствительности  $b$  по абсолютному значению за пределами 1 В.

### В.3. Релейная система автоматического регулирования температуры теплоносителя зерносушилки

В САР (см. п. Б.3 приложения Б) усилитель 4 (см. рис. Б.3) заменен на релейный регулятор, имеющий трехпозиционную статическую характеристику (рис. В.3).

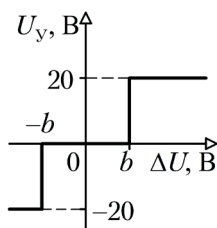


Рис. В.3. Статическая характеристика релейного регулятора:  
 $b$  – порог срабатывания (зона нечувствительности)

Для заданного варианта (см. табл. Б.3) в процессе компьютерного моделирования данной САР определите зависимость параметров автоколебаний (частоты и амплитуды) от зоны нечувствительности при следующих условиях:  $U_0 = 2$  В;  $f = 0$ ;  $b$  по абсолютной величине варьировать в пределах от 0,1 до 1 В.

### В.4. Релейная система автоматического регулирования угловой скорости электродвигателя постоянного тока

В САР (см. п. Б.4 приложения Б) усилитель 2 заменен на релейный регулятор, имеющий статическую характеристику, показанную на рис. В.4.

Для одного из вариантов (см. табл. Б.4) по заданию преподавателя при  $U_0 = 40$  В,  $M_C = 0$  выполните компьютерное моделирование САР, варьируя параметрами  $b$  и  $m$ . Оцените допустимость автоколебательных процессов регулирования в данной системе. Числовые величины стартовых значений  $b$  и  $m$  примите следующие:  $b = 1$  В,  $m = 0,5$ .

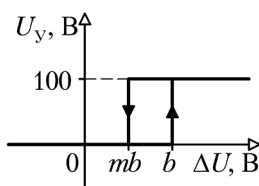


Рис. В.4. Статическая характеристика релейного регулятора:  
 $b$  – порог срабатывания;  $m$  – коэффициент возврата;  $mb$  – порог отпускания



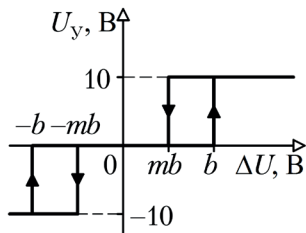


Рис. В.6. Релейная характеристика с зоной нечувствительности и гистерезисом

Проведите компьютерное моделирование данной САР для одного из вариантов табл. Б.6 (по заданию преподавателя) при следующих условиях:  $b = 0,1$  В;  $m = 0,5$  и  $m = 1$ ;  $U_0 = 0,5$  В; возмущающее воздействие – температура атмосферного воздуха  $\theta_A = 0$  °С. Определите параметры автоколебательных процессов регулирования и оцените их, исходя из требований к температурному режиму в теплицах.

## В.7. Релейная система автоматического регулирования давления в ресивере

В САР (см. п. Б.7 приложения Б) усилитель  $\delta$  заменен релейным двухпозиционным регулятором, статическая характеристика которого приведена на рис. В.7.

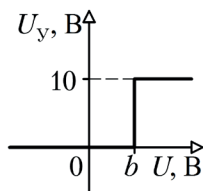


Рис. В.7. Статическая характеристика двухпозиционного регулятора:  
 $b$  – порог срабатывания (зона нечувствительности)

Для одного из вариантов табл. Б.7 (по заданию преподавателя) проведите компьютерное моделирование релейной системы при:  $b = 2$  В,  $F_0 = 50$  Н·м,  $Q_C = 0$ . Определите параметры автоколебаний и оцените возможность работы САР в таком автоколебательном режиме.

## В.8. Нелинейная астатическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины

В математических моделях линейных САР усилители сигналов представляют идеальными пропорциональными звеньями. В действительности всем реальным усилителям присущ эффект насыщения, который определенным образом может влиять на процессы регулирования системы. В САР (см. п. Б.8 приложения Б) электронный усилитель 5 имеет статическую характеристику с насыщением. Она показана на рис. В.8.

Проведите моделирование данной нелинейной САР для одного из вариантов табл. Б.8 (по согласованию с преподавателем). В процессе моделирования оцените влияние параметра  $b$  на процесс регулирования САР, варьируя  $b$  в пределах от 4 до 15 В при  $U_0 = 30$  В,  $\Delta P = 0$ .

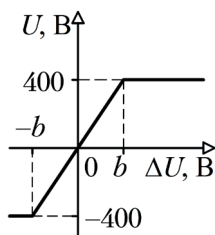


Рис. В.8. Статическая характеристика электронного усилителя:  
 $b$  — зона пропорциональности

## В.9. Релейная статическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины

В САР (см. п. Б.9 приложения Б) пропорциональный электронный усилитель заменен релейным регулятором, статическая характеристика которого показана на рис. В.9.

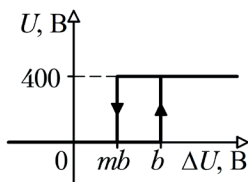


Рис. В.9. Статическая характеристика релейного регулятора:  
 $b$  — порог срабатывания;  $m$  — коэффициент возврата;  
 $mb$  — порог отпущения



Проведите моделирование данной САР для одного из вариантов табл. Б.9 (по заданию преподавателя). В процессе моделирования, варьируя коэффициент возврата  $m$  в пределах от 0 до 1, исследуйте его влияние на процессы регулирования системы при следующих условиях:  $b = 2$  В,  $U_0 = 29 \dots 31$  В,  $\Delta P = 0$ .

## В.10. Дискретная система автоматического регулирования температуры в помещении

Упрощенная принципиальная схема дискретной (цифровой) линейной САР, подобной системе, приведенной в п. Б.1 приложения Б, показана на рис. В.10, где: 1 – помещение; 2 – теплообменник (калорифер); 3 – микроЭВМ (УВК); 4 – двухфазный исполнительный двигатель; 5 – дифференциальный магнитный усилитель; 6 – клапан (заслонка).

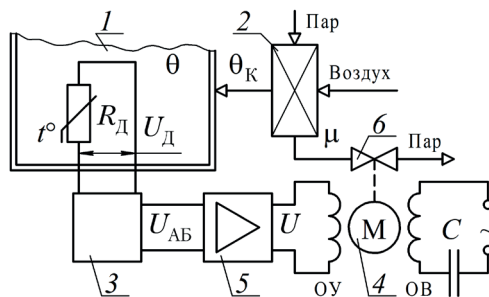


Рис. В.10. Схема цифровой САР температуры в помещении

В этой САР в качестве регулятора использован один канал микроЭВМ. В устройстве сопряжения микроЭВМ с объектом регулирования датчик ( $R_d$ ) подключен по потенциометрической схеме, сигнал которого  $U_d$  обрабатывается в микроЭВМ следующим образом:

- формируется задающее воздействие  $U_0$ ;
- вычисляется сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - U_d$ ;
- реализуется идеальный *ПИД-закон регулирования* в соответствии с передаточной функцией (1.64) в следующем виде:

$$W_{AB}(s) = \frac{U_{AB}(s)}{\Delta U(s)} = k_{\Pi} + \frac{k_I}{s} + k_D s.$$

Параметры *ПИД-закона регулирования*  $k_{\Pi}$ ,  $k_I$ ,  $k_D$  подлежат определению в результате выполнения задания.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов системы описываются уравнениями, приведенными в п. Б.1 приложения Б. Там же в табл. Б.1 даны числовые значения параметров САР.

## В.11. Дискретная система автоматического регулирования температуры в печи

Схема дискретной (цифровой) линейной САР, подобной системе, приведенной в п. Б.2 приложения Б, показана на рис. В.11, где: 1 – печь; 2 – микроЭВМ (УВК); 3 – дифференциальный магнитный усилитель; 4 – двухфазный электродвигатель; 5 – редуктор; 6 – клапан.

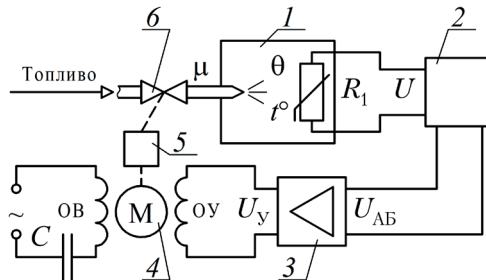


Рис. В.11. Схема цифровой САР температуры в печи

В этой САР в качестве регулятора использован один канал микроЭВМ. В устройстве сопряжения микроЭВМ с объектом регулирования датчик ( $R_1$ ) подключен по потенциометрической схеме, сигнал которого  $U$  обрабатывается в микроЭВМ следующим образом:

- формируется задающее воздействие  $U_0$ ;
- вычисляется сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - U$ ;
- реализуется идеальный *ПИД-закон регулирования* в соответствии с передаточной функцией (1.64) в следующем виде:

$$W_{\text{АБ}}(s) = \frac{U_{\text{АБ}}(s)}{\Delta U(s)} = k_{\text{П}} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + k_{\text{Д}} s.$$

Параметры *ПИД-закона регулирования*  $k_{\text{П}}$ ,  $k_{\text{И}}$ ,  $k_{\text{Д}}$  подлежат определению в результате выполнения задания.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов системы описываются уравнениями, приведенными в п. Б.2 приложения Б. Там же в табл. Б.2 даны числовые значения параметров САР.

## В.12. Дискретная система автоматического регулирования температуры теплоносителя зерносушилки

Схема дискретной (цифровой) линейной САР, подобной системе, рассмотренной в п. Б.3 приложения Б, показана на рис. В.12, где: 1 – шахтная зерносушилка; 2 –

камера смешивания; 3 – микроЭВМ (УВК); 4 – усилитель; 5 – исполнительный двигатель; 6 – редуктор; 7 – заслонка.

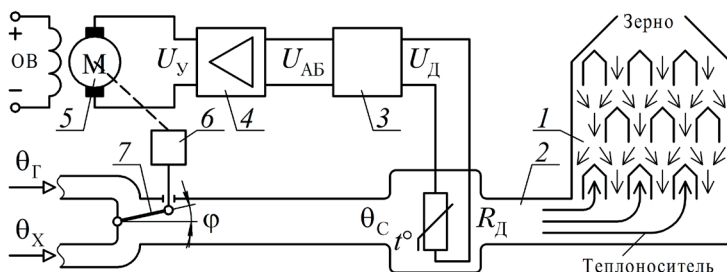


Рис. В.12. Схема цифровой САР температуры теплоносителя зерносушилки

В данной САР в качестве регулятора использован один канал микроЭВМ. В устройстве сопряжения микроЭВМ с объектом регулирования датчик ( $R_d$ ) подключен по потенциометрической схеме, сигнал которого  $U_d$  обрабатывается в микроЭВМ следующим образом:

- формируется задающее воздействие  $U_0$ ;
- вычисляется сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - U_d$ ;
- реализуется идеальный ПИД-закон регулирования в соответствии с передаточной функцией (1.64) в следующем виде:

$$W_{AB}(s) = \frac{U_{AB}(s)}{\Delta U(s)} = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + k_{\text{Д}} s.$$

Параметры ПИД-закона регулирования  $k_{\Pi}$ ,  $k_{\text{И}}$ ,  $k_{\text{Д}}$  подлежат определению в результате выполнения задания.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов системы описываются уравнениями, приведенными в п. Б.3 приложения Б. Там же в табл. Б.3 даны числовые значения параметров САР.

## В.13. Дискретная система автоматического регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока

Схема дискретной (цифровой) линейной САР, подобной системе, рассмотренной в п. Б.4 приложения Б, в которой в качестве регулятора использован один канал микроЭВМ, приведена на рис. В.13, где: 1 – микроЭВМ (УВК); 2 – тиристорный усилитель-преобразователь (тиристорный преобразователь совместно с усилителем напряжения по уровню); 3 – генератор; 4 – электродвигатель; 5 – тахогенератор; 6 – рабочая машина (рабочий механизм).

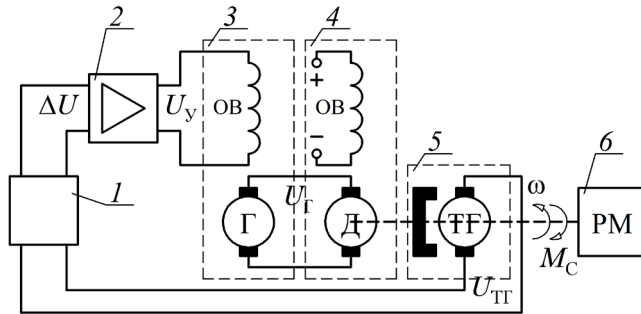


Рис. В.13. Схема цифровой САР угловой скорости двигателя

Сигнал  $U_{\text{ТГ}}$  тахогенератора обрабатывается в микроЭВМ следующим образом:

- формируется задающее воздействие  $U_0$ ;
- вычисляется сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - U_{\text{ТГ}}$ ;
- реализуется идеальный *ПИД-закон регулирования* в соответствии с передаточной функцией (1.64) в следующем виде:

$$W_{\text{АБ}}(s) = \frac{U_{\text{АБ}}(s)}{\Delta U(s)} = k_{\text{П}} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + k_{\text{Д}} s.$$

Параметры *ПИД-закона регулирования*  $k_{\text{П}}$ ,  $k_{\text{И}}$ ,  $k_{\text{Д}}$  подлежат определению в результате выполнения задания.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов системы описываются уравнениями, приведенными в п. Б.4 приложения Б. Там же в табл. Б.4 даны числовые значения параметров САР.

## В.14. Дискретная система автоматического регулирования частоты синхронного генератора

На рис. В.14 приведена схема дискретной (цифровой) линейной САР, подобной системе, рассмотренной в п. Б.5 приложения Б, в которой взамен механогидравлического регулирующего устройства использован электрический регулятор на базе микроЭВМ.

Обозначения, принятые на рис. В.14: 1 – синхронный генератор; 2 – дизельный двигатель; 3 – рейка топливного насоса 4; 5 – тахогенератор; 6 – микроЭВМ (УВК); 7 – электронный усилитель; 8 – электромагнитный исполнительный механизм.

Данная САР предназначена для стабилизации частоты  $f$  ЭДС  $E$  синхронного генератора 1, в качестве приводной машины которого используется дизельный двигатель 2. В данной системе объектом регулирования является дизельный двигатель, регулируемая величина которого – угловая скорость  $\omega$ , однозначно определяющая частоту  $f$ . Регулирование угловой скорости дизеля обеспечивает-

ся перемещением  $X_p$  рейки 3 топливного насоса 4. При перемещении рейки вниз количество топлива, подаваемого в дизель, уменьшается, что приводит к снижению угловой скорости  $\omega$ . Перемещение рейки вверх вызывает обратный эффект. Внешним возмущением, вызывающим изменения угловой скорости  $\omega$ , является момент сопротивления на валу дизеля, величина которого пропорциональна току  $I$  нагрузки генератора.

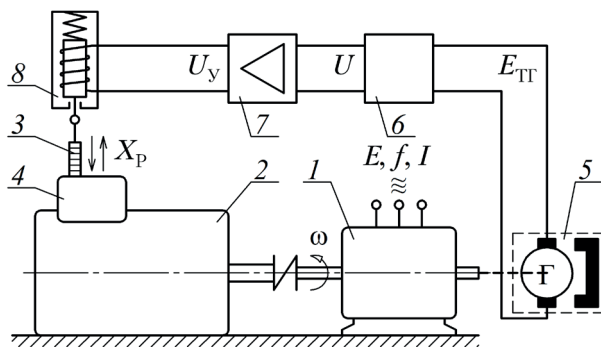


Рис. В.14. Схема цифровой САР частоты синхронного генератора

Угловая скорость  $\omega$  контролируется с помощью тахогенератора 5, сигнал которого – ЭДС  $E_{ТГ}$  через устройство сопряжения подается в микроЭВМ 6. Выходной сигнал  $U$  микроЭВМ, усиленный электронным усилителем 7 до уровня  $U_y$ , воздействует на электромагнит 8, вызывая перемещение рейки 3 топливного насоса 4 вверх или вниз в зависимости от знака сигнала рассогласования  $\Delta U$ .

Динамика элементов САР описывается следующими уравнениями:

- уравнение дизельного двигателя –  $T_0 \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_0 X_p - k_1 \Delta I$ ;
- уравнение тахогенератора –  $E_{ТГ} = k_{ТГ} \omega$ ;
- уравнение электронного усилителя –  $U_y = k_y U$ ;
- уравнение электромагнитного исполнительного механизма совместно

с рейкой топливного насоса –  $T_1 T_2 \frac{d^2 X_p}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dX_p}{dt} + X_p = k_{\varepsilon} U_y$ ,

где  $T_0, T_1, T_2$  – постоянные времени, с;

$k_0, k_1, k_{ТГ}, k_y, k_{\varepsilon}$  – коэффициенты передачи.

Сигнал  $E_{ТГ}$  тахогенератора обрабатывается в микроЭВМ следующим образом:

- формируется задающее воздействие  $U_0$ ;
- вычисляется сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - E_{ТГ}$ ;
- реализуется идеальный ПИД-закон регулирования в соответствии с передаточной функцией (1.64) в следующем виде:

$$W_{AB}(s) = \frac{U_{AB}(s)}{\Delta U(s)} = k_{П} + \frac{k_{И}}{s} + k_{Д} s.$$

Параметры *ПИД-закона регулирования*  $k_P$ ,  $k_I$ ,  $k_D$  подлежат определению в результате выполнения задания.

Числовые значения параметров САР для различных вариантов приведены в табл. В.1. Заданное значение угловой скорости  $50 \pm 0,5$  рад/с.

Таблица В.1. Значения параметров элементов САР

| Вариант | $T_0$ , с | $T_1$ , с | $T_2$ , с | $k_0$ , рад/(с·мм) | $k_1$ , рад/(с·А) | $k_{ТГ}$ , В·с/рад | $k_y$ | $k_z$ , мм/В | $\Delta I$ , А |
|---------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-------------------|--------------------|-------|--------------|----------------|
| 1       | 0,8       | 0,040     | 0,060     | 17                 | 0,5               | 0,1                | 12    | 0,50         | 18             |
| 2       | 0,7       | 0,038     | 0,055     | 14                 | 0,5               | 0,1                | 10    | 0,40         | -20            |
| 3       | 0,6       | 0,032     | 0,045     | 11                 | 0,5               | 0,1                | 14    | 0,90         | 15             |
| 4       | 0,5       | 0,022     | 0,037     | 18                 | 0,5               | 0,1                | 13    | 0,80         | 18             |
| 5       | 1,2       | 0,015     | 0,033     | 17                 | 0,5               | 0,1                | 11    | 0,50         | -13            |
| 6       | 1,6       | 0,010     | 0,021     | 16                 | 0,5               | 0,1                | 15    | 0,35         | 17             |
| 7       | 1,4       | 0,030     | 0,050     | 13                 | 0,5               | 0,1                | 12    | 0,52         | -15            |
| 8       | 1,2       | 0,025     | 0,040     | 15                 | 0,5               | 0,1                | 10    | 0,40         | 22             |
| 9       | 0,8       | 0,020     | 0,060     | 20                 | 0,5               | 0,1                | 8     | 0,50         | 18             |
| 10      | 1,5       | 0,040     | 0,090     | 19                 | 0,5               | 0,1                | 13    | 0,70         | -30            |

## В.15. Дискретная система автоматического регулирования температуры в атмосфере теплицы

На рис. В.15 приведена упрощенная принципиальная схема дискретной (цифровой) линейной САР, в которой в качестве регулятора использован один канал микроЭВМ, относящаяся к классу дискретных (цифровых) линейных. Она подобна системе, рассмотренной в п. Б.6 приложения Б.

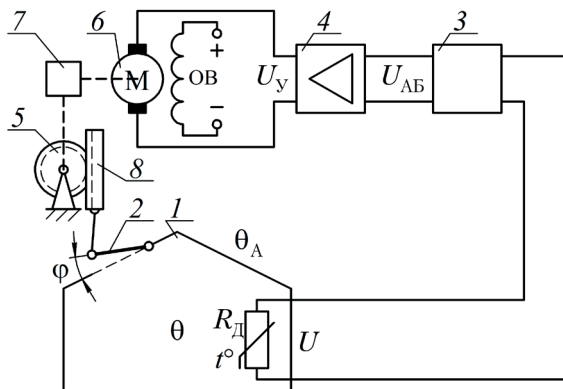


Рис. В.15. Схема цифровой САР температуры в атмосфере теплицы

Обозначения, принятые на рис. В.15: 1 – теплица; 2 – фрамуга; 3 – микроЭВМ (УВК); 4 – усилитель; 5 – шестеренка; 6 – двигатель постоянного тока; 7 – редуктор; 8 – рейка.

В устройстве сопряжения микроЭВМ с объектом регулирования датчик ( $R_d$ ) подключен по потенциометрической схеме, сигнал которого  $U$  обрабатывается в микроЭВМ следующим образом:

- формируется задающее воздействие  $U_0$ ;
- вычисляется сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - U$ ;
- реализуется идеальный *ПИД-закон регулирования* в соответствии с передаточной функцией (1.64) в следующем виде:

$$W_{AB}(s) = \frac{U_{AB}(s)}{\Delta U(s)} = k_{II} + \frac{k_{II}}{s} + k_D s.$$

Параметры *ПИД-закона регулирования*  $k_{II}$ ,  $k_{II}$ ,  $k_D$  подлежат определению в результате выполнения задания.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов системы описываются уравнениями, приведенными в п. Б.6 приложения Б. Там же в табл. Б.6 даны числовые значения параметров САР.

## В.16. Дискретная система автоматического регулирования давления в ресивере

На рис. В.16 приведена упрощенная принципиальная схема САР, в которой в качестве регулятора использован один канал микроЭВМ. Она относится к классу дискретных (цифровых) линейных и подобна системе, рассмотренной в п. Б.7 приложения Б.

Обозначения, принятые на рис. В.16: 1 – ресивер; 2 – заслонка; 3 – сильфонный датчик; 4 – потенциометрический преобразователь; 5 – сильфон; 6 – пружина; 7 – винт; 8 – электронный усилитель; 9 – электромагнитный привод; 10 – микроЭВМ (УВК).

Сигнал  $U$  потенциометрического преобразователя обрабатывается в микроЭВМ – реализуется идеальный *ПИД-закон регулирования* в соответствии с передаточной функцией (1.64) в следующем виде:

$$W_{AB}(s) = \frac{U_{AB}(s)}{\Delta U(s)} = k_{II} + \frac{k_{II}}{s} + k_D s.$$

Параметры *ПИД-закона регулирования*  $k_{II}$ ,  $k_{II}$ ,  $k_D$  подлежат определению в результате выполнения задания.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов системы описываются уравнениями, приведенными в п. Б.7 приложения Б. Там же в табл. Б.7 даны числовые значения параметров САР.

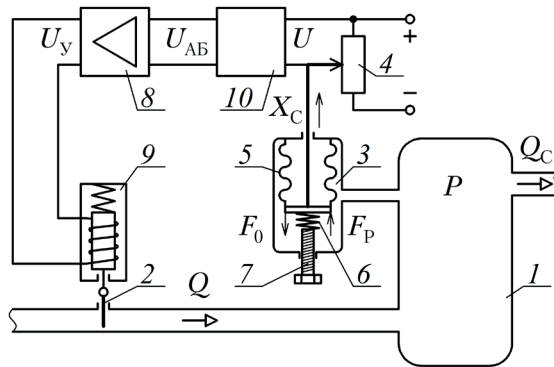


Рис. В.16. Схема цифровой САУ давления в ресивере

## В.17. Дискретная система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины

На рис. В.17 приведена упрощенная принципиальная схема САУ, в которой в качестве регулятора использован один канал микроЭВМ. Она относится к классу дискретных (цифровых) линейных систем и подобна САУ, рассмотренной в п. Б.8 приложения Б.

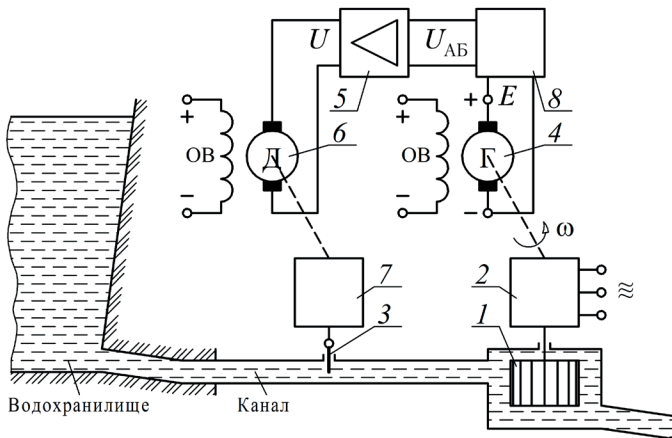


Рис. В.17. Схема цифровой САУ угловой скорости гидротурбины

Сигнал датчика (тахогенератора)  $E$  обрабатывается в микроЭВМ следующим образом:

- формируется задающее воздействие  $U_0$ ;



- вычисляется сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - E$ ;
- реализуется идеальный *ПИД-закон регулирования* в соответствии с передаточной функцией (1.64) в следующем виде:

$$W_{AB}(s) = \frac{U_{AB}(s)}{\Delta U(s)} = k_{\text{П}} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + k_{\text{Д}}s.$$

Параметры *ПИД-закона регулирования*  $k_{\text{П}}$ ,  $k_{\text{И}}$ ,  $k_{\text{Д}}$  подлежат определению в результате выполнения задания.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов системы описываются уравнениями, приведенными в п. Б.8 приложения Б. Там же в табл. Б.8 даны числовые значения параметров САР.

## В.18. Вариантные задания

**Вариант В.1.** Определите переходный процесс в цифровой САР, дискретная модель которой представлена передаточной функцией

$$W(z) = \frac{0,632z}{z^2 - 1,368z + 0,368},$$

при действии единичного задающего сигнала и оцените показатели качества процесса регулирования. Период квантования  $T = 0,1$  с.

**Вариант В.2.** Найти реакцию цифровой САР на единичное ступенчатое воздействие. Передаточная функция САР:

$$W(z) = \frac{z + 2}{(z - 0,2)(z + 0,5)}.$$

Период квантования  $T = 0,05$  с. Определите показатели качества процесса регулирования.

**Вариант В.3.** Задана непрерывная модель линейной САР в виде передаточной функции

$$W(s) = \frac{10}{(s + 1)^3}.$$

Необходимо определить дискретную модель системы, используя метод Эйлера (см. (Д.13), приложение Д), и на ее основе определить реакцию САР на единичное ступенчатое воздействие. Полученную дискретную переходную характеристику сравните с аналогичной характеристикой, полученной на основе передаточной функции  $W(s)$ .

**Вариант В.4.** В САР с микроЭВМ объект регулирования представлен линейной моделью в виде инерционного звена с запаздыванием

$$W_O(s) = \frac{k_O e^{-\tau s}}{T_O s + 1},$$

где  $T_O = 2$  с и  $\tau = 0,6$  с – постоянная времени и время запаздывания.

МикроЭВМ реализует алгоритм дискретного *П-закона регулирования* идеального квантователя (идеальное импульсное звено) с периодом квантования  $T = 0,8$  с и экстраполятора нулевого порядка.

Необходимо определить критический коэффициент передачи *П-закона регулирования*, основываясь на:

- непрерывной модели цифровой САР;
- непрерывно-дискретной модели цифровой САР;
- дискретной модели цифровой САР.

Выполнить сравнительную оценку полученных результатов.

**Вариант В.5.** В САР с микроЭВМ объект регулирования описывается передаточной функцией

$$W_O(s) = \frac{1}{s(s+1)}.$$

МикроЭВМ реализует алгоритм дискретного пропорционального закона регулирования с передаточным коэффициентом  $k$ , идеального квантователя с периодом квантования  $T = 0,5$  с и экстраполятора нулевого порядка. Необходимо определить критический коэффициент передачи  $k_{кр}$  используя следующие математические модели цифровых САР:

- непрерывную;
- непрерывно-дискретную;
- дискретную.

**Вариант В.6.** Дискретная модель САР скорости двигателя постоянного тока (см. лабораторную работу 8, рис. 3.100, 3.101) в виде структурной схемы показана на рис. В.18.

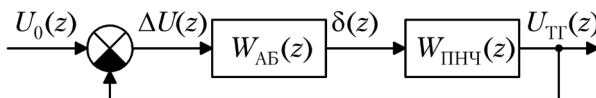


Рис. В.18. Структурная схема цифровой САР угловой скорости двигателя постоянного тока

Для периода квантования  $T = 0,25$  с передаточная функция приведенной непрерывной части системы:

$$W_{ПНЧ}(z) = \frac{-10,42z^3 + 21,94z^2 - 13,87z + 2,919}{z^3 - 2,091z^2 + 1,375z - 0,2725}.$$

Алгоритмический блок (микроЭВМ) реализует идеальный *ПИ-закон регулирования* [(1.64) при  $k_d = 0$ ] с параметрами  $k_{П} = 0,1$  и  $k_{И} = 0,09$ .

Определите переходную характеристику САР при  $U_0(t) = 110$  В, используя которую, вычислите показатели качества системы.

**Вариант В.7.** В дискретной модели САР скорости двигателя постоянного тока (см. вариант В.6) алгоритмический блок (микроЭВМ) реализует идеальный *ПД-закон регулирования* [(1.64) при  $k_I = 0$ ] с параметрами  $k_P = 0,1$  и  $k_D = 0,15$ .

Определите переходную характеристику САР при  $U_0(t) = 110$  В, используя которую, вычислите показатели качества системы.

**Вариант В.8.** В дискретной модели САР скорости двигателя постоянного тока (см. вариант В.6) алгоритмический блок (микроЭВМ) реализует идеальный *ПИД-закон регулирования* (1.64).

При задающем воздействии  $U_0(t) = 110$  В методом подбора определите значения параметров *ПИД-закона регулирования*, при которых в системе будет апериодический переходный процесс.

# Описание объектов регулирования

ПРИЛОЖЕНИЕ



Описание объектов регулирования сформировано на основе [4, 7, 13, 19, 20]

## Г.1. Производственное помещение как объект автоматического регулирования

Для отопления производственных помещений (заводских цехов, ремонтных мастерских, складов и т. п.) широкое распространение нашел водяной обогрев. Для водяного обогрева воздуха вдоль стен помещения прокладывают металлические трубы диаметром не менее 50 мм, циркуляцию воды с температурой 70...90 °С в которых создают принудительно с помощью электронасоса. Такая система обогрева выполняет функции исполнительного органа (элемента). Она изменяет значение регулирующего воздействия на входе объекта регулирования (помещения), в качестве которого принимают температуру поверхности трубы  $\theta_T$ . За счет изменения температуры  $\theta_T$  посредством изменения температуры воды  $\theta_B$  обеспечивается компенсация влияния возмущающих воздействий на объект регулирования. Температура воды  $\theta_B$  регулируется путем изменения степени открытия смесительного клапана (в горячую воду, забираемую из котельной циркуляционным насосом, добавляют через смесительный клапан определенное количество возвратной воды, отдавшей теплоту для обогрева помещения). К числу возмущающих воздействий относятся: температура  $\theta_A$  и влажность  $\phi_A$  атмосферного воздуха, скорость ветра  $v_B$  и др. В качестве основного (главного) возмущения можно принять температуру атмосферного воздуха  $\theta_A$ . В таком случае структурная схема помещения как объекта регулирования по температуре совместно с исполнительным органом можно представить в виде, показанном на рис. Г.1.

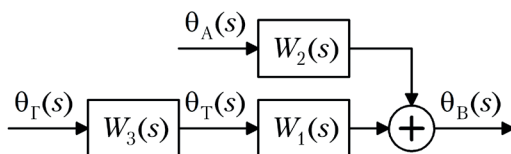


Рис. Г.1. Структурная схема помещения  
совместно с системой водяного обогрева

Передаточная функция помещения по регулирующему воздействию:

$$W_1(s) = \frac{\theta_B(s)}{\theta_T(s)} = \frac{k_1(Ts + 1)}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}, \quad (Г.1)$$

где  $\theta_B(s)$  и  $\theta_T(s)$  – соответственно изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях температуры воздуха в теплице и температуры поверхностей труб;  
 $k_1$  – коэффициент передачи;  
 $T, T_1, T_2$  – постоянные времени, с.

Передаточная функция помещения по возмущающему воздействию:

$$W_2(s) = \frac{\theta_B(s)}{\theta_A(s)} = \frac{k_2}{T_3 s + 1}, \quad (Г.2)$$

где  $\theta_A(s)$  – изображение температуры атмосферного воздуха по Лапласу при нулевых начальных условиях;  
 $k_2, T_3$  – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени (с).

Система водяного обогрева (исполнительный орган) представляет собой звено запаздывания с передаточной функцией:

$$W_3(s) = \frac{\theta_T(s)}{\theta_r(s)} = e^{-\tau s}, \quad (Г.3)$$

где  $\theta_r(s)$  – изображение по Лапласу при нулевых начальных условиях температуры воды, подаваемой в трубы;  
 $\tau$  – время чистого (транспортного) запаздывания, определяемое по формуле

$$\tau = \frac{lV}{LQ},$$

где  $L$  – длина труб, м;  
 $l$  – расстояние от смесительного клапана до точки контроля температуры, м;  
 $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  
 $Q$  – производительность циркуляционного насоса, м<sup>3</sup>/ч.

Числовые значения параметров передаточных функций (Г.1)–(Г.3) зависят от размеров помещения, его конструктивных параметров и типа строительных материалов, использованных при возведении помещения. При практических расчетах и исследованиях САР температуры в конкретном помещении эти параметры определяют, основываясь на известных аналитических и экспериментальных методах исследования динамических характеристик объектов и элементов автоматических систем. Для учебных целей (при выполнении расчетных и курсовых работ) можно использовать их ориентировочные значения, приведенные в табл. Г.1, а в качестве возмущения следует принимать скачкообразное изменение температуры атмосферного воздуха  $\Delta\theta_A$  от первоначального значения  $\theta_A$ .

**Таблица Г.1. Значения параметров передаточных функций (Г.1)–(Г.3) и возмущающего воздействия**

| Вариант | $k_1$ | $k_2$ | $T, \text{с}$ | $T_1, \text{с}$ | $T_2, \text{с}$ | $T_3, \text{с}$ | $\tau, \text{с}$ | $\theta_A, ^\circ\text{C}$ | $\Delta\theta_A, ^\circ\text{C}$ |
|---------|-------|-------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 1       | 0,30  | 0,60  | 36            | 1300            | 624             | 3200            | 260              | –20                        | –10                              |
| 2       | 0,35  | 0,60  | 40            | 1400            | 700             | 3400            | 300              | –28                        | –12                              |
| 3       | 0,40  | 0,60  | 50            | 1600            | 800             | 3600            | 350              | –22                        | –15                              |
| 4       | 0,50  | 0,70  | 30            | 1100            | 550             | 3000            | 300              | –15                        | –20                              |
| 5       | 0,55  | 0,75  | 25            | 800             | 450             | 2800            | 280              | –5                         | –13                              |

## Г.2. Обогреваемый пол как объект автоматического регулирования

В последние годы для жилых помещений широкое распространение нашли так называемые «водяные теплые полы», основным элементом которых являются полиэтиленовые трубы, равномерно уложенные внутри бетонного напольного покрытия (стяжки). В этих трубах циркулирует нагретая вода (60...70 °С) из системы отопления, которая является теплоносителем.

Регулирование температуры пола  $\theta_{\Pi}$  осуществляют посредством изменения регулирующего воздействия – расхода воды  $Q$ , подаваемого в трубы. На пол действуют внешние возмущения (возмущающие воздействия). В качестве основного возмущения, вызывающего отклонение регулируемой величины  $\theta_{\Pi}$  от требуемого значения, можно рассматривать изменения температуры  $\theta_0$  окружающей среды.

Обогреваемый пол является двухъёмкостным объектом регулирования: первая ёмкость (звено) – трубы, вторая ёмкость (звено) – непосредственно бетонное напольное покрытие. Структурная схема обогреваемого пола имеет вид, показанный на рис. Г.2.

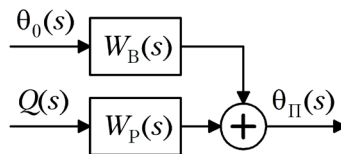


Рис. Г.2. Структурная схема обогреваемого пола

Передаточные функции соответственно по регулирующему и возмущающему воздействиям:

$$W_P(s) = \frac{\theta_{\Pi}(s)}{Q(s)} = \frac{k_P}{(T_T s + 1)(T_B s + 1)}; \quad (\text{Г.4})$$

$$W_B(s) = \frac{\theta_{\Pi}(s)}{\theta_0(s)} = \frac{k_B}{T_B s + 1}, \quad (\text{Г.5})$$

где  $\theta_{II}(s)$ ,  $Q(s)$  и  $\theta_0(s)$  – соответственно изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях температуры пола, расхода нагретой воды и температуры окружающей среды;  $k_p, k_B, T_T, T_B, T_B$  – коэффициенты передачи и постоянные времени (их ориентировочные числовые значения для использования в учебных расчетах приведены в табл. Г.2).

Заданное значение температуры пола  $40 \pm 2$  °С.

Таблица Г.2. Значения параметров передаточных функций (Г.4) и (Г.5)

| Вариант | $k_p, \text{°С-с/л}$ | $k_B$ | $T_T, \text{с}$ | $T_B, \text{с}$ | $T_B, \text{с}$ |
|---------|----------------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1       | 40                   | 0,20  | 50              | 300             | 500             |
| 2       | 30                   | 0,25  | 55              | 350             | 550             |
| 3       | 32                   | 0,30  | 60              | 400             | 500             |
| 4       | 35                   | 0,32  | 65              | 450             | 650             |
| 5       | 38                   | 0,22  | 70              | 500             | 600             |

### Г.3. Звено робота с электрическим приводом как объект автоматического регулирования

В робототехнике наряду с гидравлическими и пневматическими приводами применяют электрические приводы. На рис. Г.3 показаны фрагменты промышленного робота, в котором в качестве приводных двигателей его звеньев использованы двигатели постоянного тока, управляемые по цепи якоря.

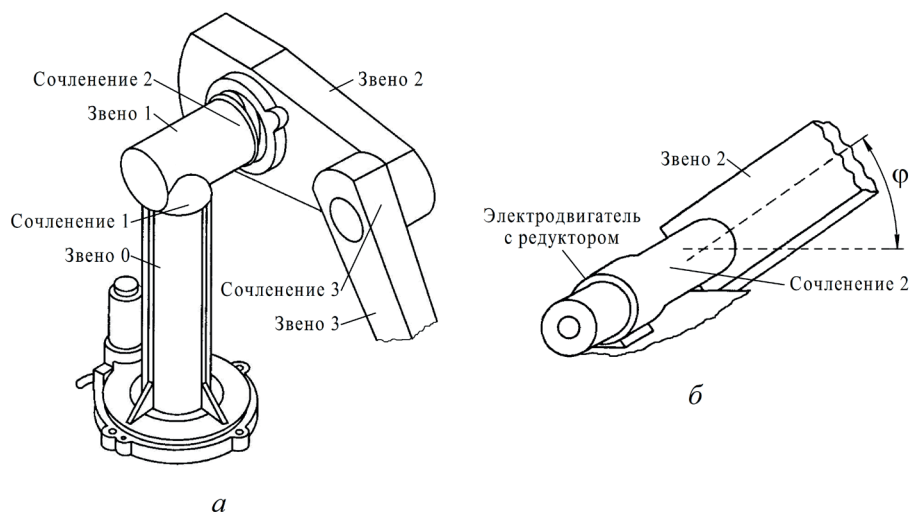


Рис. Г.3. Схематичное изображение фрагментов робота:  
а – общего вида; б – одного из его сочленений (сочленение 2)

В общем случае манипулятор робота имеет несколько сочленений и подвижных звеньев. При проектировании систем управления роботами каждое сочленение рассматривается как автономный сервопривод (движения всех остальных сочленений в расчет не принимаются) [19]. При таком подходе каждое звено управляется самостоятельной замкнутой автоматической системой, назначение которой сводится к регулированию углового перемещения  $\varphi$  звена (рис. Г.3б) в соответствии с задающим воздействием, формируемым в ЭВМ, управляемой роботом в целом согласно предписанной программе.

Динамические свойства одного звена робота (совместно с двигателем), являющегося по своей сути объектом регулирования замкнутой автономной автоматической системы, без учета влияния других звеньев описываются следующей системой дифференциальных уравнений [20]:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + C \frac{d\varphi}{dt} + k_{\Pi} \varphi = k_T i; \quad (\text{Г.6})$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri + k_E \frac{d\varphi}{dt} = u, \quad (\text{Г.7})$$

где  $J$  – приведенный к валу двигателя момент инерции, кг·м<sup>2</sup>;

$\varphi$  – угловое перемещение звена, рад;

$C$  – приведенный к валу двигателя коэффициент вязкого трения в подшипниках, Н·м·с/рад;

$k_{\Pi}$  – коэффициент жесткости пружины, Н·м/рад;

$k_T$  – моментный коэффициент двигателя, Н·м/А;

$i$  – ток якоря двигателя, А;

$L$  – индуктивность обмотки якоря двигателя, Гн;

$R$  – активное сопротивление обмотки якоря двигателя, Ом;

$k_E$  – скоростной коэффициент двигателя, В·с/рад;

$u$  – напряжение якоря двигателя, В.

Значения параметров дифференциальных уравнений (Г.6) и (Г.7) приведены в табл. Г.3.

**Примечание:** при составлении структурной математической модели объекта регулирования на основе приведенной выше системы дифференциальных уравнений (Г.6) и (Г.7) целесообразно воспользоваться рекомендациями, приведенными в п. А.2 приложения А.

Таблица Г.3. Значения параметров уравнений (Г.6) и (Г.7)

| Вариант | $J$ , кг·м <sup>2</sup> | $C$ , Н·м·с/рад | $k_{\Pi}$ , Н·м/рад | $k_T$ , Н·м/А | $L$ , Гн | $R$ , Ом | $k_E$ , В·с/рад |
|---------|-------------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|----------|-----------------|
| 1       | 0,8                     | 0,3             | 35                  | 0,40          | 0,0100   | 0,56     | 0,40            |
| 2       | 0,7                     | 0,3             | 32                  | 0,35          | 0,0085   | 0,52     | 0,35            |
| 3       | 0,9                     | 0,3             | 37                  | 0,45          | 0,0150   | 0,64     | 0,45            |
| 4       | 0,6                     | 0,3             | 30                  | 0,35          | 0,0080   | 0,50     | 0,35            |
| 5       | 1,0                     | 0,3             | 40                  | 0,50          | 0,0170   | 0,70     | 0,50            |



## Г.4. Шахтная зерносушилка как объект автоматического регулирования

При закладке на хранение семенного и товарного зерна его подвергают сушке с целью получения кондиционной влажности 14...15%. Для этого широко используются шахтные зерносушилки, технологический процесс сушки зерна в которых происходит в сушильной камере, конструкция и принцип работы которой схематично отображены на рис. Г.4, где: 1 – шахты прямоугольного сечения; 2 – пространство между шахтами, в которое подается теплоноситель; 3 – пространство между шахтами и ограждением камеры, через которое отводится отработанный теплоноситель; 4 – выпускные лотки; 5 – заслонки для регулирования скорости перемещения зерна в шахтах.

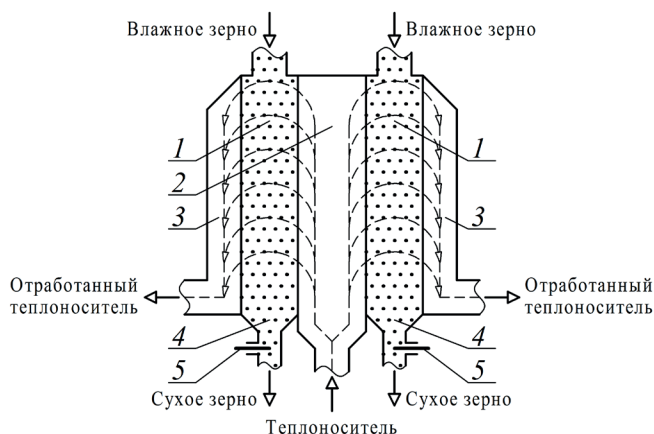


Рис. Г.4. Схематичное представление сушильной камеры

Конструкция шахт выполнена так, чтобы обеспечивался проход теплоносителя (воздуха, нагретого до определенной температуры) через слой зерна, перемещающегося сверху вниз. Теплоноситель поступает в пространство 2, проходит через слой зерна и поглощает влагу, а затем отводится через пространство 3 посредством вентиляторов. Высушенное зерно с помощью норий поступает на охлаждение в охлаждающие колонки.

При сушке зерна в шахтных зерносушилках необходимо, чтобы температура теплоносителя на входе и температура зерна на выходе из зерносушилки, в зависимости от типа культур, не превышала определенных значений (табл. Г.4, в числителе приведена температура теплоносителя, в знаменателе – температура зерна), а сьем влаги за один проход через сушилку не должен превышать 6% для злаковых и 3...4% для бобовых культур, кукурузы, риса, проса, гречихи.

Отклонения температуры теплоносителя, зерна и его влажности от регламентированных значений (табл. Г.4) должны быть соответственно не более  $\pm 5^\circ\text{C}$ ,  $\pm 3...4^\circ\text{C}$  и  $\pm 2\%$ .

**Таблица Г.4. Максимально допустимые температурные режимы сушки зерна различных культур**

| Наименование культуры           | Влажность зерна до сушки, % | Температура при сушке зерна, $^\circ\text{C}$ |              |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|--------------|
|                                 |                             | продовольственного                            | семенного    |
| Пшеница                         | до 20                       | 140/55                                        | 70/40        |
|                                 | свыше 20                    | 120/55                                        | 65/40        |
| Рожь, ячмень, подсолнечное семя | независимо от влажности     | 150/55                                        | 65/40        |
| Овес                            | то же                       | 140/50                                        | 65/40        |
| Просо                           | то же                       | 80/40                                         | (50...60)/40 |
| Рис                             | то же                       | 70/35                                         | 60/35        |
| Кукуруза                        | до 18                       | 150/50                                        | 60/40        |
|                                 | свыше 23                    | 150/50                                        | 50/40        |
| Горох, вика                     | до 18                       | 70/30                                         | 60/40        |

Таким образом, температура зерна  $\theta$  и его влажность  $w$  на выходе из сушильной камеры являются регулируемыми величинами (координаты) зерносушилки. То есть зерносушилку как объект автоматического регулирования можно рассматривать как двухмерный объект с определенным количеством входных (регулирующих и возмущающих) воздействий, основные из которых следующие:  $\theta_T$  – температура теплоносителя;  $\theta_3$  – исходная температура зерна;  $w_3$  – исходная влажность зерна;  $v$  – скорость перемещения зерна в шахтах.

Рассмотренные регулируемые величины и входные воздействия взаимосвязаны. Это обуславливает достаточно сложную многосвязную структурную схему математической модели зерносушилki как объекта автоматического регулирования, что было установлено в результате экспериментальных исследований шахтной зерносушилki СЗШ-16А, проведенных в Ленинградском сельскохозяйственном институте. Исследования и расчет автоматической системы регулирования температуры  $\theta$  и влажности  $w$  зерна на основе такой модели возможны с привлечением достаточно сложной теории многосвязных автоматических систем. В связи с этим ниже приводятся упрощенные одномерные математические модели зерносушилki, полученные на основе исходной многосвязной модели, для их использования в учебных целях (при выполнении расчетных и курсовых работ).

**Шахтную зерносушилку как объект автоматического регулирования по температуре зерна** можно представить в виде, показанном на рис. Г.5, где:  $\theta$  – регулируемая величина;  $\theta_T$  – регулирующее воздействие;  $\theta_3$ ,  $w_3$  – возмущения.

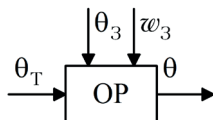


Рис. Г.5. Функциональная схема зерносушилки как объекта автоматического регулирования по температуре зерна

Структурная схема зерносушилки, соответствующая рис. Г.5, приведена на рис. Г.6.

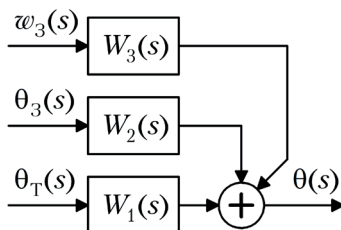


Рис. Г.6. Структурная схема зерносушилки как объекта автоматического регулирования по температуре зерна

Передаточные функции:

$$W_1(s) = \frac{\theta(s)}{\theta_T(s)} = \frac{k_1(T_1s + 1)e^{-\tau_1s}}{T_3^2s^2 + T_2s + 1}; \quad (\text{Г.8})$$

$$W_2(s) = \frac{\theta(s)}{\theta_3(s)} = \frac{k_2e^{-\tau_2s}}{T_3^2s^2 + T_2s + 1}; \quad (\text{Г.9})$$

$$W_3(s) = \frac{\theta(s)}{w_3(s)} = \frac{k_3e^{-\tau_3s}}{T_3^2s^2 + T_2s + 1}, \quad (\text{Г.10})$$

где  $\theta(s)$ ,  $\theta_T(s)$ ,  $\theta_3(s)$ ,  $w_3(s)$  – изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях соответственно температуры зерна на выходе  $\theta$ , температуры теплоносителя  $\theta_T$ , исходной температуры зерна  $\theta_3$ , исходной влажности зерна  $w_3$ ;

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – передаточные коэффициенты;

$T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – постоянные времени;

$\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  – время запаздываний.

Значения этих параметров и возмущений для учебных расчетов и исследований приведены в табл. Г.5.

При исследованиях и расчетах САР в качестве возмущений следует принимать скачкообразные изменения исходной температуры  $\Delta\theta_3$  и исходной влажности  $\Delta w_3$  соответственно от их первоначальных значений  $\theta_3$  и  $w_3$  согласно табл. Г.5.

Таблица Г.5. Значения параметров передаточных функций (Г.8)–(Г.10) и возмущающих воздействий

| Вариант | $k_1$ ,<br>°C·с/м | $k_2$ | $k_3$ ,<br>°C/% | $T_1$ ,<br>с | $T_2$ ,<br>с | $T_3$ ,<br>с | $\tau_1$ ,<br>с | $\tau_2$ ,<br>с | $\tau_3$ ,<br>с | $\theta_3$ ,<br>°C | $\Delta\theta_3$ ,<br>°C | $w_3$ ,<br>% | $\Delta w_3$ ,<br>% |
|---------|-------------------|-------|-----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------------|--------------|---------------------|
| 1       | 0,30              | 0,6   | −0,20           | 84           | 176          | 86           | 60              | 1380            | 1680            | 15                 | 10                       | 35           | −15                 |
| 2       | 0,35              | 0,3   | −0,25           | 90           | 185          | 95           | 65              | 1450            | 1750            | 20                 | −10                      | 20           | 15                  |
| 3       | 0,25              | 0,5   | −0,15           | 75           | 160          | 80           | 50              | 1200            | 1500            | 30                 | −15                      | 30           | 40                  |
| 4       | 0,40              | 0,7   | −0,30           | 95           | 190          | 90           | 62              | 1500            | 1800            | 20                 | 20                       | 25           | 10                  |
| 5       | 0,45              | 0,4   | −0,35           | 70           | 165          | 75           | 55              | 1300            | 1600            | 18                 | 12                       | 35           | 45                  |

Шахтную зерносушилку как объект автоматического регулирования по влажности зерна на ее выходе  $w$  в упрощенном варианте можно представить в виде схемы, показанной на рис. Г.7, где:  $w$  – регулируемая величина;  $v$  – регулирующее воздействие;  $\theta_3, w_3$  – возмущения.

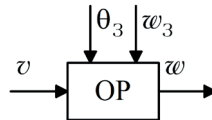


Рис. Г.7. Функциональная схема зерносушилки как объекта автоматического регулирования по влажности зерна

Соответствующая такому объекту регулирования структурная схема приведена на рис. Г.8.

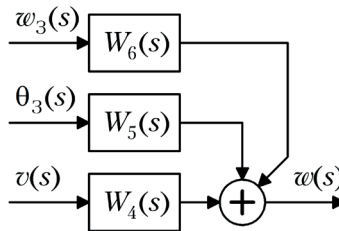


Рис. Г.8. Структурная схема зерносушилки как объекта автоматического регулирования по влажности зерна

Передаточные функции:

$$W_4(s) = \frac{w(s)}{v(s)} = \frac{k_4(T_4s + 1)e^{-\tau_4s}}{T_3^2s^2 + T_2s + 1}; \quad (\text{Г.11})$$

$$W_5(s) = \frac{w(s)}{\theta_3(s)} = \frac{k_5}{T_3^2s^2 + T_2s + 1}; \quad (\text{Г.12})$$

$$W_6(s) = \frac{w(s)}{w_3(s)} = \frac{k_6(T_5s + 1)e^{-\tau_5s}}{T_3^2s^2 + T_2s + 1}, \quad (\text{Г.13})$$

где  $w(s)$ ,  $v(s)$  – изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях соответственно выходной влажности  $w$  и скорости  $v$  перемещения зерна;

$k_4$ ,  $k_5$ ,  $k_6$  – передаточные коэффициенты;

$T_4$ ,  $T_5$  – постоянные времени;

$\tau_4$ ,  $\tau_5$  – время запаздываний.

Значения параметров передаточных функций (Г.11)–(Г.13) и возмущающих воздействий (для учебных целей) приведены в табл. Г.6.

В качестве возмущающих воздействий при исследованиях и расчетах САР следует принимать скачкообразные изменения температуры  $\Delta\theta_3$  и исходной влажности  $\Delta w_3$  соответственно от их первоначальных значений  $\theta_3$  и  $w_3$  согласно табл. Г.6.

**Таблица Г.6. Значения параметров передаточных функций (Г.11)–(Г.13) и возмущающих воздействий**

| Вариант | $k_4$ ,<br>°С·с/м | $k_5$ ,<br>°С/% | $k_6$ | $T_2$ ,<br>с | $T_3$ ,<br>с | $T_4$ ,<br>с | $T_5$ ,<br>с | $\tau_4$ ,<br>с | $\tau_5$ ,<br>с | $\theta_3$ ,<br>°С | $\Delta\theta_3$ ,<br>°С | $w_3$ ,<br>% | $\Delta w_3$ ,<br>% |
|---------|-------------------|-----------------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------------|--------------|---------------------|
| 1       | 8,0               | 0,10            | 0,70  | 180          | 90           | 60           | 80           | 300             | 1500            | 18                 | 12                       | 20           | 15                  |
| 2       | 6,0               | 0,08            | 0,60  | 160          | 80           | 55           | 75           | 250             | 1300            | 20                 | 20                       | 25           | 15                  |
| 3       | 9,0               | 0,15            | 0,75  | 190          | 100          | 65           | 85           | 350             | 1550            | 30                 | –15                      | 20           | 18                  |
| 4       | 7,0               | 0,13            | 0,80  | 170          | 70           | 70           | 90           | 280             | 1350            | 20                 | –10                      | 25           | 10                  |
| 5       | 8,5               | 0,14            | 0,85  | 165          | 85           | 75           | 88           | 260             | 1400            | 15                 | 10                       | 35           | 12                  |

## Г.5. Поворотное устройство солнечной батареи как объект автоматического регулирования

Известно, что солнечные батареи генерируют максимальную энергию, при условии когда они располагаются перпендикулярно направлению солнечных лучей. Такая ситуация для неподвижных батарей возможна только один раз в день. В остальное время эффективность работы солнечных элементов составляет менее 10%. Для ее повышения солнечные батареи располагают на поворотном устройстве с двумя степенями свободы, управляемом автоматической системой слежения за солнцем.

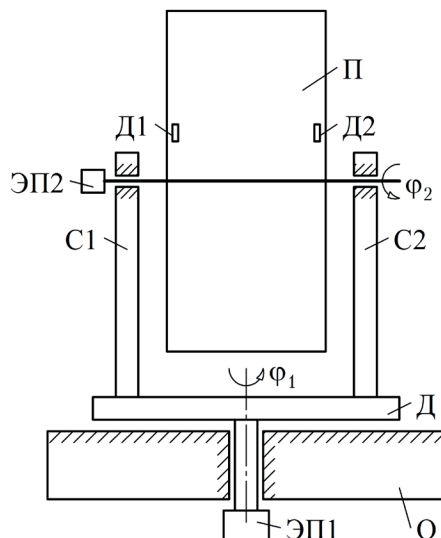


Рис. Г.9. Схематическое изображение устройства слежения за солнцем

На рис. Г.9 схематично показана конструкция одного из вариантов устройства автоматического слежения за солнцем. Устройство состоит из неподвижного основания О, диска Д, приводимого в движение в горизонтальной плоскости электроприводом ЭП1, двух стоек С1 и С2, платформы П с закрепленной на ней солнечной батареей, приводимой в движение в вертикальной плоскости электроприводом ЭП2. Две степени свободы устройства позволяют гибко отслеживать движение солнца. Электроприводы выполнены на основе двигателей постоянного тока и червячных самотормозящихся редукторов. Последние, несмотря на их сравнительно невысокий КПД, применены с целью исключения влияния эффекта парусности на работу установки.

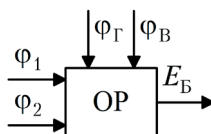


Рис. Г.10. Функциональная схема солнечной батареи как объекта автоматического регулирования:

$E_B$  – ЭДС батареи – регулируемая величина;

$\varphi_1, \varphi_2$  – регулирующие воздействия;  $\varphi_Г, \varphi_В$  – угловые перемещения батареи в горизонтальной и вертикальной плоскостях, вызванные вращением земли, – возмущающие воздействия

Солнечная батарея является объектом регулирования с двумя регулирующими воздействиями (рис. Г.10). Следовательно, автоматическая система слежения за солнцем должна иметь два взаимосвязанных контура регулирования. Учитывая, что возмущающие воздействия  $\Phi_{\Gamma}$ ,  $\Phi_B$  изменяются очень медленно (угловая скорость вращения земли  $\omega_{\text{ЗЕМ}} = 2\pi/t_{\text{СУТ}}$ , где  $t_{\text{СУТ}}$  – продолжительность суток), эти взаимосвязанные контуры регулирования можно рассматривать как независимые САР. При таком допущении в качестве условного объекта регулирования каждой системы целесообразно рассматривать двигатель постоянного тока совместно с редуктором в совокупности с платформой и солнечной батареей и учетом инерционной нагрузки, а также моментов вязкого трения в редукторе и подшипниках вращающихся элементов.

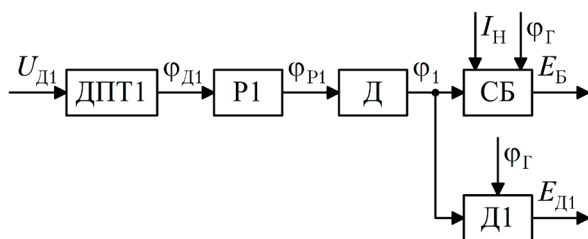


Рис. Г.11. Функциональная схема объекта регулирования для САР по координате  $\varphi_1$

На рис. Г.11 показана функциональная схема условного объекта регулирования для САР по координате  $\varphi_1$ , где: ДПТ1 – двигатель постоянного тока ЭП1; Р1 – редуктор ЭП1; Д – диск; СБ – солнечная батарея; Д1 – датчик контроля ЭДС батареи;  $U_{Д1}$  – напряжение на якоре двигателя;  $\varphi_{Д1}$  – угол поворота вала двигателя;  $\varphi_{Р1}$  – угол поворота выходного вала редуктора;  $\varphi_1 = \varphi_{Р1}$  – угол поворота диска;  $E_B$  – ЭДС батареи;  $E_{Д1}$  – ЭДС датчика;  $\varphi_{\Gamma}$  – угол поворота солнечной батареи, вызванный суточным вращением земли, – линейное возмущающее воздействие ( $\varphi_{\Gamma} = \omega_{\text{ЗЕМ}}t$ );  $I_H$  – ток нагрузки батареи (зарядный ток аккумулятора) – возмущающее воздействие.

В качестве датчиков Д1 и Д2 использованы преобразователи, представляющие собой миниатюрные солнечные батареи, подобные батарее СБ (рис. Г.9). Такой подход обоснован тем, что сигнал не критичен к изменениям нагрузки солнечной батареи – зарядного тока аккумулятора, на котором, при традиционной схеме ге-лиоэнергетической установки, работает солнечная батарея.

Все элементы функциональной схемы, за исключением электродвигателя, являются пропорциональными звеньями с соответствующими передаточными коэффициентами. Их обозначения приведены на структурной схеме (рис. Г.12).

Двигатель ДПТ1, к валу которого приведена инерционная масса диска Д (рис. Г.9) с учетом всех установленных на нем элементов, приближенно (без учета электрических переходных процессов в двигателе) описывается передаточной функцией инерционного интегрирующего звена [13]:

$$W_{\text{д1}}(s) = \frac{\varphi_{\text{д1}}(s)}{U_{\text{д1}}(s)} = \frac{k_{\text{д1}}}{s(T_{\text{д1}}s + 1)}, \quad (\text{Г.14})$$

где  $\varphi_{\text{д1}}(s)$ ,  $U_{\text{д1}}(s)$  – изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях соответственно угла поворота двигателя  $\varphi_{\text{д1}}$  и напряжения  $U_{\text{д1}}$ , подаваемого на якорь ДПТ1;  $k_{\text{д1}}$ ,  $T_{\text{д1}}$  – приведенные коэффициент передачи и постоянная времени, которые определяются по формулам приведения:

$$k_{\text{д1}} = \frac{k_{\text{ДПТ1}}}{\beta k_{\text{Р1}}} \quad \text{и} \quad T_{\text{д1}} = \frac{J_{\text{ДПТ1}} + J_{\text{Д}} k_{\text{Р1}}^2}{\beta k_{\text{Р1}}},$$

где  $k_{\text{ДПТ1}}$  – коэффициент передачи двигателя, рад/(с·В);

$k_{\text{Р1}}$  – коэффициент передачи редуктора Р1;

$\beta$  – коэффициент вязкого трения в подшипниках;

$J_{\text{ДПТ1}}$  и  $J_{\text{Д}}$  – момент инерции ДПТ1 и диска Д, кг·м<sup>2</sup>.

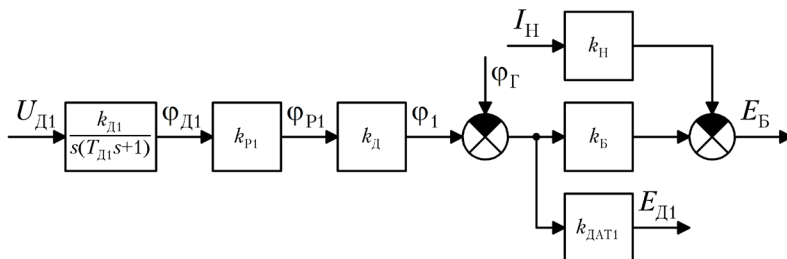


Рис. Г.12. Структурная модель условного объекта регулирования для САР по координате  $\varphi_1$

Числовые значения параметров структурной модели (рис. Г.12) для учебных целей приведены в табл. Г.7.

ЭДС солнечной батареи и датчика при холостом ходе (внешний контур разомкнут) при максимальной освещенности – соответственно 19,4 В и 1,94 В. Солнечная батарея предназначена для работы в гелиоэнергетической установке с 12-вольтовым аккумулятором.

Структурная модель условного объекта регулирования для САР по координате  $\varphi_2$  подобна модели по координате  $\varphi_1$ .

Таблица Г.7. Значения параметров структурной модели (рис. Г.12)

| Вариант | $k_{\text{ДПТ1}}$ , рад/(с·В) | $J_{\text{ДПТ1}}$ , кг·м <sup>2</sup> | $k_{\text{Р1}}$ | $J_{\text{Д}}$ , кг·м <sup>2</sup> | $\beta$ , Н·м·с/рад | $k_{\text{Д}}$ | $k_{\text{Б}}$ , рад/В | $k_{\text{Н}}$ , В/А | $k_{\text{ДАТ1}}$ , рад/В |
|---------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------|----------------|------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1       | 1,2                           | 0,003                                 | 0,00346         | 0,35                               | 1,5                 | 1              | 15                     | 2,0                  | 1,5                       |
| 2       | 1,0                           | 0,002                                 | 0,00346         | 0,45                               | 1,4                 | 1              | 15                     | 1,7                  | 1,5                       |
| 3       | 0,9                           | 0,004                                 | 0,00346         | 0,50                               | 1,3                 | 1              | 15                     | 1,8                  | 1,5                       |
| 4       | 0,6                           | 0,001                                 | 0,00346         | 0,25                               | 1,2                 | 1              | 15                     | 1,4                  | 1,5                       |



Таблица Г.7 (окончание)

| Вариант | $k_{дпт1},$<br>рад/(с·В) | $J_{дпт1},$<br>кг·м <sup>2</sup> | $k_{р1}$ | $J_{д},$<br>кг·м <sup>2</sup> | $\beta,$<br>Н·м·с/рад | $k_d$ | $k_B,$<br>рад/В | $k_H,$<br>В/А | $k_{дат1},$<br>рад/В |
|---------|--------------------------|----------------------------------|----------|-------------------------------|-----------------------|-------|-----------------|---------------|----------------------|
| 5       | 1,1                      | 0,003                            | 0,00346  | 0,20                          | 1,1                   | 1     | 15              | 2,2           | 1,5                  |
| 6       | 0,7                      | 0,002                            | 0,00346  | 0,15                          | 1,6                   | 1     | 15              | 1,6           | 1,5                  |
| 7       | 0,8                      | 0,005                            | 0,00346  | 0,30                          | 1,7                   | 1     | 15              | 2,3           | 1,5                  |
| 8       | 0,5                      | 0,006                            | 0,00346  | 0,40                          | 1,8                   | 1     | 15              | 3,0           | 1,5                  |
| 9       | 0,4                      | 0,004                            | 0,00346  | 0,55                          | 1,9                   | 1     | 15              | 2,4           | 1,5                  |
| 10      | 1,3                      | 0,002                            | 0,00346  | 0,60                          | 2,0                   | 1     | 15              | 1,0           | 1,5                  |

## Г.6. Силовой трансформатор как объект автоматического регулирования

В условиях эксплуатации и при ремонтах возникает необходимость сушить изоляцию обмоток силовых трансформаторов. Существует несколько методов сушки трансформаторов: от постороннего источника теплоты токовый метод и за счет индукционного нагрева бака трансформатора. Последний метод является наиболее распространенным, т. к. отличается сравнительной простотой и позволяет сушить изоляцию с любой степенью увлажнения. При его применении на бак трансформатора наматывают намагничивающую обмотку из изолированного провода (ее параметры определяют по специальной методике). Намагничивающую обмотку питают от источника переменного тока напряжением  $U = 100...220$  В. Нагревание изоляции обеспечивается за счет мощности, которая выделяется в баке трансформатора. Технология сушки изоляции трансформаторов требует, чтобы температура обмоток  $\theta$  в процессе сушки не превышала заданного значения, которое определяется классом изоляции ( $90...110$  °С). Регулируя величину выделяемой мощности посредством изменения напряжения  $U$  – регулирующего воздействия, температуру  $\theta$  поддерживают в заданных пределах. Основным возмущающим воздействием на процесс регулирования  $\theta$  являются изменения температуры  $\theta_0$  окружающей среды.

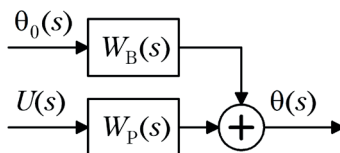


Рис. Г.13. Структурная схема трансформатора как объекта регулирования

Структурная схема трансформатора как объекта регулирования в режиме сушки изоляции показана на рис. Г.13.

Динамические свойства трансформатора в режиме сушки изоляции по каналу регулирующего  $U$  и возмущающего воздействия  $\theta_0$  соответствуют аperiodическому звену первого порядка с передаточными функциями следующего вида:

$$W_P(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{k_P}{T_O s + 1}; \quad (Г.15)$$

$$W_B(s) = \frac{\theta(s)}{\theta_0(s)} = \frac{k_B}{T_O s + 1}, \quad (Г.16)$$

где  $\theta(s)$ ,  $U(s)$ ,  $\theta_0(s)$  – изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях температуры  $\theta$ , напряжения  $U$  и температуры  $\theta_0$ ;

$k_P$ ,  $k_B$ ,  $T_O$  – передаточные коэффициенты и постоянная времени.

Ориентировочные данные параметров передаточных функций (Г.15) и (Г.16) для учебных расчетов приведены в табл. Г.8.

**Таблица Г.8. Значения параметров трансформаторов и передаточных функций (Г.15) и (Г.16)**

| Вариант | Мощность силового трансформатора, кВ·А | $k_P$ , °С/В | $k_B$ | $T_O$ , с |
|---------|----------------------------------------|--------------|-------|-----------|
| 1       | 100                                    | 1,500        | 0,8   | 1800      |
| 2       | 160                                    | 0,625        | 0,8   | 2100      |
| 3       | 400                                    | 0,250        | 0,8   | 3600      |
| 4       | 560                                    | 0,180        | 0,8   | 4200      |
| 5       | 630                                    | 0,158        | 0,8   | 5200      |

**Примечание:** на практике при сушке изоляции трансформаторов применяют релейные регуляторы температуры.

## Г.7. Электрический привод патрона токарного станка как объект автоматического регулирования

К автоматическим системам электроприводов металлорежущих станков, являющихся электромеханическими системами, с точки зрения качества процессов регулирования предъявляются повышенные требования. В связи с этим такие системы управления и регулирования проектируют на основе уточненных математических моделей, учитывающих как упругие свойства электромеханических систем, так и влияние вязкого трения на их динамические свойства.

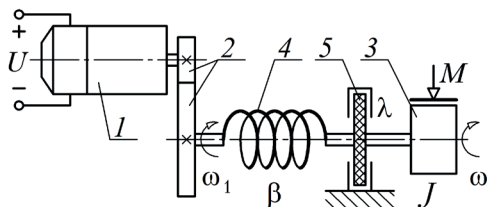


Рис. Г.14. Динамическая модель привода патрона

На рис. Г.14 представлена динамическая модель привода патрона токарного станка – объекта регулирования САР угловой скорости вращения [13], где: 1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – редуктор; 3 – патрон; 4 – упругое звено, отображающее упругие свойства системы; 5 – звено, учитывающее вязкое трение в подшипниках и редукторе;  $\omega$  – угловая скорость патрона – регулируемая величина;  $M$  – момент нагрузки – возмущающее воздействие;  $J$  – момент инерции патрона вместе с заготовкой;  $\lambda$  – коэффициент вязкого трения;  $\beta$  – крутильная жесткость;  $\omega_1$  – угловая скорость выходного вала редуктора;  $U$  – напряжение на якоре двигателя – регулирующее воздействие.

Структурная модель привода, построенная на основе динамической модели (рис. Г.14) [13], показана на рис. Г.15, где:  $k_D$  – коэффициент пропорциональности между напряжением  $U$  и моментом  $M_D$  двигателя;  $k_M$  – коэффициент наклона механической характеристики двигателя;  $k_p$  – коэффициент передачи редуктора;  $J_D$  – момент инерции двигателя;  $T_1, T_2$  – постоянные времени ( $T_1^2 = J/\beta$ ,  $T_2 = \lambda/\beta$ ).

Численные значения параметров модели привода для учебных целей приведены в табл. Г.9.

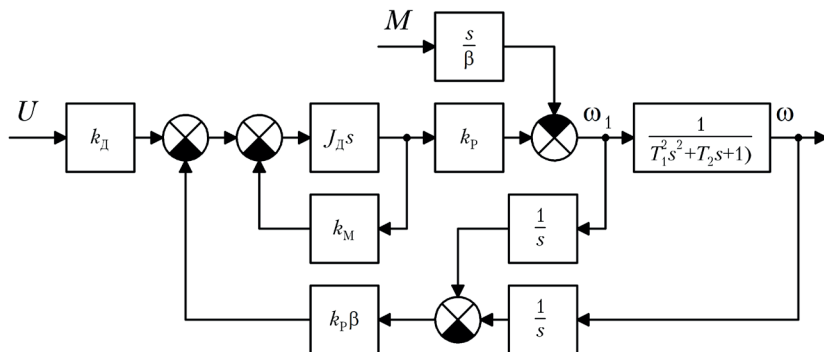


Рис. Г.15. Структурная модель привода патрона токарного станка

Таблица Г.9. Значения параметров структурной модели (рис. Г.15)

| Вариант | $k_d$ , Н-м/В | $k_M$ , Н-м-с/рад | $J_d$ , кг-м <sup>2</sup> | $k_p$ | $\beta$ , Н-м/рад | $\lambda$ , Н-м-с/рад | $M$ , Н-м |
|---------|---------------|-------------------|---------------------------|-------|-------------------|-----------------------|-----------|
| 1       | 0,50          | 0,63              | 0,004                     | 0,1   | 1000              | 0,15                  | 40        |
| 2       | 0,48          | 0,70              | 0,006                     | 0,2   | 500               | 0,17                  | 32        |
| 3       | 0,35          | 0,52              | 0,008                     | 0,3   | 740               | 0,09                  | 36        |
| 4       | 0,25          | 0,45              | 0,010                     | 0,4   | 600               | 0,11                  | 32        |
| 5       | 0,55          | 0,85              | 0,012                     | 0,5   | 520               | 0,19                  | 30        |
| 6       | 0,52          | 0,91              | 0,014                     | 0,3   | 860               | 0,12                  | 37        |
| 7       | 0,32          | 0,65              | 0,016                     | 0,1   | 960               | 0,14                  | 38        |
| 8       | 0,28          | 0,54              | 0,018                     | 0,2   | 640               | 0,13                  | 34        |
| 9       | 0,42          | 0,58              | 0,020                     | 0,3   | 1200              | 0,07                  | 45        |
| 10      | 0,30          | 0,43              | 0,022                     | 0,5   | 1100              | 0,09                  | 42        |

Привод обеспечивает регулирование скорости  $\omega$  от 8 до 30 рад/с. САР, разработанная на основе данной модели, должна обеспечивать стабилизацию скорости с точностью до 1 %.

## Г.8. Подогреватель мазута как объект автоматического регулирования

Подогреватель предназначен для предварительного разогрева мазута при сжигании в топках котлов. Он (рис. Г.16) состоит из бака 1, через входное отверстие 2 которого поступает мазут. С помощью насоса 3 подогретый мазут подают в систему форсунок котла. Мазут подогревает змеевик 4, в который поступает пар с температурой 250 °С и давлением 1,3 МПа. Как объект автоматического регулирования паровой подогреватель характеризуется регулируемой величиной – температурой  $\theta_M$ . Регулирование температуры в подогревателе осуществляют за счет подачи пара  $Q_P$ . Основным возмущением, вызывающим отклонение температуры, является расход мазута  $Q_{ВЫХ}$  на выходе.

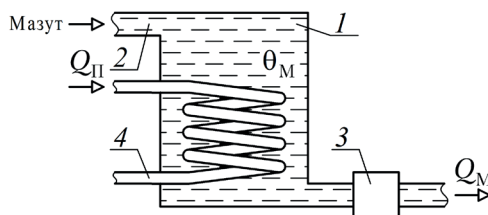


Рис. Г.16. Схема подогревателя мазута

Подогреватель мазута как объект регулирования является двухемкостным звеном: первая емкость (звено) – змеевик, вторая емкость (звено) – бак совместно с мазутом. Структурная схема подогревателя имеет вид, показанный на рис. Г.17.

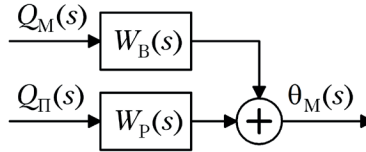


Рис. Г.17. Структурная схема подогревателя мазута

Передаточные функции соответственно по регулирующему и возмущающему воздействиям:

$$W_P(s) = \frac{\theta_M(s)}{Q_{\Pi}(s)} = \frac{k_P}{(T_3 s + 1)(T_B s + 1)}; \quad (\text{Г.17})$$

$$W_B(s) = \frac{\theta_M(s)}{Q_M(s)} = \frac{k_B}{T_B s + 1}, \quad (\text{Г.18})$$

где  $\theta_M(s)$ ,  $Q_{\Pi}(s)$ ,  $Q_M(s)$  – изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях соответственно температуры, расхода пара и расхода мазута;  
 $k_P$ ,  $k_B$ ,  $T_3$ ,  $T_B$ ,  $T_B$  – передаточные коэффициенты и постоянные времени.

Ориентировочные числовые значения параметров передаточных функций (Г.17) и (Г.18) для использования в учебных расчетах приведены в табл. Г.8. Температура мазута на выходе нагревателя  $125 \pm 2$  °С, расход мазута 0,65 кг/с.

Таблица Г.10. Значения параметров передаточных функций (Г.17) и (Г.18)

| Вариант | $k_P$ , °С·с/кг | $k_B$ , °С·с/кг | $T_3$ , с | $T_B$ , с | $T_B$ , с |
|---------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 1       | 120             | 8               | 1,00      | 10,0      | 8         |
| 2       | 100             | 6               | 0,50      | 8,0       | 7         |
| 3       | 130             | 7               | 0,80      | 9,0       | 9         |
| 4       | 110             | 5               | 0,95      | 6,0       | 5         |
| 5       | 90              | 9               | 0,70      | 7,2       | 6         |

## Г.9. Мармитная плита как объект автоматического регулирования

В общественном питании для подогрева готовой пищи на раздаче используют мармитные электрические плиты. Поверхность плиты подогревают электрическими нагревательными элементами. На поверхности плиты должна поддерживаться постоянная температура  $\theta$  в пределах 55...60 °С. Это достигается за счет изменения мощности, потребляемой нагревательными элементами, посредством изменения питающего напряжения  $U$ , которое является регулирующим воздействием (номинальное напряжение серийно выпускаемых мармитных плит  $U_H = 220$  В). Температура поверхности плиты зависит от степени ее загрузки  $M$  (от количества и массы емкостей с пищей, устанавливаемых на плиту) и от температуры в помещении  $\theta_0$ , которую можно рассматривать в качестве главного возмущения.

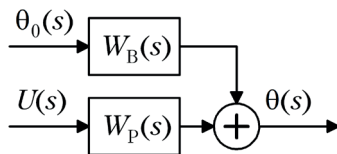


Рис. Г.18. Структурная схема мармитной плиты

Мармитная плита как объект регулирования (рис. Г.18) соответствует аperiодическому звену второго порядка. Передаточные функции плиты по регулируемому и возмущающему воздействиям соответственно следующие:

$$W_P(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{k_P}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}; \quad (\text{Г.19})$$

$$W_B(s) = \frac{\theta(s)}{\theta_0(s)} = \frac{k_B}{T_3 s + 1}, \quad (\text{Г.20})$$

где  $\theta(s)$ ,  $U(s)$ ,  $\theta_0(s)$  – изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях соответственно регулируемой величины  $\theta$ , регулирующего  $U$  и возмущающего  $\theta_0$  воздействий;  $k_P$ ,  $k_B$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – передаточные коэффициенты и постоянные времени.

При учебных расчетах значения параметров передаточных функций (Г.19) и (Г.20) можно принимать следующие:  $k_P = 0,4 \dots 0,5$  °C/В;  $k_B = 1$ ;  $T_1 = 60 \dots 80$  с;  $T_2 = 200 \dots 400$  с;  $T_3 = 250 \dots 450$  с.

## Г.10. Электрический вулканизатор как объект автоматического регулирования

Электрические вулканизаторы предназначены для ремонта наружных повреждений покрышек и камер.

Вулканизатор имеет чугунное литое основание, плиту с нагревательными элементами и винтовое прижимное устройство. Плита с электрическим нагревательным элементом закреплена на корпусе подвижно и с помощью винта прижимается к чугунному основанию. Между плитой и чугунным основанием закладывается ремонтируемый участок камеры или покрышки. Нагревательный элемент состоит из керамического каркаса и нихромовой спирали.

Технология вулканизации предусматривает стабилизацию температуры нагрева плиты  $\theta$ . Процесс регулирования температуры  $\theta$  обеспечивают посредством изменения величины напряжения  $U$  питания нагревательного элемента, которое является регулирующим воздействием. На температуру  $\theta$  оказывает также влияние температура окружающей среды  $\theta_0$ .

Структурная схема вулканизатора имеет вид, представленный на рис. Г.18. Динамические свойства вулканизатора можно описать передаточными функциями Г.18 и (Г.19) при следующих ориентировочных значениях их параметров:  $k_P = 0,2 \dots 0,4$  °C/В;  $k_B = 1$ ;  $T_1 = 40 \dots 50$  с;  $T_2 = 150 \dots 300$  с;  $T_3 = 180 \dots 320$  с.

# К моделированию САР с микроЭВМ

ПРИЛОЖЕНИЕ

Д

## Д.1. Принципы построения и работы САР с микроЭВМ

САР, являющиеся частным случаем САУ, в зависимости от задач автоматизации технологических процессов (ТП) могут применяться как автономно, так и входить в состав так называемых автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в виде локальных САР отдельных физических величин – технологических показателей (температуры, влажности, концентрации компонентов, линейных и угловых скоростей и т. д.).

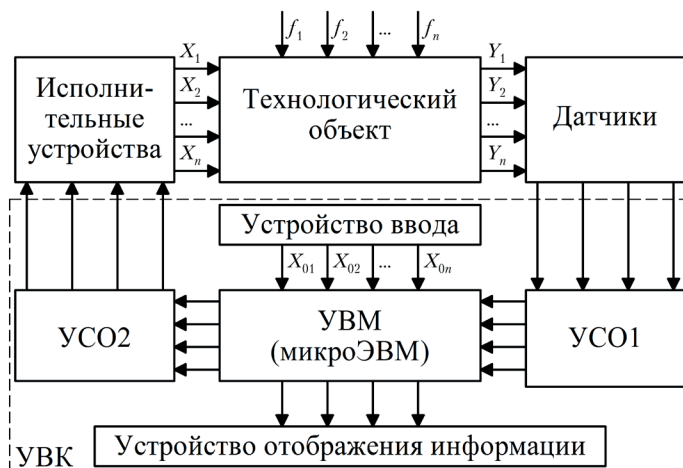


Рис. Д.1. Упрощенная функциональная схема одного из вариантов АСУ ТП:

$X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0n}$  – задающие воздействия;

$X_1, X_2, \dots, X_n$  – управляющие (регулирующие) воздействия;

$f_1, f_2, \dots, f_n$  – внешние возмущения;  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  – управляемые величины

АСУ ТП – это человеко-машинные системы, предназначенные для контроля режимов работы, сбора и обработки информации о протекании технологических процессов, а также для их управления. АСУ ТП (рис. Д.1) строят на основе комплекса микропроцессорных средств, образующих так называемый управляющий вычислительный комплекс (УВК), включающий в себя микроЭВМ (управляющую вычислительную машину – УВМ), устройства сопряжения (УСО) с технологическим объектом (ТО) и периферийные устройства [6, 10, 14]. В качестве основных составляющих УВК современных АСУ ТП используют микропроцессорные устройства трех типов:

- 1) **промышленные компьютеры** (некоторое подобие «офисных» компьютеров), предназначены для использования в качестве серверов (головных компьютеров). Они выполняют многообразные функции на верхнем уровне АСУ ТП, в том числе и функции регуляторов локальных САР;
- 2) **программируемые контроллеры** – более простые устройства с ограниченными функциональными возможностями. Их еще называют программируемыми логическими контроллерами (ПЛК), регулируемыми микроконтроллерами (ремиконтами) или просто микроконтроллерами. Они применяются на нижних уровнях АСУ ТП или автономно для непосредственного управления отдельными технологическими установками, аппаратами и агрегатами, в том числе и в автономных САР;
- 3) **микропроцессорные регуляторы с «жесткой логикой»**, сформированной программными средствами на стадии их проектирования и изготовления. Они могут использоваться в локальных системах регулирования на нижнем уровне АСУ ТП или в качестве регуляторов автономных САР.

АСУ ТП (рис. Д.1) работает следующим образом: управляемые величины (координаты)  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  воспринимаются датчиками, сигналы от которых через УСО1 подаются в УВМ, где программными средствами обрабатываются по требуемому для технологического объекта алгоритму; выходные сигналы УВМ через УСО2 и исполнительные устройства изменяют управляющие воздействия  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , изменяя состояние выходных величин  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  в соответствии с требованием технологического процесса.

Современные микроЭВМ, обладающие высоким быстродействием, позволяют в мультиплексорном режиме управлять технологическими объектами с большим количеством управляемых величин (координат) или группой объектов с помощью одного УВК. При этом он может совмещать как режимы логического управления, так и непосредственного регулирования, реализуя принцип работы замкнутых САУ – САР. В настоящем приложении, исходя из целевого назначения учебного пособия, рассматриваются вопросы применительно к САР с микроЭВМ (цифровым САР).

Как известно, в микроЭВМ информация обрабатывается в цифровой форме (в двоичных кодах), поэтому такие системы автоматического управления классифицируются как цифровые САР. Один контур регулирования системы с микроЭВМ можно рассматривать как отдельную одномерную САР (рис. Д.2),



где: УВК – управляющий вычислительный комплекс; АЦП1 – аналого-цифровой преобразователь для преобразования аналогового задающего воздействия  $X_0$  в дискретный двоичный сигнал  $\tilde{X}_0$ ; АЦП2 – аналого-цифровой преобразователь для преобразования аналогового сигнала датчика (воспринимающего органа)  $X_1$  в дискретный двоичный сигнал  $\tilde{X}_1$ ; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь для преобразования выходного дискретного двоичного сигнала микроЭВМ  $\tilde{X}_2$  в аналоговый сигнал  $X_2$ ; СО – виртуальный сравнивающий орган, отображающий функции микроЭВМ по сравнению дискретных сигналов; АБ – алгоритмический блок, отображающий функции микроЭВМ по реализации предписанного закона (алгоритма) регулирования.

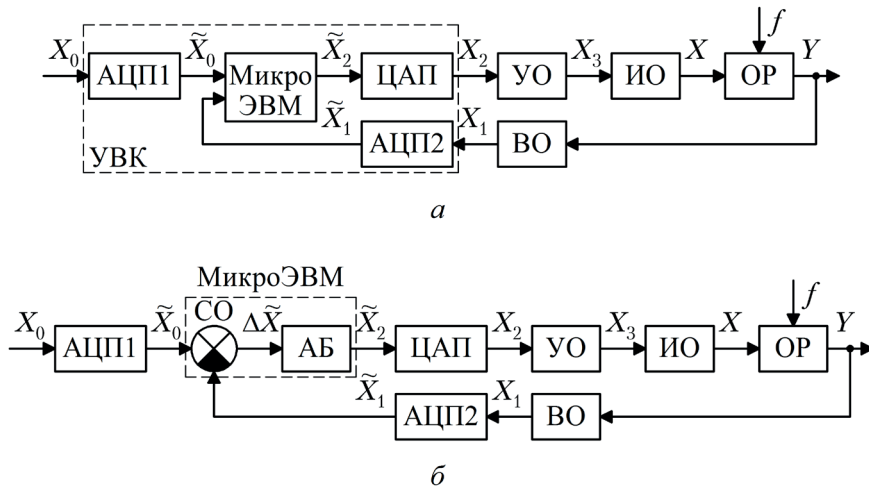


Рис. Д.2. Функциональные схемы САР с микроЭВМ в обобщенном (а) и развернутом (б) видах

Цифровая САР, помимо традиционных элементов, присущих непрерывной системе, содержит аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) кодируют аналоговые сигналы задающего воздействия  $X_0$  и сигналы обратной связи  $X_1$ . В результате такого кодирования на вход микроЭВМ, а точнее ее процессора, поступают цифровые представления в двоичном коде величин  $\tilde{X}_0$  и  $\tilde{X}_1$ .

Выходная величина  $\tilde{X}_2$  проходит через преобразователь двоичного кода в непрерывную аналоговую величину – цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и превращается в величину  $X_2$ , представляющую собой электрическое напряжение. Эта величина поступает затем на непрерывную часть системы, к которой относятся объект регулирования (ОР), воспринимающий орган (ВО), исполнительное устройство – исполнительный орган (ИО) и усилитель (УО).

В САР (рис. Д.2) задающий сигнал формируется за пределами УВК аппаратными средствами. В отличие от такого метода организации задающих сигналов

в цифровых САР, его можно формировать в самой микроЭВМ программным методом (рис. Д.3).

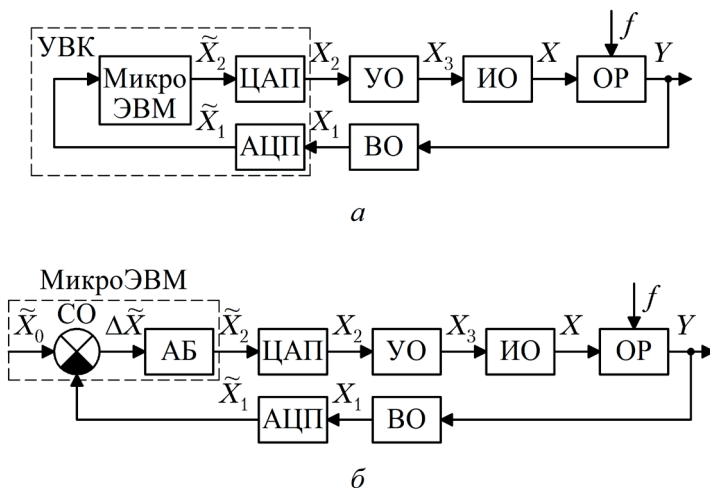


Рис. Д.3. Функциональные схемы САР с формированием задающего воздействия программными средствами (внутри микроЭВМ) в обобщенном (а) и развернутом (б) видах

Схему, показанную на рис. Д.2, применяют в САР, у которых задающее воздействие  $X_0$  представляет собой переменную величину. Такой случай имеет место в следящих системах. Для систем стабилизации и программных систем задающее воздействие целесообразно формировать непосредственно в микроЭВМ программными средствами (рис. Д.3). В таком случае из схемы САР (рис. Д.2) исключается АЦП1, что приводит к их упрощению.

Рассмотрим подробнее описанные принципы на примере одной из локальных автоматических систем АСУ ТП электрической станции.

АСУ ТП электрической станции должна обеспечивать дистанционное управление всеми агрегатами, дистанционный контроль их режимов работы, самоконтроль и сигнализацию о неисправностях, и выполняет целый ряд других функций, в том числе стабилизацию напряжения на зажимах синхронных генераторов, посредством локальной САР, роль регулятора в которой выполняет один из каналов микроЭВМ (см. рис. Д.4). Подобная система, выполненная на основе «жестких» аппаратных средств, рассмотрена в п. 2.1, рис. 2.2.

САР напряжения синхронного генератора является системой стабилизации. Поэтому ее реализацию на базе микроЭВМ целесообразно выполнить на основе схемы, показанной на рис. Д.3. В такой схеме микроЭВМ выполняет функции задающего и сравнивающего органов, вычисляя сигнал рассогласования  $\Delta U$  по формуле  $\Delta U = U_0 - U_3$ , где  $U_3$  – задающее воздействие, формируемое программным методом. В микроЭВМ программными средствами можно сформировать при не-

обходимости любой закон регулирования (*П-, ПД-, ПИ-, ПИД-закон регулирования*). Операции по вычислениям сигнала рассогласования и реализации закона регулирования в УВК обеспечивает микроЭВМ (рис. Д.5).

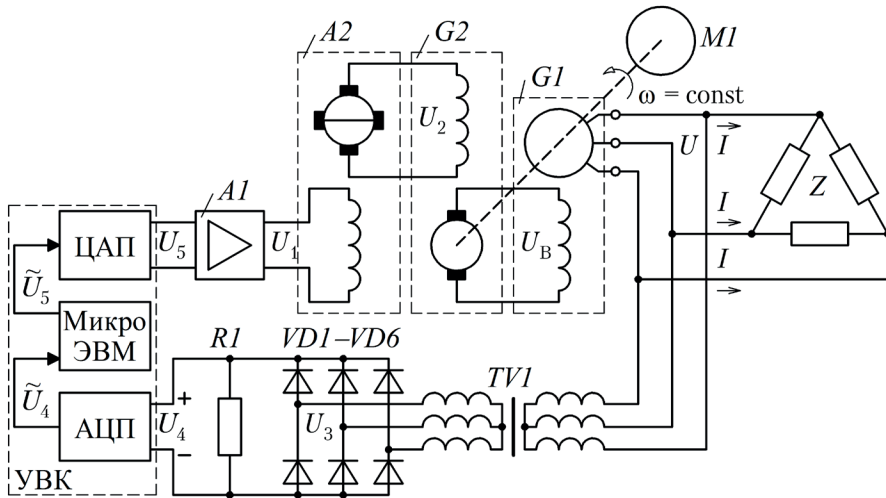


Рис. Д.4. Принципиальная схема цифровой САР напряжения генератора



Рис. Д.5. Функциональная схема цифровой САР напряжения генератора

Как отмечалось выше, наличие микроЭВМ в контуре регулирования САР обуславливает необходимость преобразования непрерывных сигналов в дискретные (в цифровую форму). Поэтому системы с микроЭВМ выделяют в особый класс так называемых дискретных САР, рассчитывать и исследовать которые непосредственно на основе математического аппарата непрерывных систем нельзя. Для их анализа и синтеза в теории автоматического регулирования разработаны методы, базирующиеся на основе математических методов описания дискретных систем, краткая сущность которых рассмотрена в следующем разделе.

## Д.2. Математическое описание дискретных систем автоматического регулирования

### Д.2.1. Понятие импульсной и цифровой систем

Под дискретными понимают САР, в которых содержится хотя бы один элемент, преобразующий входной сигнал в дискретную форму, т. е. в сигнал, появляющийся через определенные промежутки времени. К таким системам относятся импульсные и цифровые САР.

**Импульсными САР** называют системы, содержащие импульсный элемент, который преобразует поступающий на него непрерывный (аналоговый) сигнал в последовательность модулированных импульсов.

**Цифровыми САР** называют системы, в которых имеется участок, по которому информация передается в цифровой форме. В состав таких систем, как правило, входят микроЭВМ, обрабатывающие цифровую информацию. В отличие от непрерывных САР, в которых внутренняя информация передается только в виде непрерывных сигналов (рис. Д.6а), в импульсных САР имеются цепи, по которым информация перемещается в форме импульсов, следующих через определенный интервал времени  $T$  (рис. Д.6б), а в цифровых САР – при помощи двоичных кодов (чисел) (рис. Д.6в).

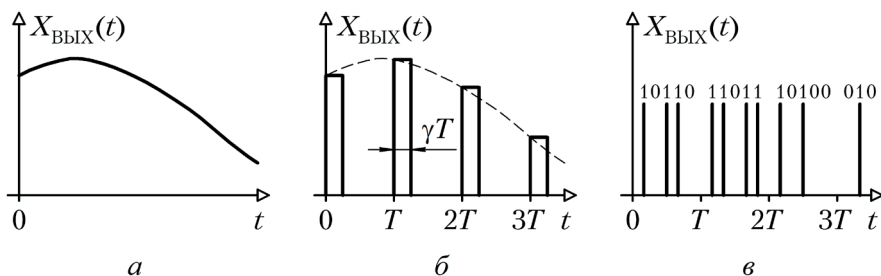


Рис. Д.6. Графики выходных сигналов: аналогового (а), импульсного (б) и цифрового (в) элементов

Рассмотрим особенности импульсных и цифровых САР.

Импульсные системы обеспечивают несколько меньшую точность, чем непрерывные системы, т. к. вследствие периодических размыканий цепи регулирования происходит потеря некоторой части информации о ходе процесса. Если время между началами следующих друг за другом импульсов  $T$  (рис. Д.6б) принять большим, по сравнению со временем существенных изменений управляемой величины, то импульсная система станет вообще неработоспособной. Однако в конкретных условиях время  $T$  может быть выбрано таким, чтобы заметной потери информации не происходило и обеспечивалась требуемая точность регулирования.

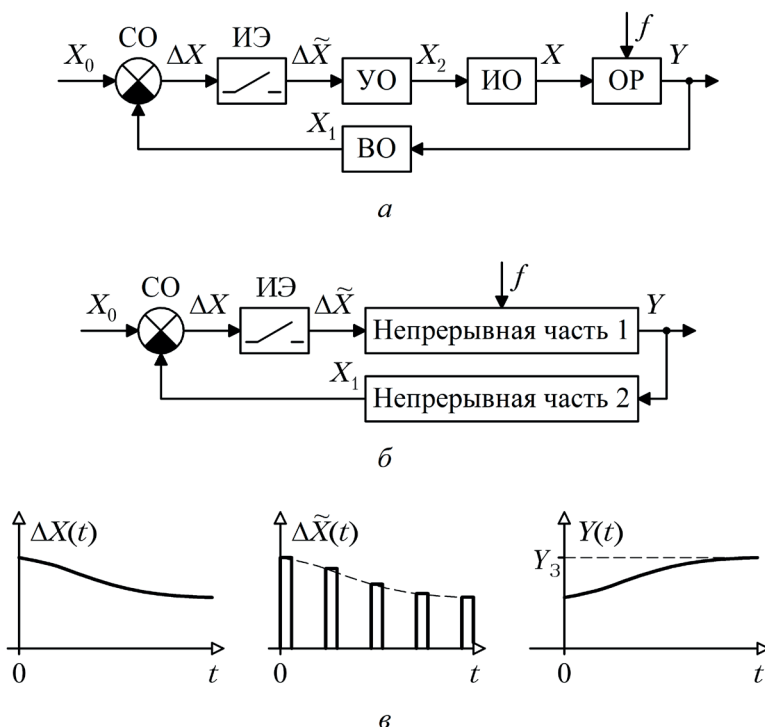


Рис. Д.7. Функциональные схемы импульсной САР:  
*а* – исходная; *б* – приведенная; *в* – сигналы в САР

Импульсные САР обладают некоторыми существенными достоинствами, по сравнению с непрерывными, так, к примеру, в случае необходимости передачи управляющих сигналов на расстояние их выгодно преобразовывать в импульсную форму для уменьшения искажающего влияния помех и при необходимости передачи по одному каналу нескольких сигналов. Импульсные системы чаще применяются для регулирования медленно меняющихся процессов (регулирования температуры, давления и т. д.).

В импульсных САР (рис. Д.7) пропорциональное отклонение регулируемой величины от заданного значения (сигнал рассогласования) передается в промежутках времени, когда существуют импульсы, т. е. когда система замкнута. В интервалах между импульсами система работает как разомкнутая. В процессе работы САР импульсный элемент ИЭ дает на выходе последовательность импульсов, которая после прохождения через непрерывную часть 1, вследствие ее сглаживающих свойств, преобразуется в непрерывный сигнал. Последний через обратную связь (непрерывную часть 2) и сравнивающий орган воздействует на импульсный элемент.

В качестве импульсных элементов в импульсных САР применяют различного рода прерыватели (электромеханические, электронные и др.).

В цифровых системах, к которым, как отмечалось выше, относят САР с микроЭВМ (рис. Д.2, Д.3), преобразование непрерывного сигнала в дискретный осуществляется при помощи двоичных кодов (чисел) (рис. Д.6в). Таким образом, исходную функциональную схему САР к показанному на рис. Д.5 примеру можно заменить приведенной схемой, в которой дискретность ввода и вывода двоичных кодов соответственно в микроЭВМ и из нее обеспечивают импульсные элементы ИЭ1 и ИЭ2 (рис. Д.8).

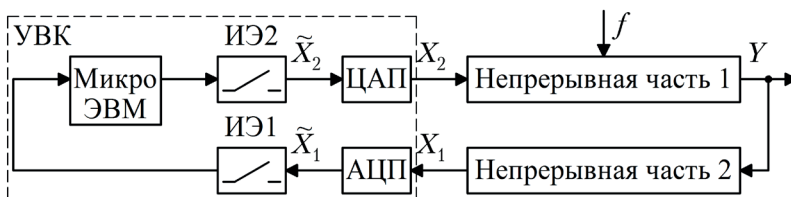


Рис. Д.8. Приведенная функциональная схема цифровой САР с микроЭВМ

В САР, приведенной на рис. Д.8, АЦП преобразует аналоговый сигнал датчика (воспринимающего органа)  $X_1$  в дискретный двоичный сигнал  $\tilde{X}_1$ , а ЦАП – дискретный двоичный сигнал  $\tilde{X}_2$  в аналоговый сигнал  $X_2$ .

## Д.2.2. Математическое описание импульсных систем

Любую импульсную САР, в том числе и показанную на рис. Д.7, без учета внешнего возмущения  $f$  можно представить в виде совокупности одной непрерывной части (НЧ) и импульсного элемента (ИЭ) (рис. Д.9).

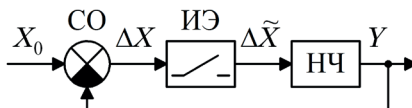


Рис. Д.9. Один из вариантов обобщенной функциональной схемы импульсной САР

В данной системе импульсный элемент включен в канал прямой связи последовательно с непрерывной частью и играет роль амплитудно-импульсного модулятора. Процесс модуляции состоит в преобразовании непрерывного сигнала  $\Delta X$  в последовательность прямоугольных импульсов с определенным коэффициентом заполнения  $\gamma$  (рис. Д.10).

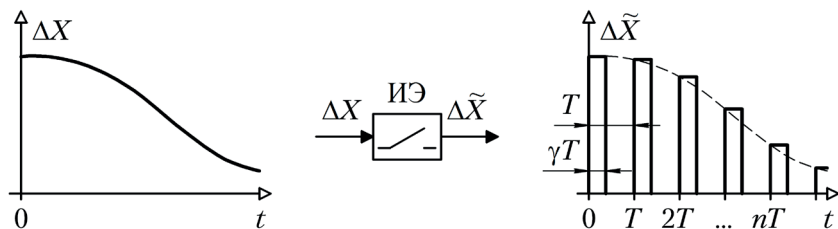


Рис. Д.10. Амплитудно-импульсная модуляция непрерывного сигнала

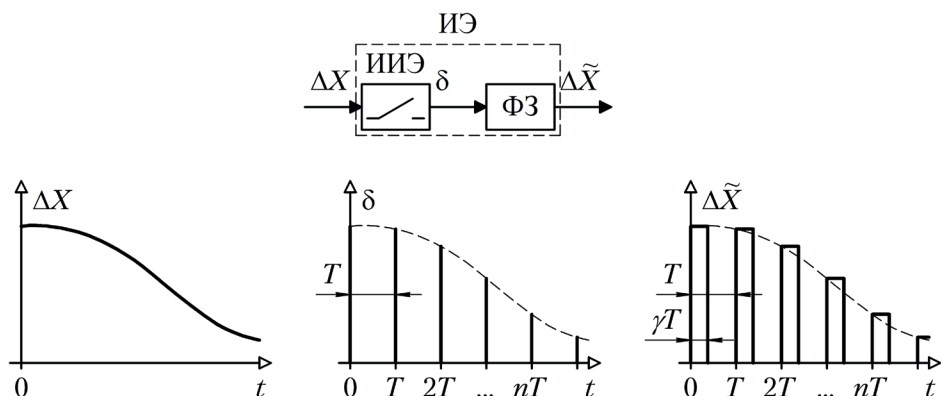


Рис. Д.11. Интерпретация процесса модуляции непрерывного сигнала импульсным элементом

Для упрощения исследования импульсных САР реальный импульсный элемент ИЭ представляют в виде двух частей (рис. Д.11): идеального импульсного элемента (ИИЭ) и формирующего звена (ФЗ). Идеальный импульсный элемент в виде ключа преобразует непрерывную величину  $\Delta X$  в последовательность импульсов, следующих друг за другом через равные интервалы дискретности  $T$ , максимальные значения ординат которых представляют так называемую решетчатую функцию. Формирующее звено преобразует каждый идеальный импульс в прямоугольный импульс длительностью  $\gamma T$  ( $0 < \gamma < 1$ ). Звено, формирующее такие импульсы, описывается передаточной функцией

$$W_{\Phi}(s) = \frac{1 - e^{-s\gamma T}}{s}. \quad (\text{Д.1})$$

В общем случае формирующее звено (Д.1) при различных значениях  $\gamma$  ( $0 < \gamma < 1$ ) называют фиксатором, или экстраполятором. Если  $\gamma = 1$ , то выходной сигнал импульсного элемента имеет вид, показанный на рис. Д.12. В таком случае передаточная функция формирующего звена (Д.1) примет вид:

$$W_{\Phi}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s}. \quad (\text{Д.2})$$

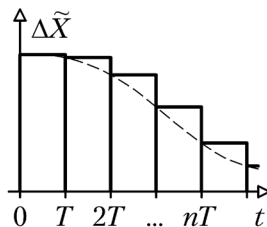


Рис. Д.12. Выходной сигнал фиксатора (экстраполятора) нулевого порядка

Формирующее звено с передаточной функцией (Д.2) называют фиксатором, или экстраполятором, нулевого порядка. Оно относится к линейным звеньям и является стандартным для импульсного элемента, реализующего амплитудно-импульсную модуляцию (АИМ). При исследованиях импульсных систем формирующее звено относят к непрерывной части и общую передаточную функцию приведенной непрерывной части (ПНЧ) определяют как

$$W_{\text{ПНЧ}}(s) = W_{\Phi}(s) W_{\text{НЧ}}(s), \quad (\text{Д.3})$$

где  $W_{\text{НЧ}}(s)$  – передаточная функция непрерывной части системы.

Как отмечалось выше, непосредственно исследовать импульсные САР на основе обычного аппарата передаточных функций, используемого в теории непрерывных систем, нельзя. Для их исследования разработан ряд методов [6, 8–10, 14, 15]. В их основу положены понятия дискретных передаточных функций, которые определяют с помощью дискретного преобразования Лапласа.

Известны две разновидности дискретного преобразования Лапласа – D-преобразование и Z-преобразование. В настоящем пособии рассматривается последнее, поскольку на его основе аналитические выражения передаточных функций получаются более простыми. Сущность Z-преобразования следующая.

Пусть имеются непрерывная функция времени  $f(t)$  и соответствующая ей решетчатая функция  $f(n, T)$ , значения которой определены через интервал  $T$  (рис. Д.13).

Как известно, непрерывную функцию времени можно представить в виде изображения с помощью прямого интегрального преобразования Лапласа

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt, \quad (\text{Д.4})$$

где  $L$  – символ преобразования Лапласа;

$f(t)$  – функция вещественной переменной  $t$  (времени);

$F(s)$  – изображение функции  $f(t)$ ;

$s$  – комплексная переменная.



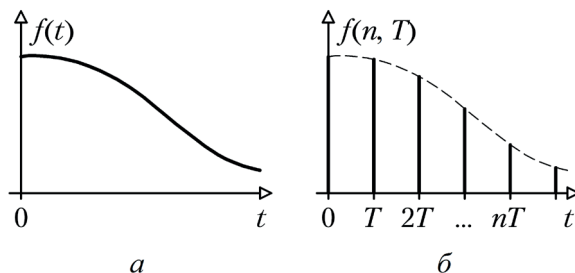


Рис. Д.13. Графики непрерывной (а) и решетчатой (б) функций времени

Если в формулу (Д.4) подставить конечный интервал времени  $\Delta t = T$  и текущее время выразить как  $t = nT$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  – порядковый номер дискрета, то интеграл (Д.4) можно заменить суммой:

$$\tilde{F}(s) = \sum_{n=0}^{n=\infty} f(nT)e^{-snT}T \quad \text{или} \quad \tilde{F}(s) = T \sum_{n=0}^{n=\infty} f(nT)e^{-snT}. \quad (\text{Д.5})$$

После введения обозначения  $e^{sT} = z$  дискретное преобразование Лапласа (Д.5) примет вид:

$$\tilde{F}(s) = T \sum_{n=0}^{n=\infty} f(nT)z^{-n}. \quad (\text{Д.6})$$

Второй сомножитель правой части выражения (Д.6) называют односторонним Z-преобразованием импульсной функции и обозначают как

$$Z[f(nT)] = F(z) = \sum_{n=0}^{n=\infty} f(nT)z^{-n}. \quad (\text{Д.7})$$

На основе этого выражения составлены таблицы Z-преобразований различных функций, которые приводятся в справочной литературе. Отдельные из них помещены в табл. Д.1.

**Таблица Д.1. Преобразования Лапласа  $F(s)$  и  $F(z)$  некоторых функций**

| $f(t)$              | $F(s)$                    | $F(z)$                                              |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|
| $1(t)$              | $\frac{1}{s}$             | $\frac{z}{z-1}$                                     |
| $t$                 | $\frac{1}{s^2}$           | $\frac{Tz}{(z-1)^2}$                                |
| $t^2$               | $\frac{1}{s^3}$           | $\frac{T^2 z(z+1)}{(z-1)^3}$                        |
| $e^{-\alpha t}$     | $\frac{1}{s+\alpha}$      | $\frac{z}{z-e^{-\alpha T}}$                         |
| $1 - e^{-\alpha t}$ | $\frac{1}{s(1+\alpha s)}$ | $\frac{(1-e^{-\alpha T})z}{(z-1)(z-e^{-\alpha T})}$ |

Z-преобразование (Д.7) дает возможность находить дискретные передаточные функции импульсных САР по аналогии с передаточными функциями непрерывных систем как

$$W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}, \quad (\text{Д.8})$$

где  $W(z)$  – дискретная передаточная функция (элемента, звена разомкнутой системы);  $Y(z)$ ,  $X(z)$  – Z-преобразование соответственно выходной и входной величин при нулевых начальных условиях.

Если известны передаточные функции элементов и звеньев, входящих в непрерывную часть импульсной САР, то на их основе можно достаточно просто определять их дискретные передаточные функции, используя формальную запись [8]:

$$W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = Z[W(s)]. \quad (\text{Д.9})$$

Поясним изложенное выше на следующем примере.

**Пример.** Необходимо найти дискретную передаточную функцию апериодического звена первого порядка с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{k}{T_0 s + 1}, \quad (\text{Д.10})$$

входящего в импульсную САР с интервалом дискретности  $T$ .

Для нахождения дискретной передаточной функции воспользуемся формулой (Д.9) и запишем ее как

$$W(z) = Z[W(s)]. \quad (\text{Д.11})$$

Приведем передаточную функцию (Д.10) к табличному виду (табл. Д.1):

$$W(s) = \frac{k}{T_0 s + 1} = \frac{k}{T_0} \left( \frac{1}{s + \alpha} \right), \text{ где } \alpha = \frac{1}{T_0}. \quad (\text{Д.12})$$

В передаточной функции (Д.12) выражению в квадратных скобках, согласно табл. Д.1, соответствует дискретное Z-преобразование следующего вида:

$$Z\left(\frac{1}{s + \alpha}\right) = \frac{z}{z - e^{-\alpha T}} = \frac{z}{z - e^{-T/T_0}}.$$

С учетом последнего выражения искомая дискретная передаточная функция (Д.11) запишется как

$$W(z) = \frac{k}{T_0} \frac{z}{z - e^{-T/T_0}}.$$

С помощью Z-преобразования (Д.7) для большинства передаточных функций, используемых в непрерывных системах, определены их дискретные передаточные функции, которые приводятся в справочной литературе. Ниже в табл. Д.2 в качестве примера даны некоторые передаточные функции  $W(s)$  и их дискретные аналоги  $W(z)$  [15].

**Таблица Д.2.** Передаточные функции  $W(s)$  и  $W(z)$

| №<br>п/п | $W(s)$                                  | $W(z)$                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | $k$                                     | $k$                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 2        | $\frac{k}{s}$                           | $\frac{kz}{z-1}$                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 3        | $\frac{k}{s^2}$                         | $\frac{kTz}{(z-1)^2}$                                                                                                                                                                                                                                                |
| 4        | $\frac{k}{T_0s+1}$                      | $\frac{k}{T_0} \frac{z}{z-e^{-T/T_0}}$                                                                                                                                                                                                                               |
| 5        | $\frac{k}{s(T_0s+1)}$                   | $\frac{k(1-e^{-T/T_0})z}{(z-1)(z-e^{-T/T_0})}$                                                                                                                                                                                                                       |
| 6        | $\frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$            | $\frac{k(e^{-T/T_1}-e^{-T/T_2})}{T_1-T_2} \frac{z}{(z-e^{-T/T_1})(z-e^{-T/T_2})}$                                                                                                                                                                                    |
| 7        | $\frac{k}{(T_0s+1)^2}$                  | $\frac{kTe^{-T/T_0}}{T_0^2} \frac{z}{(z-e^{-T/T_0})^2}$                                                                                                                                                                                                              |
| 8        | $\frac{k}{s^2(T_0s+1)}$                 | $k \left[ \frac{Tz}{(z-1)^2} - \frac{T_0(1-e^{-T/T_0})z}{(z-1)(z-e^{-T/T_0})} \right]$                                                                                                                                                                               |
| 9        | $\frac{k}{s(T_1s+1)(T_2s+1)}$           | $k \left[ \frac{z}{z-1} + \frac{T_1}{T_2-T_1} \frac{z}{z-e^{-T/T_1}} - \frac{T}{T_2-T} \frac{z}{z-e^{-T/T_2}} \right]$                                                                                                                                               |
| 10       | $\frac{k}{s^2(T_1s+1)(T_2s+1)}$         | $k \left[ \frac{Tz}{(z-1)^2} - \frac{(T_1+T_2)z}{z-1} - \frac{T_1^2}{T_2-T_1} \frac{z}{z-e^{-T/T_1}} + \frac{T_2^2}{T_2-T_1} \frac{z}{z-e^{-T/T_2}} \right]$                                                                                                         |
| 11       | $\frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)}$    | $k \left[ \frac{T_1}{(T_1-T_2)(T_1-T_3)} \frac{z}{z-e^{-T/T_1}} + \frac{T_2}{(T_2-T_1)(T_2-T_3)} \times \right. \\ \left. \times \frac{z}{z-e^{-T/T_2}} + \frac{T_3}{(T_3-T_1)(T_3-T_2)} \frac{z}{z-e^{-T/T_3}} \right]$                                             |
| 12       | $\frac{k}{s(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)}$   | $k \left[ \frac{z}{z-1} - \frac{T_1^2}{(T_1-T_2)(T_1-T_3)} \frac{z}{z-e^{-T/T_1}} - \right. \\ \left. - \frac{T_2^2}{(T_2-T_1)(T_2-T_3)} \frac{z}{z-e^{-T/T_2}} - \right. \\ \left. - \frac{T_3^2}{(T_3-T_1)(T_3-T_2)} \frac{z}{z-e^{-T/T_3}} \right]$               |
| 13       | $\frac{k}{s^2(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)}$ | $k \left[ \frac{Tz}{(z-1)^2} - \frac{(T_1+T_2+T_3)z}{z-1} + \frac{T_1^3}{(T_1-T_2)(T_1-T_3)} \frac{z}{z-e^{-T/T_1}} + \right. \\ \left. + \frac{T_2^3}{(T_2-T_1)(T_2-T_3)} \frac{z}{z-e^{-T/T_2}} + \frac{T_3^3}{(T_3-T_1)(T_3-T_2)} \frac{z}{z-e^{-T/T_3}} \right]$ |
| 14       | $\frac{k(T_0s+1)}{s}$                   | $\frac{k(T_0+1)[z-T_0/(T_0-1)]}{(z-1)^2}$                                                                                                                                                                                                                            |

Таблица Д.2 (окончание)

| № п/п | $W(s)$                                        | $W(z)$                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15    | $\frac{k(T_0s+1)}{s^2}$                       | $\frac{kT_0z(z+T/T_0-1)}{(z-1)^2}$                                                                                                                                                                                                                                          |
| 16    | $\frac{k(T_1s+1)}{T_2s+1}$                    | $\frac{k}{T_2} \left[ T_1 + \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \frac{z}{z - e^{-T/T_2}} \right]$                                                                                                                                                                            |
| 17    | $\frac{k(T_1s+1)}{s(T_2s+1)}$                 | $\frac{kT_1}{T_2} \frac{z \left[ z + T_1/T_2 (1 - e^{-T/T_2}) - 1 \right]}{(z-1)(z - e^{-T/T_2})}$                                                                                                                                                                          |
| 18    | $\frac{k(T_3s+1)}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$          | $\frac{k}{T_1 - T_2} \left[ \frac{(1 - T_3/T_1)z}{z - e^{-T/T_1}} + \frac{(T_3/T_2 - 1)z}{z - e^{-T/T_2}} \right]$                                                                                                                                                          |
| 19    | $\frac{k(T_3s+1)}{s(T_1s+1)(T_2s+1)}$         | $k \left[ \frac{z}{z-1} + \frac{(T_1 - T_3)z}{(T_2 - T_1)(z - e^{-T/T_1})} + \frac{(T_2 - T_3)z}{(T_1 - T_2)(z - e^{-T/T_2})} \right]$                                                                                                                                      |
| 20    | $\frac{k(T_1s+1)}{s^2(T_2s+1)}$               | $k \left[ \frac{Tz}{(z-1)^2} + \frac{(T_1 - T_2)(1 - e^{-T/T_1})z}{(z-1)(z - e^{-T/T_1})} \right]$                                                                                                                                                                          |
| 21    | $\frac{k(T_3s+1)}{s^2(T_1s+1)(T_2s+1)}$       | $k \left[ \frac{Tz}{(z-1)^2} + \frac{(T_3 - T_1 - T_2)z}{z-1} - \frac{(T_1 - T_3)z}{(T_2/T_1 - 1)(z - e^{-T/T_1})} - \frac{(T_2 - T_3)z}{(T_2/T_1 - 1)(z - e^{-T/T_2})} \right]$                                                                                            |
| 22    | $\frac{k}{T_1^2s + 2\xi T_1s + 1}$            | $\frac{kze^{-\xi T/T_1} \sin \omega}{T_1 \sqrt{1-\xi^2} \left[ z^2 - 2ze^{-\xi T/T_1} \cos \omega + e^{-2\xi T/T_1} \right]},$<br>где $\omega = T/T_1 \sqrt{1-\xi^2}$                                                                                                       |
| 23    | $\frac{k}{s(T_1^2s + 2\xi T_1s + 1)}$         | $k \left[ \frac{z}{z-1} - \frac{z^2 - ze^{-\xi T/T_1} \sec \varphi \cos(\omega + \varphi)}{z^2 - 2ze^{-\xi T/T_1} \cos \omega + e^{-2\xi T/T_1}} \right],$<br>где $\varphi = \arctg \left( -\xi / \sqrt{1-\xi^2} \right), \omega = T/T_1 \sqrt{1-\xi^2}$                    |
| 24    | $\frac{k(T_2s+1)}{T_1^2s + 2\xi T_1s + 1}$    | $\frac{kT_2}{T_1^2} \frac{z \left[ z - e^{-\xi T_2/T_1} \left( \cos \omega + \frac{T_2/T_1 - \xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega \right) \right]}{z^2 - 2ze^{-\xi T_2/T_1} \cos \omega + e^{-2\xi T_2/T_1}},$<br>где $\omega = T_2/T_1 \sqrt{1-\xi^2}$                         |
| 25    | $\frac{k(T_2s+1)}{s(T_1^2s + 2\xi T_1s + 1)}$ | $k \left[ \frac{z}{z-1} - \frac{z^2 - ze^{-\xi T_2/T_1} \sec \varphi \cos(\omega + \varphi)}{z^2 - 2ze^{-\xi T_2/T_1} \cos \omega + e^{-2\xi T_2/T_1}} \right],$<br>где $\omega = T_2/T_1 \sqrt{1-\xi^2}, \varphi = \arctg \left[ (T_2/T_1 - \xi) / \sqrt{1-\xi^2} \right]$ |

В теории и практике дискретных САР есть и другой метод определения дискретных передаточных функций  $W(z)$  [7–9], отличающийся простотой, по сравне-

нию с рассмотренным выше методом на основе Z-преобразования (Д.7). Его сущность состоит в следующем: в аналоговой передаточной функции  $W(s)$  символ  $s$  (его отождествляют с оператором дифференцирования) заменяется аппроксимацией производной при ее численном определении. Вид этой аппроксимации зависит от численного метода интегрирования:

- при использовании метода прямой (метода Эйлера) такая аппроксимация имеет вид  $\frac{z-1}{Tz}$ ;
- при использовании метода трапеции (метода Тустена) аппроксимация имеет вид  $\frac{z(z-1)}{T(z+1)}$ .

То есть в первом случае замену символа  $s$  проводят с помощью преобразования Эйлера

$$s = \frac{z-1}{Tz}, \quad (\text{Д.13})$$

во втором случае – с помощью преобразования Тустена

$$s = \frac{z(z-1)}{T(z+1)}. \quad (\text{Д.14})$$

Математический аппарат передаточных функций импульсных САР позволяет находить их математические модели в виде структурных схем, принципы построения которых аналогичны известным принципам, используемым в теории непрерывных автоматических систем. Так, например, для импульсной САР (рис. Д.9) структурная схема имеет вид, показанный на рис. Д.14, где: 1, 2 – звенья, соответствующие непрерывной части системы и формирующему звену; 3 – идеальное импульсное звено.

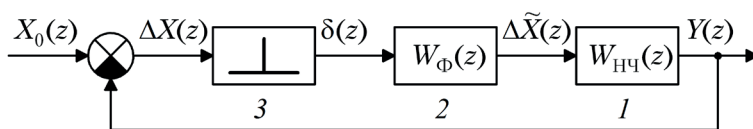


Рис. Д.14. Структурная схема импульсной САР

Импульсные САР с АИМ являются линейными автоматическими системами.

### Д.2.3. Математическое описание цифровых систем

В цифровых системах, к которым относятся САР с микроЭВМ, к квантованию сигнала по времени добавляется еще его квантование по уровню. Такое преобразование обеспечивает АЦП (рис. Д.8). Поясним его суть на примере трансформации непрерывного сигнала  $X_1(t)$  при его прохождении через АЦП (рис. Д.15).

АЦП выполняет две операции: квантование входного сигнала по времени и по уровню. Функционально, не вдаваясь в сущность электронной схемы АЦП, его работу можно представить следующим образом. Квантование по времени дости-

гается тем, что входной сигнал  $X_1(t)$  воспринимается преобразователем только в дискретные моменты времени  $t = nT$  (где  $n = 0, 1, 2, \dots$ ). В результате этого непрерывный сигнал  $X_1(t)$  превращается в решетчатую функцию  $X_1(nT)$  (рис. Д.15), каждый дискрет которой является непрерывной величиной.

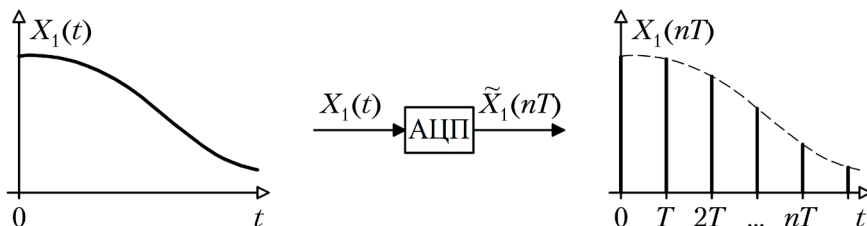


Рис. Д.15. Первый этап преобразования входного сигнала АЦП

На втором этапе последовательность непрерывных величин  $X_1(nT)$  квантованием по уровню преобразуется в соответствующую последовательность целочисленных элементов  $\tilde{X}_1(nT)$ . Это достигается за счет статической характеристики АЦП, показанной на рис. Д.16.

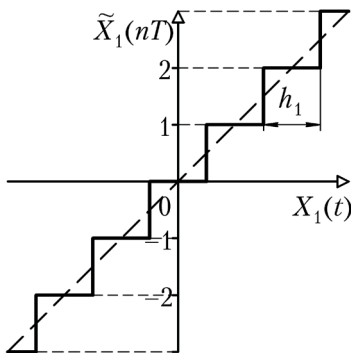


Рис. Д.16. Статическая характеристика АЦП:  
по оси  $\tilde{X}_1(nT)$  отображены три разряда [десятичным значениям 1, 2, 3  
соответствуют двоичные (бинарные) числа (коды) 001, 010, 011]

На рис. Д.16 ось абсцисс отображает непрерывные значения  $X_1(t)$ , а ось ординат – их цифровые представления (числа)  $\tilde{X}_1(nT)$ , получаемые на выходе преобразователя. Эти числа даны в десятичной системе счисления. Величину  $h_1$ , определяющую интервал квантования входного сигнала по уровню, называют интервалом дискретности. Она соответствует величине единиц младшего разряда цифрового представления входного сигнала преобразователя. Такая процедура преобразования сигналов в АЦП именуется импульсно-кодовой модуляцией.

Статическая характеристика АЦП (рис. Д.16) является нелинейной (релейной). Для упрощения исследований цифровых систем статическую характеристику линеаризуют, используя следующий упрощенный метод. Его сущность состоит в замене ступенчатой характеристики усредненной линейной зависимостью. На рис. Д.16 линеаризованная статическая характеристика показана пунктиром. Точность такой аппроксимации возрастает с увеличением разрядности преобразователей. В этой связи уместно подчеркнуть, что современные АЦП обеспечивают достаточно высокую разрядность кодирования сигналов (например, в преобразователях 8–14 двоичным разрядам соответствуют 255–16 383 уровня). Такая линеаризация позволяет пренебречь нелинейным эффектом квантования по уровню и интерпретировать АЦП пропорциональным звеном с коэффициентами передачи:

$$k_{\text{АЦП}} = \frac{1}{h_1}. \quad (\text{Д.15})$$

Величина  $h_1$  определяется выражением

$$h_1 = \frac{U_{\text{ВХmax}}}{2^{\alpha_1} - 1},$$

где  $U_{\text{ВХmax}}$  – паспортное максимальное значение входного напряжения АЦП, соответствующее его насыщению, В;

$\alpha_1$  – число двоичных разрядов АЦП (без учета знакового разряда).

Передаточная функция АЦП:

$$W_{\text{АЦП}}(s) = k_{\text{АЦП}}, \quad (\text{Д.16})$$

а его структурная схема показана на рис. Д.17.

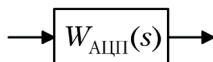


Рис. Д.17. Структурная схема АЦП

Цифровые (двоичные) коды с выхода АЦП пересылаются в процессор микроЭВМ, где выполняются вычисления сигнала рассогласования и расчеты в соответствии с алгоритмом управления. С точки зрения статических свойств микроЭВМ ее принято представлять пропорциональным звеном с единичным коэффициентом передачи. Что касается динамических свойств микроЭВМ, то они в каждом конкретном случае будут определяться предписанными алгоритмами управления. В качестве таких алгоритмов могут применяться как простые типовые законы управления (*П-, И-, ПИ-, ПИД-законы*), так и любые сложные, в том числе и нелинейные.

Дискретный сигнал с выхода микроЭВМ поступает на вход ЦАП, после прохождения которого преобразуется в непрерывный сигнал с помощью устройства, входящего в ЦАП, называемого экстраполятором. В ЦАП чаще всего применяют экстраполяторы нулевого порядка, которые преобразуют входной дискретный сигнал в непрерывный ступенчатый сигнал (рис. Д.18).

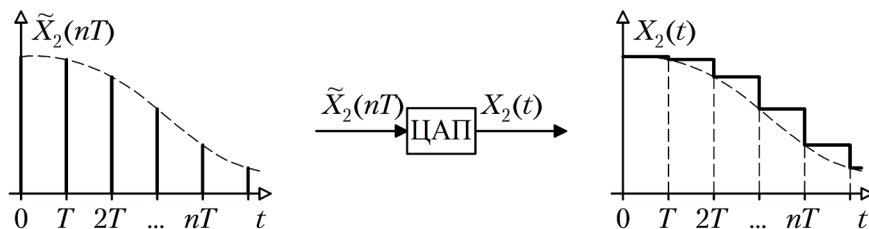


Рис. Д.18. Преобразование входного сигнала в ЦАП

Статическая характеристика ЦАП (рис. Д.19) показывает, что ЦАП, как и АЦП, является нелинейным элементом, для линеаризации релейной характеристики которого применим метод, рассмотренный выше на примере линеаризации статической характеристики АЦП. На рис. Д.19 по оси абсцисс отложена выходная величина микроЭВМ, а по оси ординат – величина, представляющая собой выходную величину ЦАП (с учетом преобразования экстраполятором). Обычно выходная величина представляет собой электрический сигнал (напряжение или ток). Единица младшего разряда выходной величины обозначена  $h_2$ , а единица младшего разряда входной величины равна безразмерной единице. Их отношение дает крутизну линеаризованной характеристики, показанной на рис. Д.19 пунктирной линией, т. е. коэффициент передачи ЦАП:

$$k_{\text{ЦАП}} = h_2. \quad (\text{Д.17})$$

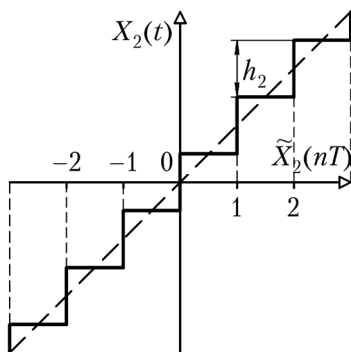


Рис. Д.19. Статическая характеристика ЦАП:  
по оси  $\tilde{X}_2(nT)$  отображены три разряда [десятичным значениям 1, 2, 3  
соответствуют двоичные (бинарные) числа (коды) 001, 010, 011]

Величина  $h_2$  определяется выражением

$$h_2 = \frac{U_{\text{ВЫХmax}}}{2^{\alpha_2} - 1},$$



где  $U_{\text{ВЫХmax}}$  – паспортное максимальное значение выходного напряжения ЦАП, соответствующее его насыщению, В;

$\alpha_2$  – число двоичных разрядов ЦАП (без учета знакового разряда).

Динамические свойства экстраполятора описываются передаточной функцией (Д.2):

$$W_{\Xi}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s}.$$

С учетом (Д.17) и последней формулы передаточная функция ЦАП:

$$W_{\text{ЦАП}}(s) = k_{\text{ЦАП}} W_{\Xi}(s), \quad (\text{Д.18})$$

а его структурную схему можно представить в виде, показанном на рис. Д.20.

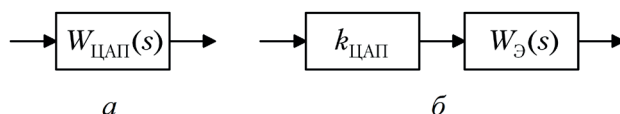


Рис. Д.20. Структурные схемы ЦАП:  
а – обобщенная; б – развернутая

Математическое описание АЦП и ЦАП без учета квантования по уровню позволяет для исследования цифровых САР использовать структурные модели импульсных САР после их дополнения структурными схемами АЦП и ЦАП. В таком случае структурные модели цифровых систем будут иметь вид, показанный на рис. Д.21 и Д.22, где ИИЗ1 и ИИЗ2 – идеальные импульсные звенья, обеспечивающие операцию квантования по времени.

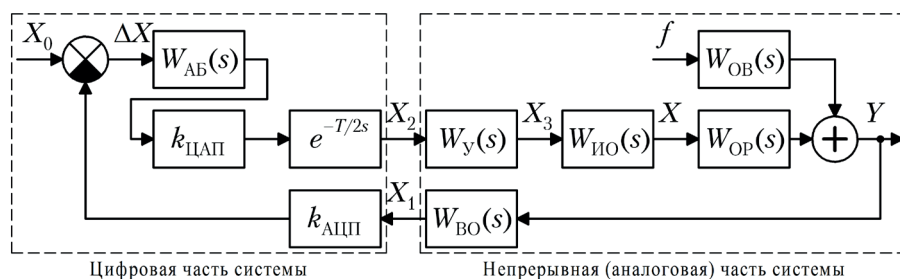


Рис. Д.21. Структурная схема непрерывной модели цифровой САР,  
функциональная схема которой показана на рис. Д.3

В непрерывной модели (рис. Д.21) как цифровая, так и непрерывная части системы описываются передаточными функциями в области комплексного аргумента  $s$ . Для этого исходная цифровая часть системы заменяется совокупностью сравнивающего органа и алгоритмического звена с передаточной функцией  $W_{AB}(s)$ , отображающей алгоритм управления, и дополняется звеном запаздыва-

ния с передаточной функцией  $e^{-\tau s}$ , учитывающей дискретизацию сигнала по времени с периодом квантования  $T$  (в передаточной функции звена запаздывания  $\tau = T/2$ ). Такая замена основана на приближенном равенстве передаточной функции экстраполятора  $W_{\Xi}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \approx e^{-T/2s}$  [8].

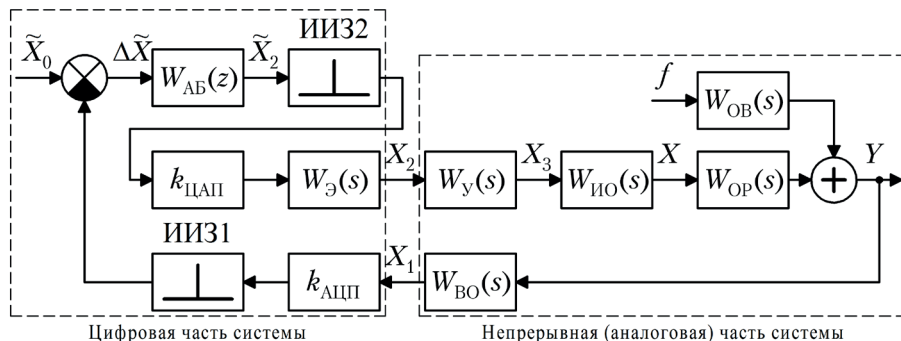


Рис. Д.22. Структурная схема непрерывно-дискретной модели цифровой САР, функциональная схема которой показана на рис. Д.3

В непрерывно-дискретной модели (рис. Д.22) непрерывная часть систем описывается передаточными функциями в области комплексного аргумента  $s$  линейного преобразования Лапласа, а алгоритм работы микроЭВМ – передаточными функциями в области аргумента  $z$  дискретного преобразования Лапласа ( $Z$ -преобразования) [3–6, 10].

Если в цифровой САР используются АЦП и ЦАП с одинаковыми значениями напряжений  $U_{ВХ\max}$  и  $U_{ВЫХ\max}$  и равными числами двоичных разрядов ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ), то САР будет не критична к коэффициентам передачи АЦП ( $k_{АЦП} = 1/h_1$ ) и ЦАП ( $k_{ЦАП} = h_2$ ) в переходном режиме, так как их произведение  $k_{АЦП}k_{ЦАП} = 1$ . Следовательно, их можно исключить из структурных схем (рис. Д.21 и Д.22), и если учесть, что операция квантования по времени непосредственно учитывается в дискретных передаточных функциях, то из структурных схем можно убрать и идеальные импульсные звенья ИИЗ1 и ИИЗ2. В таком случае структурные модели примут вид, показанный на рис. Д.23 и Д.24.

Из рассмотренных моделей непрерывная модель, отличающаяся своей простотой, является приближенной. Непрерывно-дискретная модель наиболее точно отражает динамические и статические свойства САР с микроЭВМ. В настоящем учебном пособии для решения задач анализа и синтеза САР за основу взяты современные информационные технологии, ориентированные на метод компьютерного моделирования с использованием, для приближенных исследований, непрерывной модели, а для более точных исследований – непрерывно-дискретной модели.

Следует отметить, что задачи анализа и синтеза цифровых САР методом компьютерного моделирования можно решать и с привлечением чисто дискрет-

ных моделей, в которых непрерывная часть системы (рис. Д.24) так же описана с помощью дискретных передаточных функций. Однако такой подход к исследованию цифровых САР оправдан в тех случаях, когда в распоряжении исследователя есть подобные готовые модели, поскольку задачи анализа и синтеза цифровых систем методом моделирования намного проще решать с помощью непрерывных и непрерывно-дискретных моделей САР.

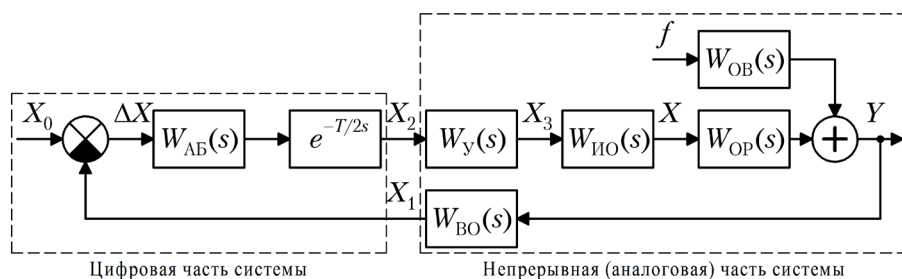


Рис. Д.23. Структурная схема непрерывной модели цифровой САР

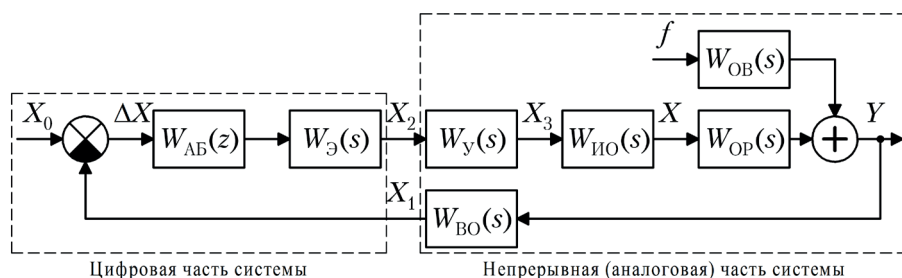


Рис. Д.24. Структурная схема непрерывно-дискретной модели цифровой САР

В SimInTech имеется библиотека «Дискретные», позволяющая моделировать на основе рассмотренных структурных моделей цифровые системы любой сложности.

#### Д.2.4. Определение периода квантования непрерывных сигналов в цифровых системах

При определенных допущениях (пренебрежение эффектом квантования непрерывных сигналов по уровню), рассмотренных в п. Д.2.3 САР с микроЭВМ, цифровую систему можно рассматривать как импульсную систему с амплитудно-импульсной модуляцией. При очень малых значениях периода квантования  $T$  дискретный сигнал на выходе импульсного элемента практически не будет отличаться от входного непрерывного сигнала. В таком случае преобразование непрерывного сигнала происходит без искажения. При больших значениях периода квантования  $T$  такое соответствие выходного дискретного сигнала с входным не-

прерывным может быть нарушено, и преобразование непрерывного сигнала будет осуществляться с искажением (с потерей информации о сигнале). По этой причине, прежде чем решать задачи анализа и синтеза САР с микроЭВМ, определяют значение периода квантования  $T$  сигнала. Для этого используют теорему В. А. Котельникова, которая отражает общие условия неискаженного преобразования сигнала при квантовании по времени. Ее сущность заключается в следующем.

Известно, что в любом непрерывном сигнале содержится определенный спектр гармонических составляющих с различными амплитудами и частотами.

Для отображения спектрального состава непрерывных сигналов используют так называемую спектральную характеристику (рис. Д.25), представляющую собой зависимость энергии сигнала  $F(\omega)$  (она однозначно зависит от амплитуд гармонических составляющих) от их частот  $\omega$ .

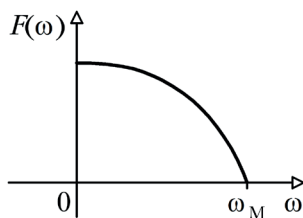


Рис. Д.25. Спектральная характеристика непрерывного сигнала

Согласно теореме Котельникова, непрерывный сигнал преобразуется без потери информации в дискретную последовательность (решетчатую функцию) с частотой квантования  $\omega_K = 2\pi/T$ , если соблюдается следующее условие:

$$\omega_M \leq \frac{\omega_K}{2}, \quad (\text{Д.19})$$

или

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_M}. \quad (\text{Д.20})$$

При выполнении этого условия полностью отсутствует искажение преобразуемого непрерывного сигнала в дискретный. Это следует понимать в том смысле, что при восстановлении непрерывного сигнала на основе дискретной последовательности (решетчатой функции) (рис. Д.136), например простым интерполированием, весь спектр частот  $F(\omega)$  будет полностью сохранен в восстановленном сигнале.

Для использования формулы (Д.20) очевидно необходимо располагать спектральными характеристиками внешних входных воздействий на САР, что не всегда представляется возможным.

Поэтому в практике анализа и синтеза дискретных САР при выборе периода квантования чаще используют амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) непрерывной части системы (рис. Д.26).

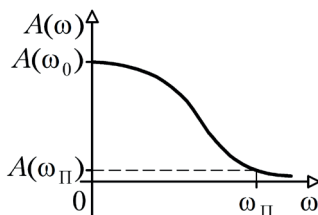


Рис. Д.26. АЧХ непрерывной части цифровой САР

При этом в формулу (Д.20) вместо частоты  $\omega_M$  подставляют частоту  $\omega_\Pi$  – максимальную частоту пропускания, которую ориентировочно принимают для  $A(\omega_\Pi) = (0,05 \dots 0,10)A(\omega_0)$  (рис. Д.26). В таком случае условие для определения периода квантования (Д.20) примет вид:

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_\Pi}. \quad (\text{Д.21})$$

Кроме выполнения рассмотренного выше условия теоремы В. А. Котельникова, при определении периода квантования необходимо учитывать особенности обработки сигналов в автоматических системах с микроЭВМ. В таких САР, как отмечалось в п. Д.1, аналоговые сигналы преобразуются в дискретные, которые в микроЭВМ обрабатываются с помощью программы по определенному алгоритму. Затем дискретные сигналы преобразуются в аналоговые, под действием которых и происходит изменение регулирующего воздействия на входе объекта регулирования. Для выполнения этих операций в одном канале необходимо определенное время для опроса датчика, задающего воздействия (для следящих систем), обработки непрерывного сигнала в АЦП, выполнения заданного алгоритма регулирования, преобразования дискретного сигнала регулирующего воздействия, а при необходимости для фильтрации сигналов. Таким образом, временную диаграмму работы УВК, в котором микроЭВМ обслуживает как регулятор  $N$  объектов регулирования, можно представить в виде, показанном на рис. Д.27, где:  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_N$  – время обработки каждого канала;  $\tau_P$  – резервное время (для выполнения диагностических операций, аварийных защит, блокировок и т. п.);  $\tau_O$  – общее время работы УВК в пределах периода  $T$ .

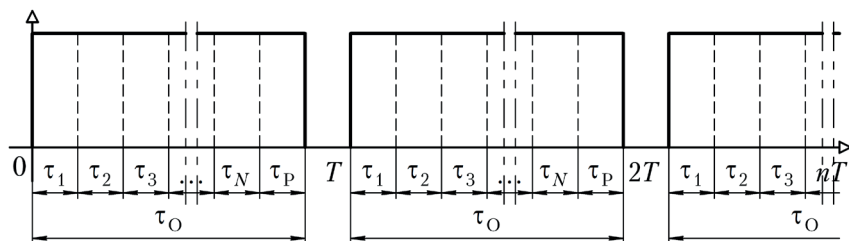


Рис. Д.27. Временная диаграмма работы  $N$  каналов УВК

Анализ временной диаграммы (рис. Д.27) показывает, что для нормальной работы УВК, очевидно, должно выполняться условие:

$$\tau_0 \leq T. \quad (\text{Д.22})$$

Таким образом, период квантования  $T$  с учетом (Д.21) и (Д.22) должен удовлетворять условию:

$$\tau_0 \leq T \leq \frac{\pi}{\omega_{\Pi}}. \quad (\text{Д.23})$$

В практике расчетов дискретных систем получило распространение правило, вытекающее из теоремы В. А. Котельникова: частота квантования должна быть на порядок больше полосы существенных частот объекта регулирования, которые в основном и определяют полосу пропускания системы. Вытекающее из этого правила условие для выбора периода квантования, обеспечивающего неискажения непрерывного сигнала, приближенно записывают как

$$T \leq 0,1 T_{\text{Omin}}, \quad (\text{Д.24})$$

где  $T_{\text{Omin}}$  – минимальная постоянная времени объекта регулирования.

Под  $T_{\text{Omin}}$  понимают следующее: если микроЭВМ используют в мультиплексорном режиме в качестве регулятора для управления несколькими объектами, с разными постоянными времени, то в формулу (Д.24) подставляют минимальное значение из них. С учетом (Д.24) условие для выбора периода квантования (Д.23) в приближенном варианте примет вид:

$$\tau_0 \leq T \leq 0,1 T_{\text{Omin}}. \quad (\text{Д.25})$$

Период квантования  $T$  является конструктивным параметром, и при его выборе на основе условия (Д.23) или (Д.25) принимают компромиссные решения, учитывая следующие противоречивые факторы: уменьшение периода квантования ограничивает сложность алгоритма регулирования и число обслуживаемых каналов одной микроЭВМ; увеличение периода квантования увеличивает время запаздывания в каналах преобразования и обработки сигналов и приводит к возрастанию информационных потерь, что соответствует ухудшению качества регулирования [8, 9].

При выборе периода квантования по возможности стараются выполнить полностью условие (Д.23) или (Д.25). В таком случае (так как выполняется правая часть этих условий) дискретная САР будет вести себя как непрерывная, и при ее анализе и синтезе можно использовать методы теории непрерывных автоматических систем. Если при определении  $T$  невозможно выполнить правую часть неравенства (Д.23) или (Д.25), то САР будет вести себя как чисто дискретная система, и для ее анализа и синтеза следует использовать математический аппарат дискретных систем, отдельные положения которого приведены в п. Д.2.3. Поясним рассмотренную методику определения и оценки периода квантования на следующем примере.

**Пример.** Необходимо выполнить реконструкцию автоматизированной системы управления технологическими объектами и процессами на тепловой электростанции, используя для этих целей малоканальные контроллеры Ремиконт Р-130.

Основным технологическим объектом на электростанции является синхронный генератор, который имеет две регулируемые величины – напряжение  $U$  и частоту  $f$  генерируемого тока. Его динамические свойства по этим двум каналам соответствуют апериодическим звеньям первого порядка (примерно с одинаковыми постоянными времени  $T_1 = T_2 = 1,2$  с). На электрической станции имеется еще ряд других объектов, в том числе компрессорная станция (для производства сжатого воздуха, необходимого для собственных нужд электростанции) и подсобное тепличное хозяйство для выращивания овощей, использующее тепловую энергию отработанного пара. Компрессорная станция имеет ресивер, в котором необходимо стабилизировать давление  $P$ . Ресивер как объект автоматического регулирования, с точки зрения его динамических свойств, соответствует апериодическому звену первого порядка с постоянной времени  $T_3 = 0,6$  с. Теплица как объект регулирования, многомерный объект, имеет несколько регулируемых величин, основной из которых является температура  $\theta$  в атмосфере теплицы. По каналу температуры  $\theta$  теплица как объект регулирования соответствует звену второго порядка, минимальная постоянная времени которого  $T_4 = 60$  с.

Из анализа числовых значений постоянных времени  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$  следует, что наименьшее значение из них  $T_3 = 0,6$  с. Следовательно, с учетом (Д.24) период квантования  $T$  не должен превышать  $0,06$  с. Это значение периода квантования нельзя обеспечить в контроллере Ремиконт Р-130, так как, согласно его технической характеристике (п. Д.4), минимальное значение периода квантования контроллера составляет  $0,2$  с. Таким образом, применительно к САР давления в ресивере, реализованной одним каналом контроллера Ремиконт Р-130, требования теоремы В. А. Котельникова не выполняются. Они также не выполняются и для САР напряжения  $U$  и частоты  $f$ . Следовательно, для анализа и синтеза этих САР нужно использовать методы, базирующиеся на теории дискретных систем. Что касается САР температуры  $\theta$  в атмосфере теплицы, то она удовлетворяет теореме В. А. Котельникова и ее можно рассматривать как непрерывную систему.

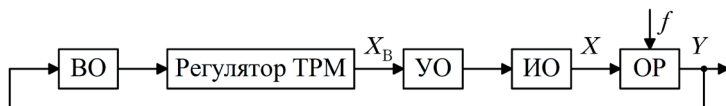
## Д.3. Математическое описание систем автоматического регулирования с микропроцессорными регуляторами

### Д.3.1. Общие сведения

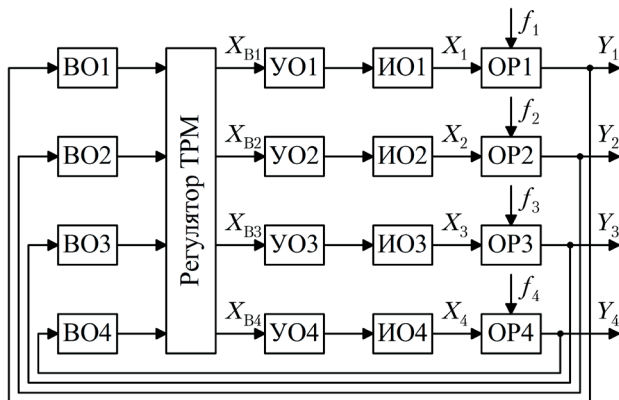
Микропроцессорные регуляторы с «жесткой логикой», упомянутые в п. Д.1, представляющие собой конструктивно завершенные приборы или модули, реализуют типовые линейные и позиционные законы регулирования. Такие устройства с широким спектром функциональных возможностей выпускаются отечественными и зарубежными производителями микропроцессорных средств. К их числу относятся **измерители-регуляторы ТРМ**, массовый серийный выпуск которых разной модификации освоен отечественными производственными объединениями «ОВЕН» (ПО «ОВЕН») [21–23]. Во всех модификациях ТРМ использованы одинаковые принципы их построения и работы. Функционально они обеспечивают

автоматический контроль и регулирование большого многообразия регулируемых (управляемых) величин различных по своей физической сущности объектов регулирования (температуры, влажности газообразных и сыпучих средств, давления, унифицированных электрических сигналов в виде токов и напряжений и др.).

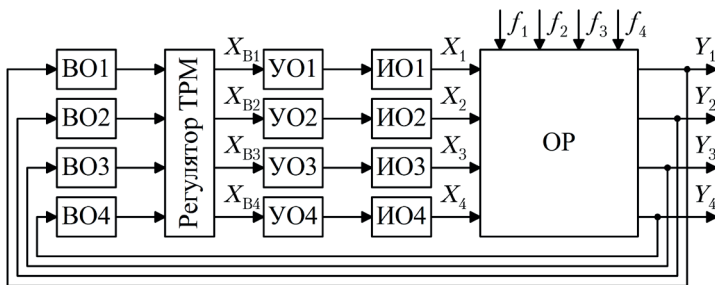
Измерители-регуляторы ТРМ (в дальнейшем по тексту именуемые как «регулятор ТРМ», «регулятор» или «ТРМ») выпускаются как с одним каналом измерения и регулирования, так и многоканальными (до восьми каналов). Они позволяют создавать САР определенной конфигурации (рис. Д.28).



а



б



в

Рис. Д.28. Варианты функциональных схем САР:

- а – одноконтурная система с использованием одного канала;
- б – многоконтурная система с использованием нескольких каналов;
- в – многомерная система



Подробная информация по регуляторам приведена в каталоге продукции ПО «ОВЕН» [23]. Обобщенная функциональная схема регуляторов показана на рис. Д.29.

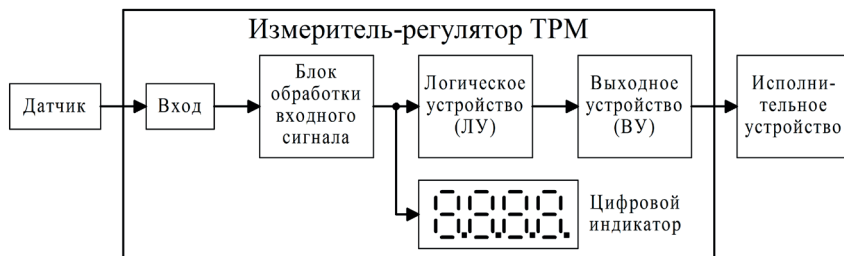


Рис. Д.29. Обобщенная функциональная схема измерителя-регулятора типа ТРМ (один канал)

Входы регулятора ТРМ позволяют подключать медные (ТСМ) и платиновые (ТСП) термопреобразователи сопротивления; термопары: хромель-копелевые (ТХК), хромель-алюмелевые (ТХА), платинородий-платиновые (ТПП), вольфрам-рениевые (ТВР), платинородиевые (ТПР) и др.; датчики с унифицированными выходными сигналами тока (0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА) и напряжения (–50...+50 мВ, 0...1 В); резистивные датчики (до 900 Ом).

Тип подключаемого датчика задается при программировании регулятора посредством введения соответствующего ему кода.

В блоке обработки входного сигнала осуществляются коррекция и цифровая фильтрация измеренных значений и могут вычисляться дополнительные контролируемые параметры (величины).

**Коррекция измерений.** В большинстве регуляторов ТРМ применяют два типа коррекции, позволяющих сдвигать или изменять наклон статической характеристики измерительного тракта регулятора (в технической документации ПО «ОВЕН» на регуляторы ТРМ ее называют измерительной характеристикой). Их сущность рассмотрим применительно к случаю, когда контролируемая величина – температура измеряется с помощью термопреобразователя сопротивления.

Измерительную (статическую) характеристику в процессе пусконаладочных работ снимают экспериментально с помощью термостата, оснащенного эталонным термометром. Если термопреобразователь подключен к регулятору с помощью проводников, имеющих небольшую длину (дополнительное сопротивление от соединительных проводников, вносимое в измерительную цепь, незначительное), то статическая характеристика будет иметь вид, показанный на рис. Д.30а.

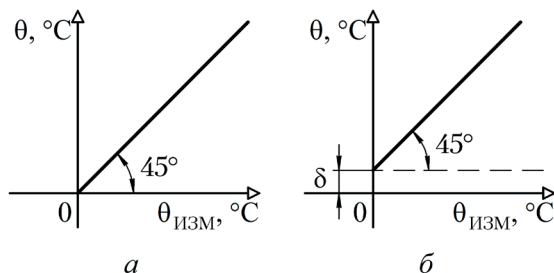


Рис. Д.30. Статические характеристики измерительного тракта регулятора ТРМ:

$\theta_{\text{ИЗМ}}$  – температура, измеренная эталонным термометром;  
 $\theta$  – температура, отображенная на цифровом индикаторе регулятора

При подключении термопреобразователя к регулятору посредством проводников значительной длины статическая характеристика будет иметь вид, приведенный на рис. Д.30б. Из анализа характеристик (рис. Д.30) следует, что сопротивление соединительных проводников вносит погрешность  $\Delta$ . Для ее компенсации, очевидно, статическую характеристику (рис. Д.30б) необходимо сместить в начало координат (рис. Д.31). Такую коррекцию в регуляторах осуществляют при их программировании посредством задания определенного программируемого параметра.



Рис. Д.31. Совмещенные статические характеристики измерительного тракта регулятора ТРМ

Все датчики, в том числе и термопреобразователи сопротивления, имеют отклонения от номинальных параметров. Для термопреобразователей сопротивления в качестве такого параметра принято значение его сопротивления при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  или в относительных единицах:

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0},$$

где  $R_{100}$  – сопротивление при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 $R_0$  – сопротивление при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Эти отклонения сказываются на угле наклона статической характеристики (коэффициенте передачи  $\alpha$ ). Для номинальных значений  $W_{100} \cdot \alpha = 1$  и статическая характеристика имеет вид, приведенный на рис. Д.32а.

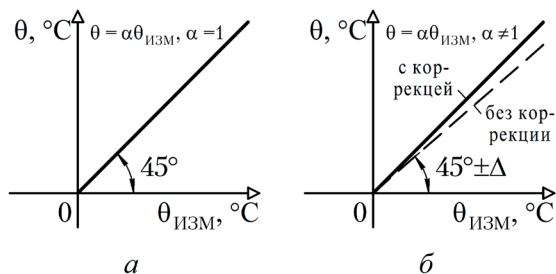


Рис. Д.32. Статические характеристики измерительного тракта регулятора ТРМ: а – при номинальном значении  $W_{100}$ ; б – при отклонении  $W_{100}$  от номинального значения

При отклонениях  $W_{100}$  от номинальных значений угол наклона характеристики (рис. Д.32б) будет отличаться на величину  $\pm \Delta$  и коэффициент передачи  $\alpha \neq 1$ , что приведет к появлению погрешности контроля и регулирования температуры. Для исключения этой погрешности, в зависимости от ее знака, при программировании регулятора задают  $\alpha$  в пределах 0,5...2. Для определения конкретного значения  $\alpha$  необходимо экспериментально снять статическую характеристику с помощью термостата и эталонного термометра.

Следует отметить, что функциональные возможности блока обработки выходного сигнала по коррекции измерений (компенсации погрешности датчиков) целесообразно использовать в тех случаях, когда в этом есть необходимость (когда предъявляются высокие требования к стабилизации температуры).

**Цифровая фильтрация измерений.** Она уменьшает влияние помех, источником которых могут быть электромагнитные процессы в атмосфере, электрические устройства и установки (электрические двигатели, генераторы, радиостанции и др.). В большинстве регуляторов ТРМ в блоке обработки входного сигнала предусмотрена двухступенчатая фильтрация: так называемая «полосовая», устраняющая значительные единичные помехи, и «сглаживающая», снижающая действие небольших высокочастотных помех.

Не вдаваясь в подробности вычислительных алгоритмов **полосовой фильтрации** входного сигнала, рассмотрим ее с функциональной точки зрения применительно к САР температуры некоторого термического объекта регулирования. В процессе регулирования датчик воспринимает непрерывные значения температуры. Они в блоке обработки входного сигнала через равные интервалы времени  $\tau_0$  ( $\tau_0$  – интервал опроса датчика) преобразуются в цифровые (дискретные) сигналы, которые фиксируются на выходе блока цифровым индикатором (рис. Д.29). Цифровой индикатор регистрирует (отображает) только те дискретные сигналы, которые находятся в зоне полосы фильтра  $F$ . Для этого вычисляется разность меж-

ду результатами измерений входной величины, выполненных в двух последних циклах опроса, и сравнивается с заданным значением полосы фильтра  $F$ . Если вычисленная разность превышает заданный предел  $F$ , то производится повторное измерение, полученный результат отбрасывается (на выходе блока остается результат предыдущего измерения), а значение полосы фильтра  $F$  удваивается. В случае подтверждения нового значения фильтр перестраивается (т. е. полоса фильтра  $F$  уменьшается до исходной) на новое стабильное состояние измеряемой величины.

Величину полосы фильтра  $F$  задают при программировании регулятора в единицах измеряемой величины, руководствуясь следующими рекомендациями: при низком уровне помех или при быстро меняющихся процессах следует увеличивать значение  $F$  или отключать действие полосы фильтра – задав программируемому параметру  $F$  нулевое значение; при работе регулятора в условиях сильных помех, для их эффективного подавления, необходимо уменьшить значение полосы фильтра  $F$ .

**Сглаживающая фильтрация** в блоке обработки входного сигнала регулятора осуществляется на основе экспоненциального фильтра, реализующего численными методами передаточную функцию

$$W_{\Phi}(s) = \frac{1}{T_{\Phi}s + 1}, \quad (\text{Д.26})$$

где  $T_{\Phi}$  – постоянная времени цифрового фильтра, с.

Постоянная времени фильтра  $T_{\Phi}$  – программируемый параметр, значение которого задают с учетом спектрального состава помех: большие значения  $T_{\Phi}$  повышают инерционность регулятора, но при этом защищенность регулятора от высокочастотных помех возрастает; при уменьшении  $T_{\Phi}$  достигается обратный эффект.

Помимо рассмотренных выше основных функций, блок обработки входного сигнала выполняет операции по обслуживанию цифрового индикатора, а в отдельных модификациях ТРМ обеспечивает дополнительные функции по вычислению разности двух входных сигналов, квадратного корня от измеренного сигнала и целый ряд других (см. документацию на регуляторы ТРМ [21–23]).

**Логическое устройство** регулятора предназначено для выполнения главных функций по реализации алгоритмов регулирования САР. В зависимости от типа и модификации регуляторов ТРМ их ЛУ реализуют типовые линейные законы регулирования (*П-, ПД-, ПИ-, ПИД-законы*) и различные релейные (позиционные) законы регулирования, рассмотренные в п. 1.3.6.

**Выходное устройство** регулятора предназначено для формирования выходного сигнала и его передачи на исполнительный механизм (исполнительный орган) либо на регистрирующее устройство. Выходные устройства, в зависимости от модификаций регуляторов, могут быть ключевого и аналогового типов.

В большинстве ключевых выходных устройств для гальванической развязки используют электромагнитные реле, транзисторные или симисторные оптопары.

Аналоговые выходные устройства в регуляторах ТРМ, в основе которых используются ЦАП, применяют двух типов: один тип формирует выходную токовую петлю, а второй – унифицированный сигнал напряжения.

### Д.3.2. Алгоритмы функционирования регуляторов ТРМ

Функциональную схему САР применительно к термическому объекту регулирования (например, термической камере, представленной на рис. 1.1), в которой в качестве регулятора использован измеритель-регулятор ТРМ, можно представить в виде, показанном на рис. Д.33, где:  $\theta_K$  – температура (регулируемая величина);  $U_P$  – выходной сигнал регулятора;  $\theta_3$  – задающее воздействие;  $E$  – сигнал датчика температуры (ЭДС термпары); АБ – условный алгоритмический блок, реализующий в логическом устройстве один из линейных или релейных законов регулирования.

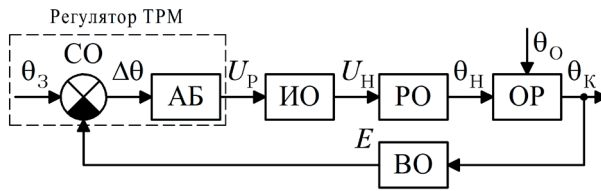


Рис. Д.33. Функциональная схема САР температуры термического объекта регулирования

Как отмечалось выше, логическое устройство, в зависимости от модификации регулятора ТРМ, может формировать *ПИД-закон регулирования* и на его основе более простые *П-*, *ПД-*, *ПИ-законы*.

Интегрально-дифференциальное уравнение *ПИД-закона регулирования*, соответствующее структурной схеме (рис. 1.25а), имеет следующий вид:

$$Y = k_p \left( X + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int X dt + T_{\text{Д}} \frac{dX}{dt} \right), \quad (\text{Д.27})$$

где  $Y$  и  $X$  – сигналы на выходе и входе алгоритмического блока;

$k_p$  – коэффициент передачи (усиления);

$T_{\text{И}}$  – постоянная времени интегрирования;

$T_{\text{Д}}$  – постоянная времени дифференцирования.

Алгоритмическая сущность регулятора при реализации *ПИД-закона регулирования* заключается в следующем:

- через определенный временной интервал  $t_{\text{ИЗМ}}$  (равный интервалу опроса датчика  $t_O$ ) осуществляется измерение регулируемой величины  $\theta_K$ ;
- вычисляются текущие значения сигнала рассогласования  $X_i = \Delta\theta$ ;
- численным методом реализуется уравнение (Д.27) по следующей формуле:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \left( X_i + \frac{1}{T_{\text{И}}} \sum_{i=0}^n X_i t_{\text{ИЗМ}} + T_{\text{Д}} \frac{\Delta X_i}{\Delta t_{\text{ИЗМ}}} \right), \quad (\text{Д.28})$$

где  $X_p$  – полоса пропорциональности ( $1/X_p = k_p$ );

$\Delta X_i$  – разность между двумя соседними измерениями  $X_i$  и  $X_{i-1}$ ;

$i$  – номер текущего измерения;

$n$  – количество измерений.

На функциональной схеме (рис. Д.33) показан алгоритмический блок, выполняющий операции по реализации *ПИД-закона* согласно формуле (Д.28).

В результате описанных операций на выходе логического устройства (рис. Д.29) формируется дискретный сигнал в виде решетчатой функции (рис. Д.34).

Этот сигнал при использовании аналогового выходного устройства с помощью ЦАП преобразуется в аналоговый сигнал, с определенной точностью соответствующий *ПИД-закону регулирования* (Д.27).

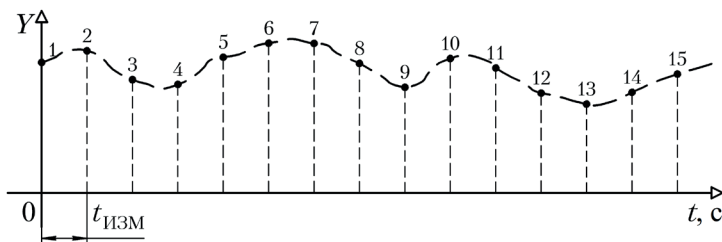


Рис. Д.34. Дискретный сигнал на выходе ЛУ регулятора ТРМ

В регуляторах с *ПИД-законами регулирования* для исключения излишних срабатываний при небольших значениях рассогласования  $X_i$  предусмотрено введение так называемой зоны нечувствительности  $X_d$ . При наличии зоны нечувствительности сигнал на выход регулятора будет выдаваться только при условии  $|X_i| > X_d$ .

В некоторых модификациях регуляторов программно можно задавать ограничение уровня выходного сигнала  $Y$ . Такое ограничение иногда требуется, исходя из особенности конструкции или эксплуатационных требований к исполнительным органам и их элементам сопряжения с регулятором.

При использовании выходных устройств ключевого типа импульсный сигнал в виде решетчатой функции (рис. Д.34) подвергается широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В результате ШИМ на выходе ключевого выходного устройства будет формироваться последовательность управляющих (регулирующих) импульсов определенной длительности  $D$ , которая зависит от величины сигнала решетчатой функции (рис. Д.34) и рассчитывается в логическом устройстве по формуле

$$D = Y_{\%} \frac{T_{\text{СЛ}}}{100\%},$$

где  $Y_{\%}$  — выходной сигнал  $Y$  в % от максимально возможного значения;

$T_{\text{СЛ}}$  — период следования импульсов (задается пользователем при программировании регулятора), с.

В таком случае регулятор ТРМ реализует импульсный *ПИД-закон регулирования*.

Во многих модификациях регуляторов ТРМ реализовано двухпозиционное регулирование. При работе в режиме двухпозиционного регулирования логическое устройство реализует соответствующие релейные характеристики, рассмотренные в п. 1.3.6.

Для повышения надежности коммутационных элементов выходных устройств регуляторов при высокочастотных помехах логическое устройство позволяет формировать временные задержки на включение и отключение.

### Д.3.3. Математическое описание САР с регуляторами ТРМ

Анализ алгоритмических возможностей регуляторов ТРМ, рассмотренных в предыдущем параграфе, показывает, что они выполняют определенные динамические и статические преобразования физических величин, однозначно связанных с выходной координатой объекта регулирования. Эти преобразования, с достаточной для практических целей достоверностью, можно интерпретировать следующими динамическими и статическими характеристиками.

Процесс цифровой фильтрации во входном устройстве регулятора, как отмечалось выше, описывается передаточной функцией аperiодического звена первого порядка (Д.26).

Зону нечувствительности регулятора можно учесть введением в его структурную схему статического звена с характеристикой, изображенной на рис. Д.35.

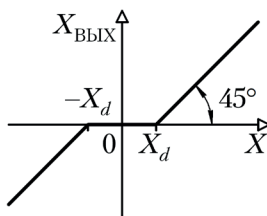


Рис. Д.35. Статическая характеристика звена с единичным передаточным коэффициентом ( $X_{\text{ВЫХ}} = X$ ) и зоной нечувствительности  $X_d$

Функциональную возможность ограничения выходной величины регулятора можно учесть посредством статического звена, имеющего характеристику, приведенную на рис. Д.36.

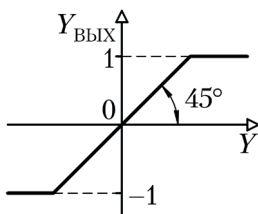


Рис. Д.36. Статическая характеристика звена с единичным передаточным коэффициентом ( $Y_{\text{ВЫХ}} = Y$ ) и ограничением (1 соответствует максимальному ограничению)





Из рассмотренной структурной схемы (рис. Д.37) следует, что в общем случае САР с регулятором ТРМ является существенно нелинейной системой. Если в регуляторе не используются функции полосовой фильтрации, зоны нечувствительности  $X_d$  и ограничения выходного сигнала, то САР (рис. Д.37) вырождается в линейную систему (рис. Д.38).

Применительно к регуляторам, обеспечивающим двухпозиционное регулирование, один из вариантов структурной схемы показан на рис. Д.39.

На основе рассмотренных структурных схем методом компьютерного моделирования можно достаточно просто определить параметры настройки регуляторов ТРМ. При этом первоначально следует выполнить анализ используемой структурной схемы на предмет ее упрощения с учетом малых параметров, руководствуясь рекомендациями, приведенными в п. 1.3.5. Для предварительного определения параметров настройки *ПИД-регуляторов* можно использовать метод Циглера-Никольса (см. п. 1.3.3).

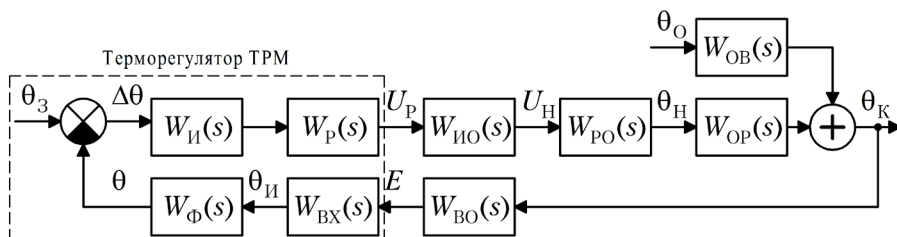


Рис. Д.38. Линейная математическая модель САР с регулятором ТРМ

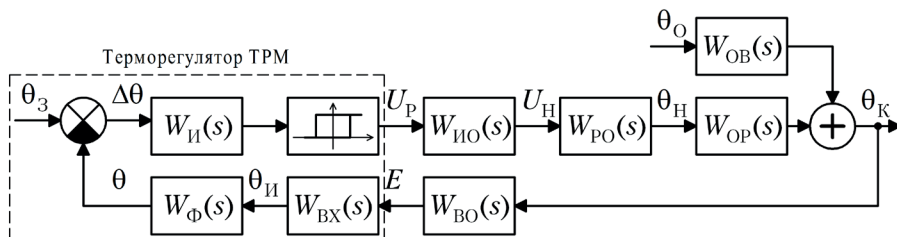


Рис. Д.39. Структурная схема САР с релейным регулятором ТРМ

**Примечание:** рассмотренные в п. Д.3.3 динамические модели также правомерны и для САР, в которых в качестве регуляторов используются ПЛК ПО «ОВЕН», так как они могут реализовывать алгоритмы функционирования, аналогичные регуляторам ТРМ.

## Д.4. Регулирующие микропроцессорные контроллеры

В данном параграфе приведена краткая информация, необходимая для решения задач анализа и синтеза САР с микроЭВМ в рамках настоящего учебного пособия применительно к контроллерам Ремиконт, выпускаемым серийно ОАО «Завод электроники и механики» (г. Чебоксары).

### Д.4.1. Контроллеры Ремиконт Р-130

**Общие сведения.** Ремиконт Р-130 выпускается в двух модификациях (моделях) – регулирующей и логической. Регулирующая модель предназначена для применения в системах автоматического регулирования, а логическая – для использования в системах логического управления. Поскольку данное учебное пособие предназначено для изучения САР, то в рассматриваемом приложении приведены только сведения, относящиеся к регулирующей модели Ремиконт Р-130, в дальнейшем изложении просто Ремиконт.

Ремиконт представляет собой изделие, включающее в себя микропроцессорный блок, устройство связи с объектом, устройство связи с оператором (пульт) и другие блоки (блоки внутренней и внешней интерфейсной связи, блок питания и т. д.). Он, как и другие микропроцессорные регуляторы (рис. Д.28), позволяет строить локальные одноконтурные, многоконтурные и многосвязные САР. С его помощью можно реализовать до четырех независимых контуров регулирования (по этой причине он называется малоканальным). Посредством наращивания количества контроллеров число контуров регулирования соответственно можно увеличить до требуемого значения.

**Виртуальная структура, программное обеспечение и программирование контроллера.** Виртуальная (кажущаяся) структура отражает информационную организацию контроллера и характеризует его как звено автоматической системы. Часть элементов виртуальной структуры реализована аппаратно, часть – программно. Все программное обеспечение, формирующее виртуальную структуру, зашито в ПЗУ и пользователю недоступно. Независимо от того, как реализованы элементы виртуальной структуры – аппаратно или программно, пользователь может представлять контроллер как совокупность реально существующих отдельных блоков.

В состав виртуальной структуры Ремиконта входят:

- аппаратура ввода-вывода информации;
- аппаратура оперативного управления и настройки;
- аппаратура интерфейсного канала;
- алгоритмические блоки (алгоблоки);
- библиотека алгоритмов.

Из перечисленных составляющих виртуальной структуры контроллера на стадиях анализа и синтеза САР интерес представляют два последних компонента, сущности которых следующие.

Алгоблоки, реализованные программно, образуют область управления контроллера. В исходном состоянии алгоблоки отсутствуют, и никакие функции по обработке сигналов контроллером не выполняются. Алгоблок «появляется» после того, как в процессе программирования в него помещают какой-либо алгоритм из библиотеки алгоритмов. В этом смысле алгоблок – это задействованный алгоритм, и поэтому понятие алгоблока, в который помещен алгоритм, и понятие задействованного алгоритма идентичны (термин «алгоритм» можно употреблять вместо термина «алгоблок»).

В библиотеке контроллера содержится обширное количество алгоритмов (всего 99). Из них некоторая часть выполняет сервисные функции – обеспечивает работу отдельных блоков контроллера, а остальные необходимы для решения задач регулирования. В рамках настоящего учебного пособия при решении задач анализа и синтеза САР необходим алгоритм, обеспечивающий *ПИД-закон регулирования*, на основе которого можно формировать любые комбинации типовых законов регулирования: *П-, ПИ-, ПД-, ПИД-законы*.

В Ремиконте все задействованные алгоблоки обслуживаются программой циклически с постоянным временем цикла. Вначале обслуживается первый алгоблок, затем второй и т. д., пока не будет обслужен последний алгоблок. Когда время в пределах установленного времени цикла истечет, программа вновь перейдет к обслуживанию первого алгоблока.

Время одного цикла является параметром, который задается при программировании контроллера в диапазоне 0,2...2,0 с с шагом 0,2 с. Его можно рассматривать как период квантования  $T$  сигнала, величина которого выбирается исходя из условий, приведенных в п. Д.2.4.

В оставшуюся от обслуживания алгоблоков часть времени выполняется самодиагностика контроллера. Помимо времени, которое требуется на обслуживание алгоблоков и на самодиагностику, требуется также некоторое время на прием, передачу и обработку информации через интерфейсный канал. Общее время, затрачиваемое на обслуживание алгоблоков  $T_{\text{АБ}}$  и интерфейсного канала  $T_{\text{ИК}}$ , должно быть меньше времени цикла  $T$ :

$$T_{\text{АБ}} + T_{\text{ИК}} < T.$$

При выборе длительности цикла  $T$  следует оставлять резерв не менее 0,04...0,08 с. Данное обстоятельство необходимо учитывать при принятии решения о применении контроллера в качестве регулятора. При этом следует руководствоваться следующими рекомендациями:

- если условие (Д.21) выполняется, то САР следует рассматривать как линейную непрерывную систему и для ее анализа и синтеза использовать соответствующие методы теории линейных систем;
- если условие (Д.21) не выполняется (такие случаи имеют место при быстродействующих линейных частях САР), то САР следует рассматривать как импульсную систему и для ее анализа и синтеза использовать соответствующую теорию дискретных систем.

Для программирования Ремиконта Р-130 не требуется программист. Процесс программирования сводится к тому, что путем последовательного нажатия нескольких клавиш из библиотеки алгоритмов извлекаются нужные алгоритмы, которые объединяются в систему заданной конфигурации, и в них устанавливаются требуемые параметры настройки.

#### **Д.4.2. Контроллеры Ремиконт Р-130ISa**

Контроллер Ремиконт Р-130ISa представляет одну из модификаций контроллера Р-130. Он построен на базе встроенного одноплатного РС-компьютера промышленного исполнения, имеет открытую программно-аппаратную архитектуру, библиотеку управляющих алгоритмов контроллера Ремиконт Р-130 и дополнительно встроенные технологические языки программирования системы ISaGRAF (стандарт МЭК 1131-3). Регулирующая модель Р-130ISa, как и Р-130, обеспечивает организацию четырех контуров регулирования.

Отличительной особенностью Р-130ISa является возможность реализации практически любых по сложности и быстродействию алгоритмов регулирования и коррекции с помощью языков программирования системы ISaGRAF. Для упрощения процедур программирования можно использовать компьютер, оснащенный специальным программным обеспечением.

При использовании библиотеки алгоритмов контроллера Р-130ISa программируется по аналогии с контроллером Р-130. Для программирования контроллера с помощью системы ISaGRAF необходимо предварительное освоение навыков работы в ее среде.

# Задания для самоконтроля и тестирования

ПРИЛОЖЕНИЕ

Е

## Е.1. Линейная САР с единичной ОС

Выполните моделирование линейной САР, структурная схема которой показана на рис. Е.1.

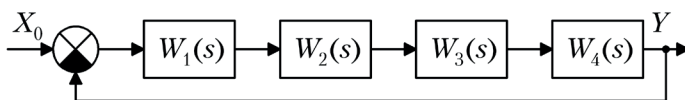


Рис. Е.1. Структурная схема САР

Передаточные функции элементов системы:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1};$$

$$W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = \frac{k_4}{s},$$

где  $k_1 = 3,82$ ;  $k_2 = 2$ ;  $T_2 = 0,5$  с;  $k_3 = 1$ ;  $T_3 = 0,05$  с;  $\beta = 0,5$ ;  $k_4 = 1$ .

Задающее воздействие  $X_0 = 1(t)$ .

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.2.

## Е.2. Скорректированная линейная САР с единичной ОС

В САР (рис. Е.1) введите корректирующий элемент в виде жесткой отрицательной обратной связи с передаточной функцией  $W_5(s) = 1,04$  (рис. Е.3) и выполните ее моделирование при  $X_0 = 1(t)$ .

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.4.

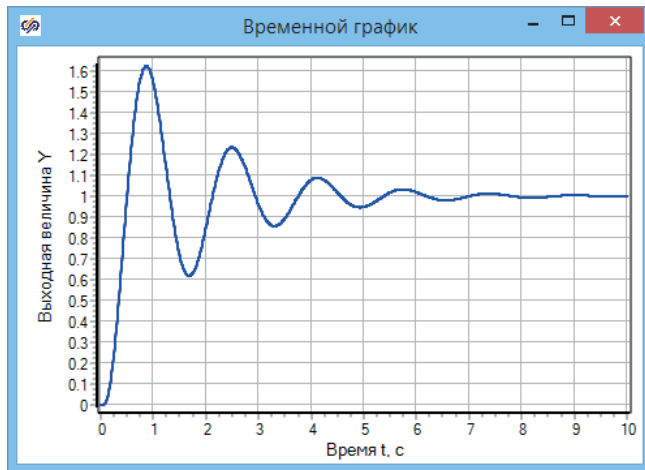


Рис. Е.2. Переходный процесс САР

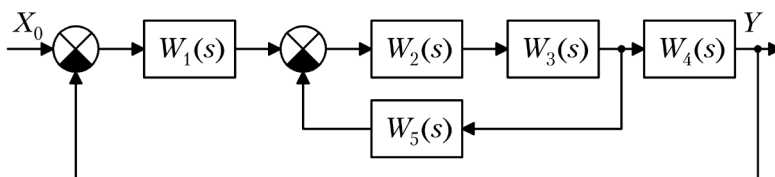


Рис. Е.3. Структурная схема скорректированной САР

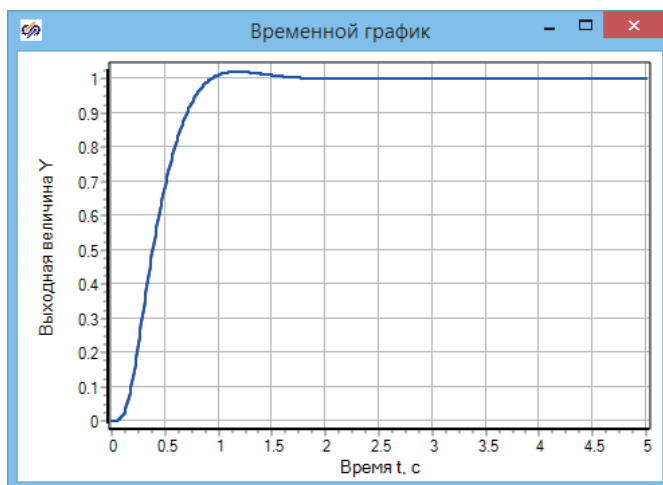


Рис. Е.4. Переходный процесс скорректированной САР

### Е.3. Линейная САР температуры в атмосфере теплицы

Выполните моделирование линейной САР температуры в атмосфере теплицы (описание САР см. в п. Б.6 приложения Б.), структурная схема которой представлена на рис. Е.5.

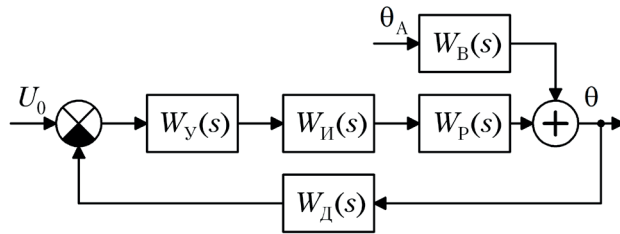


Рис. Е.5. Структурная схема САР температуры в атмосфере теплицы

Динамические свойства объекта регулирования описываются по регулирующему воздействию и возмущению соответственно следующими передаточными функциями:

$$W_{OP}(s) = \frac{k_P}{Ts + 1} e^{-\tau s}; \quad W_{ОВ}(s) = \frac{k_B}{Ts + 1},$$

где  $T$  – постоянная времени, с;

$\tau$  – время запаздывания, с;

$k_P$  – передаточный коэффициент по регулирующему воздействию;

$k_B$  – передаточный коэффициент по возмущающему воздействию.

Передаточные функции элементов системы:

- датчика –  $W_Д(s) = \frac{k_Д}{T_Д s + 1}$ ;
- усилителя –  $W_У(s) = k_У$ ;
- исполнительного элемента (фрамуги совместно с двигателем и реечным механизмом) –  $W_И(s) = \frac{k_И}{s}$ .

Параметры передаточных функций:  $T = 180$  с;  $k_P = 10$  °C/рад;  $\tau = 30$  с;  $k_B = 0,3$ ;  $T_Д = 12$  с;  $k_Д = 0,02$  В/°C;  $k_У = 10$ ;  $k_И = 0,003$  рад/(В·с). Заданное значение температуры  $\theta_{Зад} = 25$  °C. Задающее воздействие  $U_0 = 0,5$  В. Параметры ступенчатого воздействия температуры атмосферного воздуха: время срабатывания 80 мин, начальное состояние  $\theta_{A0} = 20$  °C, конечное состояние  $\theta_{A1} = 10$  °C.

Температуру воздуха  $\theta_{A0} = 20$  °C необходимо учитывать при определении начальных условий для моделирования передаточной функции  $W_{ОВ}(s)$ .

Ответ: график переходного процесса САР приведен на рис. Е.6.

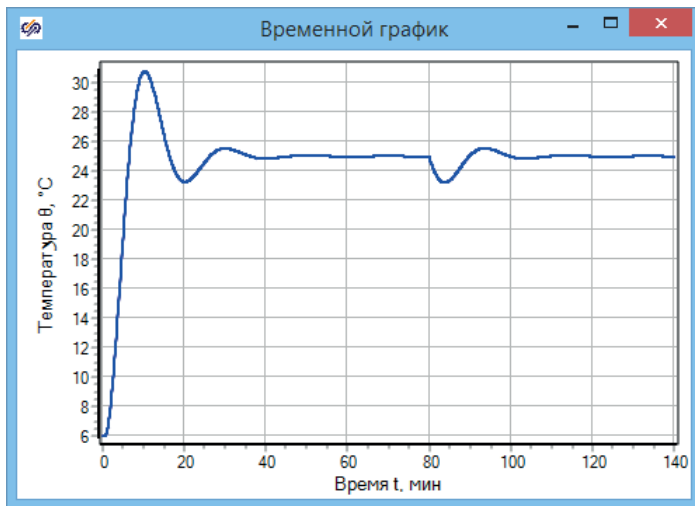


Рис. Е.6. График переходного процесса

## Е.4. Нелинейная САР с единичной ОС

Выполните моделирование нелинейной САР, структурная схема которой приведена на рис. Е.7.

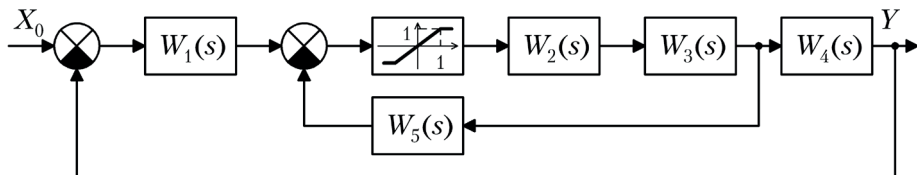


Рис. Е.7. Структурная схема САР

Передаточные функции элементов системы:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = \frac{k_4}{s}; \quad W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 6,3$ ;  $k_2 = 2$ ;  $T_2 = 0,5$  с;  $k_3 = 1$ ;  $T_3 = 0,05$  с;  $\beta = 0,5$ ;  $k_4 = 1$ ;  $k_5 = 0,5$ .

Задающее воздействие  $X_0 = 1(t)$ .

Ответ: график переходного процесса САР приведен на рис. Е.8.



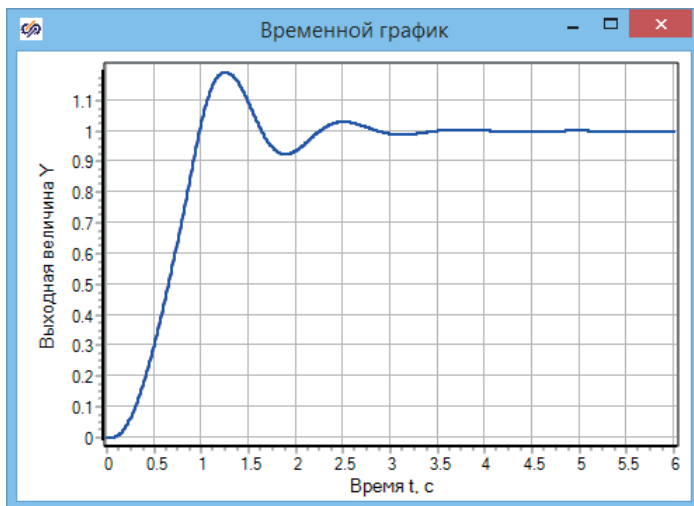


Рис. Е.8. График переходного процесса

## Е.5. Релейная САР температуры проточного водонагревателя

Выполните моделирование релейной САР температуры проточного водонагревателя. Структурная схема системы показана на рис. Е.9, где:  $\theta_{\text{зад}}$  – заданная температура;  $U$  – напряжение на электродах;  $\Delta\theta$  – сигнал рассогласования,  $\Delta\theta = \theta_{\text{зад}} - \theta$ ;  $F(\Delta\theta)$  – релейная характеристика терморегулятора.

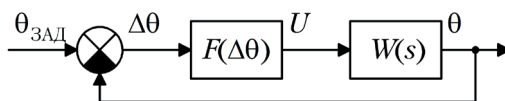


Рис. Е.9. Структурная схема САР

Передаточная функция водонагревателя по каналу регулирующего воздействия:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\beta Ts + 1},$$

где  $k = 0,09$  °C/В – передаточный коэффициент водонагревателя;

$T = 32$  с – постоянная времени;

$\beta = 1$  – коэффициент демпфирования.

Релейная характеристика терморегулятора показана на рис. Е.10.

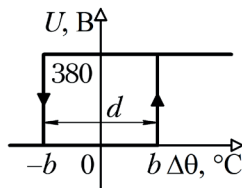


Рис. Е.10. Релейная характеристика терморегулятора:  
 $d = 2b$  – дифференциал;  $b = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  – зона нечувствительности

Заданная температура  $\theta_{\text{зад}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ответ: график процесса регулирования температуры показан на рис. Е.11.

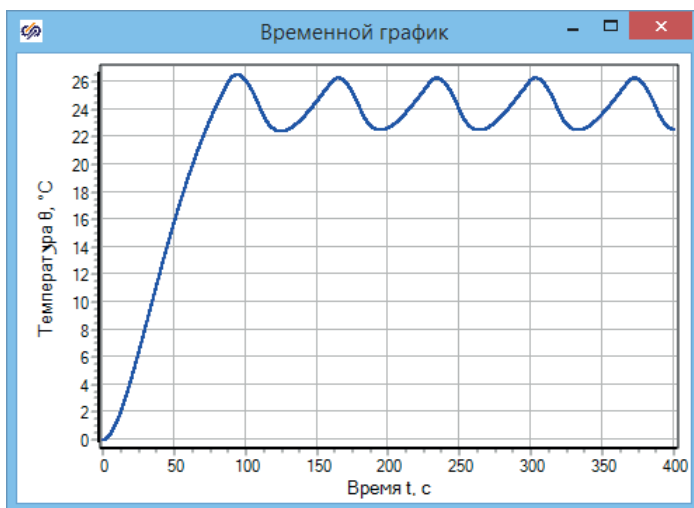


Рис. Е.11. График процесса регулирования температуры

## Е.6. Оптимизация нелинейной САР с несколькими ОС

На рис. Е.12 представлена структурная схема нелинейной САР.

Передаточные функции элементов системы:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{T_2 s + 1}{s}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1};$$

$$W_5(s) = \frac{k_5}{s}; \quad W_6(s) = \frac{k_6}{s}; \quad W_7(s) = k_7; \quad W_8(s) = \frac{k_8}{T_8 s + 1},$$

где  $k_1 = 50$ ;  $T_2 = 0,6\text{ с}$ ;  $k_3 = 600$ ;  $T_3 = 0,2\text{ с}$ ;  $k_4 = 0,03$ ;  $T_4 = 0,02\text{ с}$ ;  $k_5 = 4$ ;  $k_6 = 1$ ;  $k_7 = 600$ ;  $k_8 = 1,5$ ;  $T_8 = 0,01\text{ с}$ .

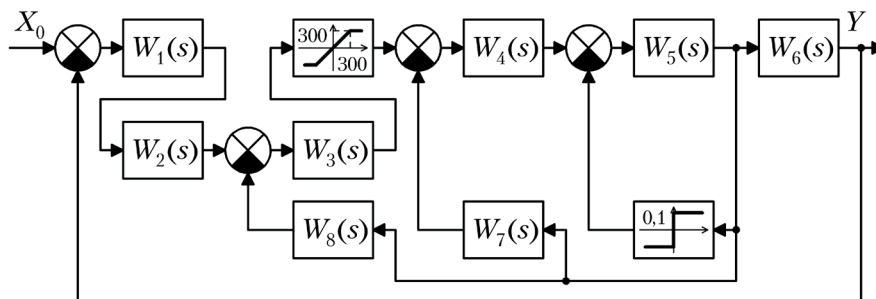


Рис. Е.12. Структурная схема САР

Выполните моделирование САР при задающем воздействии  $X_0 = 0,1 \cdot 1(t)$ .  
 Ответ: график переходного процесса САР показан на рис. Е.13.

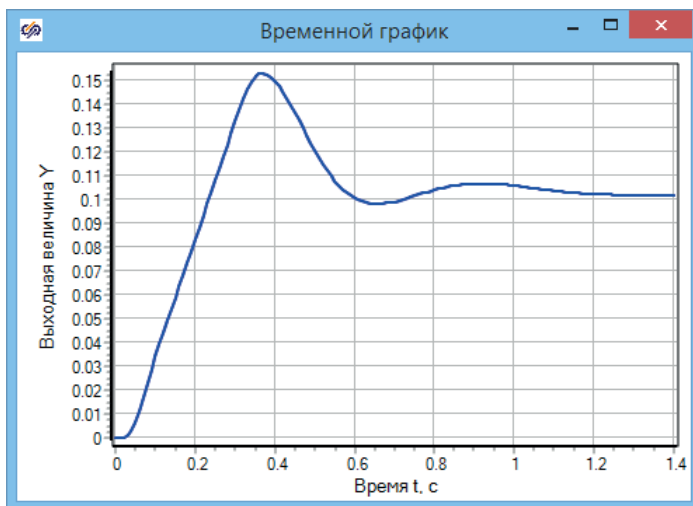


Рис. Е.13. График переходного процесса САР

## Е.7. Линейная САР (вариант 1)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.14.

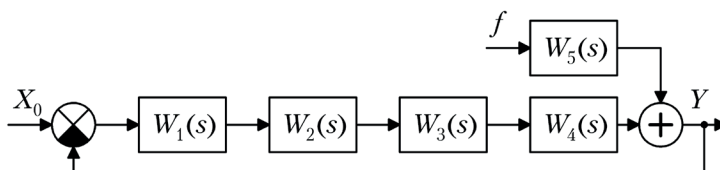


Рис. Е.14. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{s}; W_3(s) = e^{-\tau s}; W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; W_5(s) = \frac{k_5}{T_5 s + 1},$$

где  $k_1 = 2,15$ ;  $k_2 = 0,12$ ;  $\tau = 0,85$  с;  $k_4 = 2,5$ ;  $T_4 = 0,95$  с;  $k_5 = 0,82$ ;  $T_5 = 0,95$  с.

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.15).

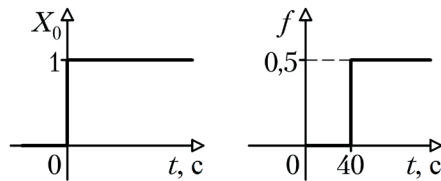


Рис. Е.15. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.16.

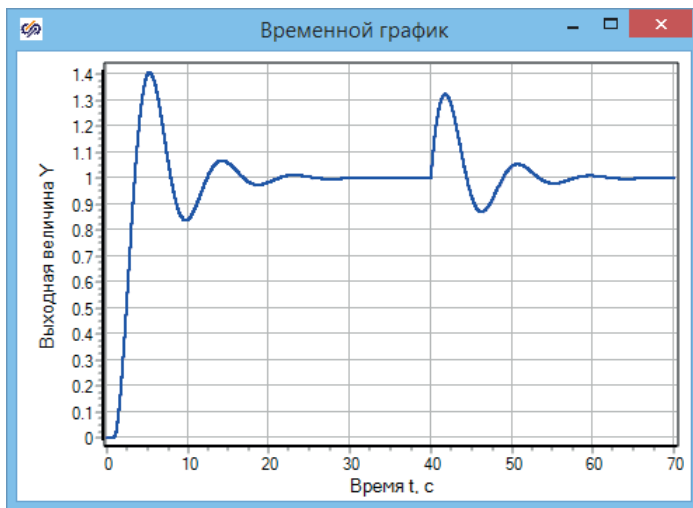


Рис. Е.16. График переходного процесса САР

## Е.8. Линейная САР (вариант 2)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.17.

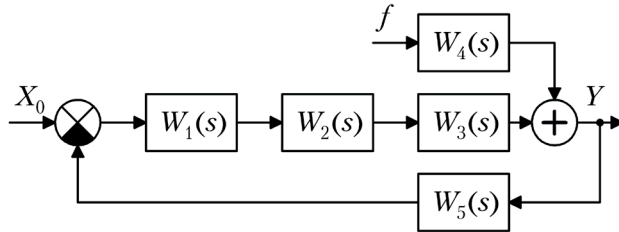


Рис. Е.17. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta_3 T_3 s + 1};$$

$$W_4(s) = \frac{k_4}{T_4^2 s^2 + 2\beta_4 T_4 s + 1}; \quad W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 1$ ;  $T_2 = 1$  с;  $k_3 = 8$ ;  $T_3 = 0,8$  с;  $\beta_3 = 1,2$ ;  $k_4 = 3$ ;  $T_4 = 0,8$  с;  $\beta_4 = 1,2$ ;  $k_5 = 0,3$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.18).

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.19.

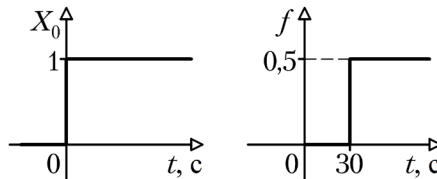


Рис. Е.18. Графики входных воздействий

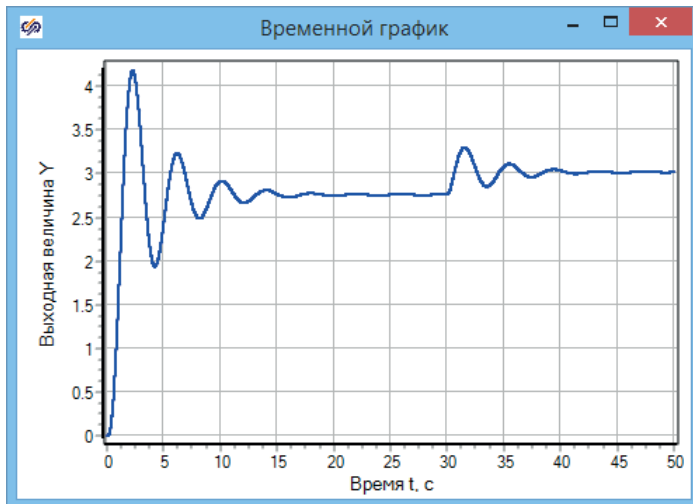


Рис. Е.19. График переходного процесса САР

## Е.9. Линейная САР (вариант 3)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.20.

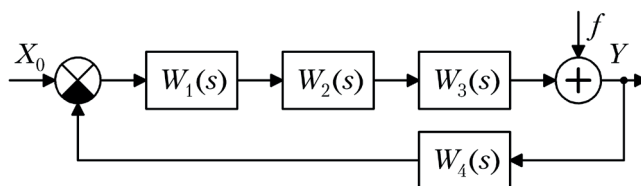


Рис. Е.20. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{s}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = k_4,$$

где  $k_1 = 10$ ;  $k_2 = 3$ ;  $k_3 = 0,5$ ;  $T_3 = 1$  с;  $k_4 = 0,3$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.21).

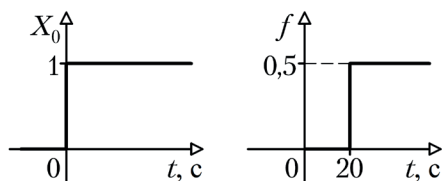


Рис. Е.21. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.22.

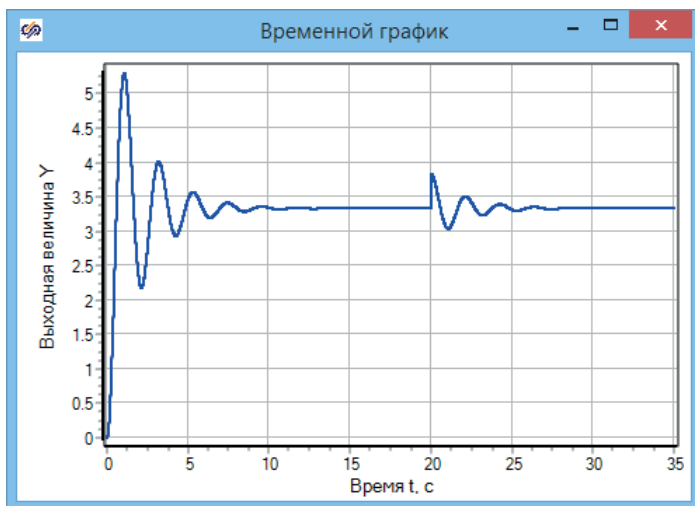


Рис. Е.22. График переходного процесса САР

## Е.10. Линейная САР (вариант 4)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.23.

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; W_3(s) = e^{-\tau s}; W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 4$ ;  $k_2 = 3$ ;  $T_2 = 1,5$  с;  $\tau = 3$  с;  $k_4 = 0,5$ ;  $T_4 = 1$  с;  $k_5 = 0,1$ .

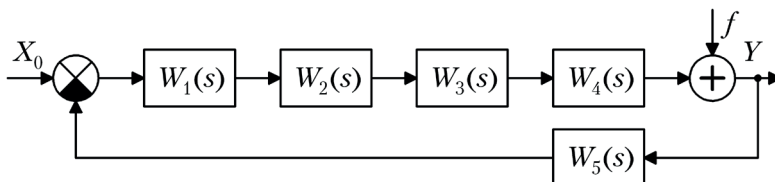


Рис. Е.23. Структурная схема САР

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.24).

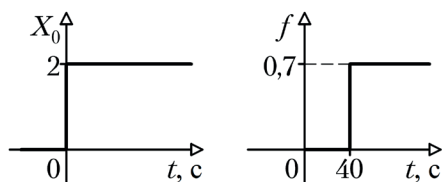


Рис. Е.24. Графики входных воздействий

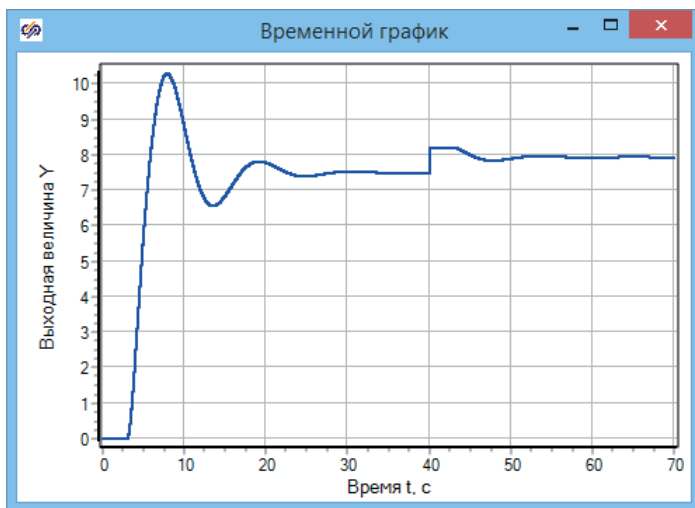


Рис. Е.25. График переходного процесса САР

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.25.

## Е.11. Линейная САР (вариант 5)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.26.

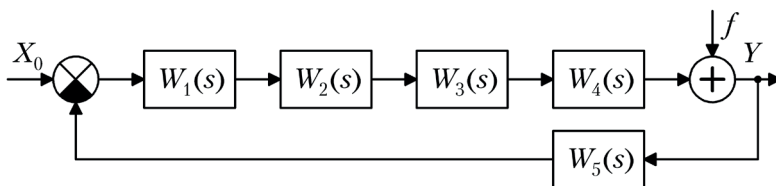


Рис. Е.26. Структурная схема САР



Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; W_3(s) = e^{-\tau s}; W_4(s) = \frac{k_4}{T_4^2 s^2 + 2\beta_4 T_4 s + 1}; W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 4$ ;  $k_2 = 1,4$ ;  $T_2 = 1,5$  с;  $\tau = 3$  с;  $k_4 = 0,6$ ;  $T_4 = 1,3$  с;  $\beta_4 = 0,7$ ;  $k_5 = 0,1$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.27).

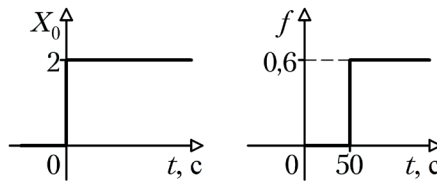


Рис. Е.27. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.28.

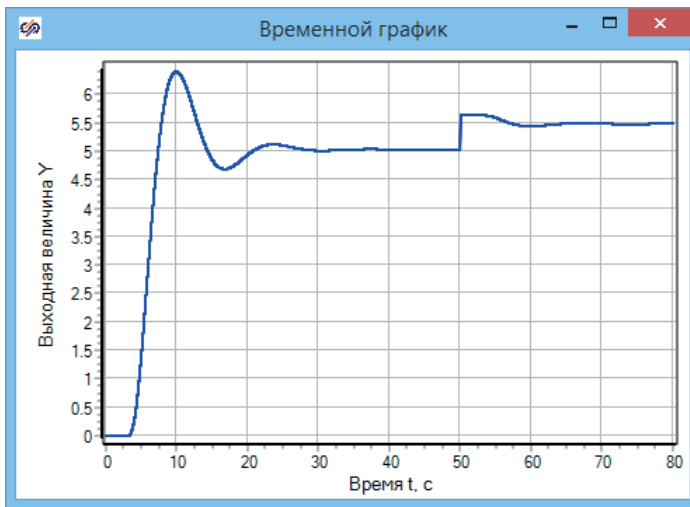


Рис. Е.28. График переходного процесса САР

## Е.12. Линейная САР (вариант 6)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.29.

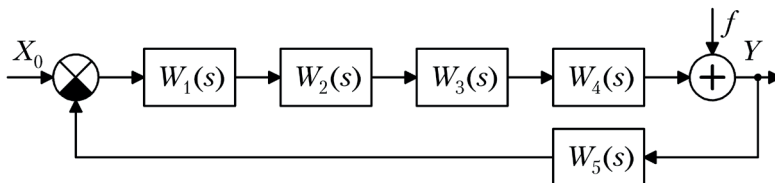


Рис. Е.29. Структурная схема САР

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.30).

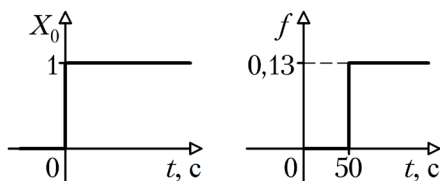


Рис. Е.30. Графики входных воздействий

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{s}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = \frac{k_4}{T_4^2 s^2 + 2\beta_4 T_4 s + 1}; \quad W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 3$ ;  $k_2 = 0,3$ ;  $k_3 = 0,5$ ;  $T_3 = 1$  с;  $k_4 = 0,9$ ;  $T_4 = 0,8$  с;  $\beta_4 = 1,2$ ;  $k_5 = 1$ .

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.31.

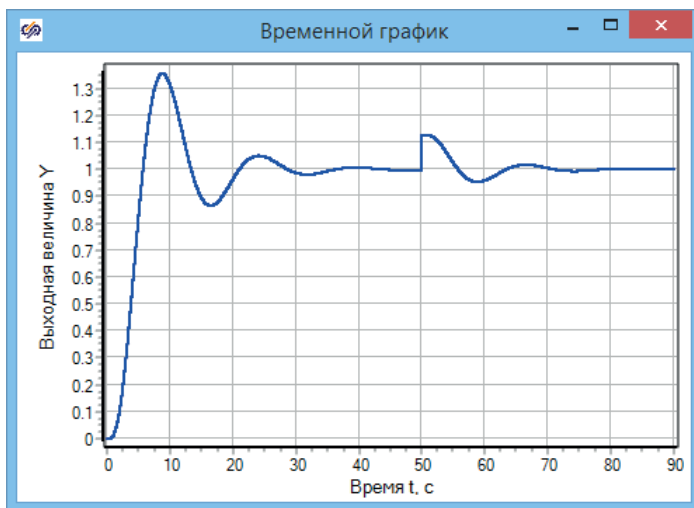


Рис. Е.31. График переходного процесса САР

## Е.13. Линейная САР (вариант 7)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.32.

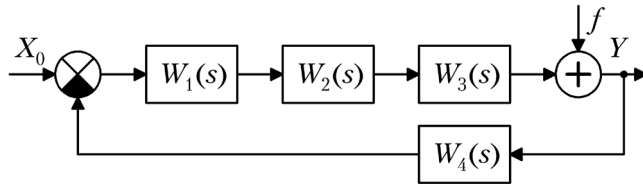


Рис. Е.32. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{s}; W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta_3 T_3 s + 1}; W_4(s) = k_4,$$

где  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 0,2$ ;  $k_3 = 0,4$ ;  $T_3 = 0,8$  с;  $\beta_3 = 6$ ;  $k_4 = 1$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.33).

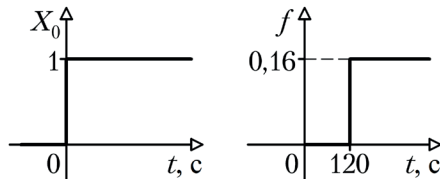


Рис. Е.33. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.34.

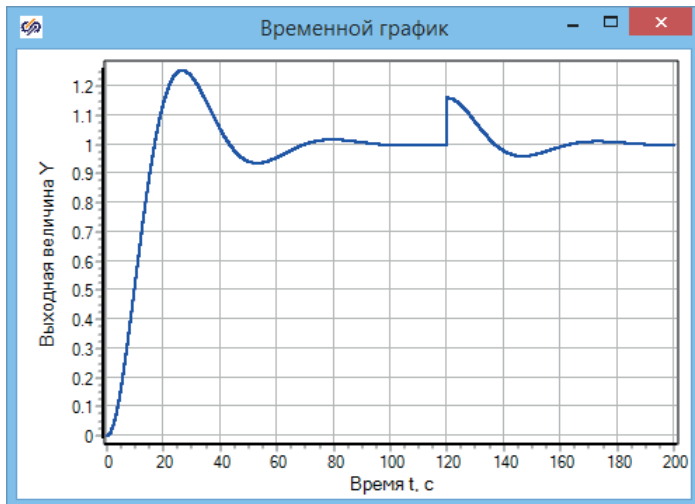


Рис. Е.34. График переходного процесса САР

## Е.14. Линейная САР (вариант 8)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.35.

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{s}; W_3(s) = e^{-\tau s}; W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; W_5(s) = \frac{k_5}{T_5 s + 1}; W_6(s) = k_6,$$

где  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 0,2$ ;  $\tau = 0,85$  с;  $k_4 = 2,5$ ;  $T_4 = 0,95$  с;  $k_5 = 0,82$ ;  $T_5 = 0,95$  с;  $k_6 = 1$ .

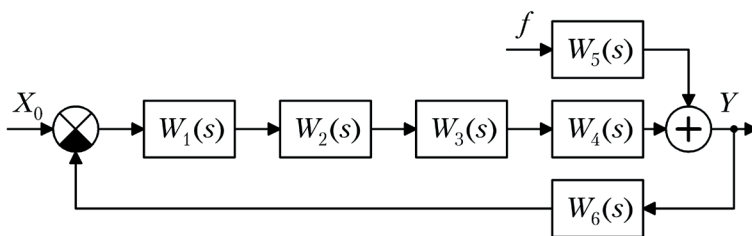


Рис. Е.35. Структурная схема САР

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.36).

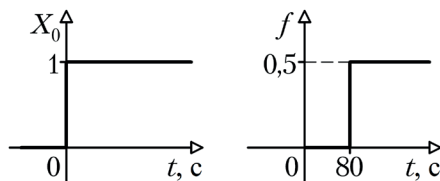


Рис. Е.36. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.37.

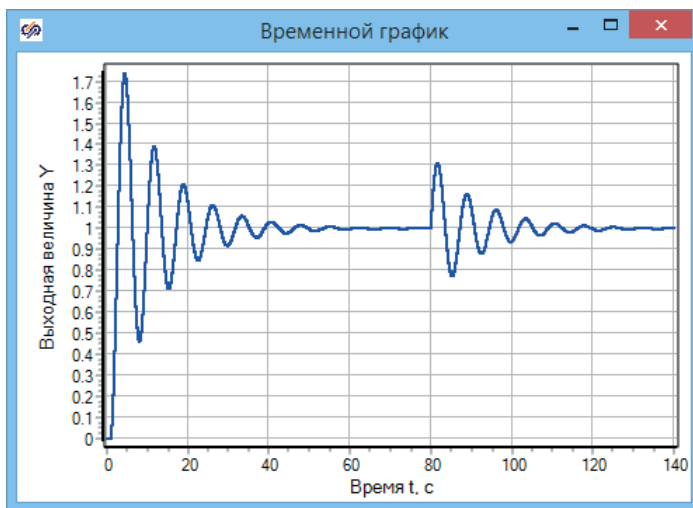


Рис. Е.37. График переходного процесса САР

## Е.15. Линейная САР (вариант 9)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.38.

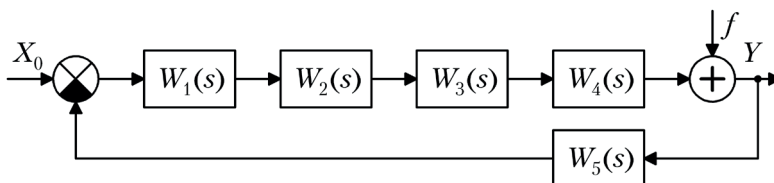


Рис. Е.38. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{s}; W_3(s) = e^{-\tau s}; W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 0,18$ ;  $\tau = 0,85$  с;  $k_4 = 2,5$ ;  $T_4 = 0,95$  с;  $k_5 = 0,6$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.39).

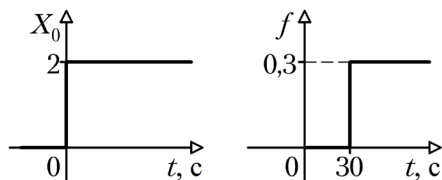


Рис. Е.39. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.40.

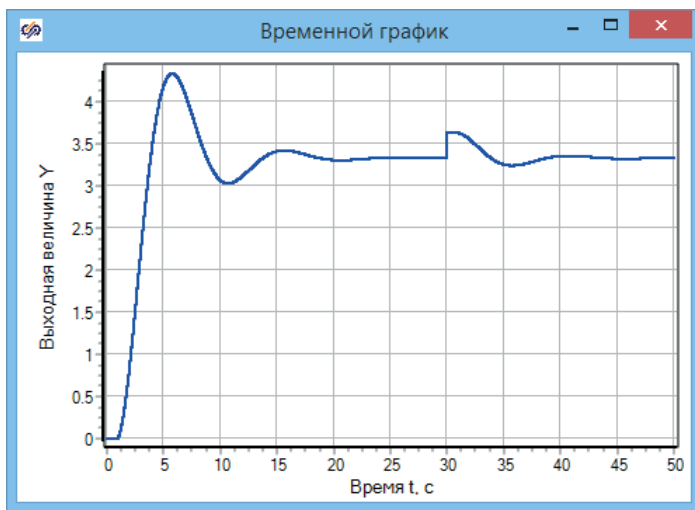


Рис. Е.40. График переходного процесса САР

## Е.16. Линейная САР (вариант 10)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.41.

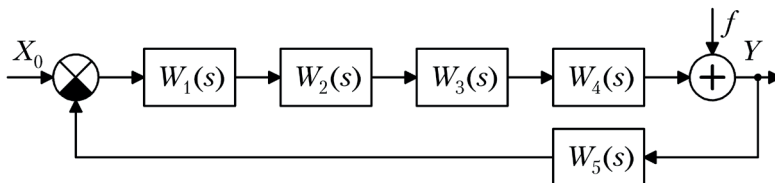


Рис. Е.41. Структурная схема САР

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.42).

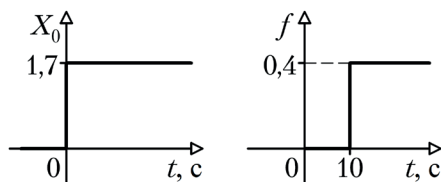


Рис. Е.42. Графики входных воздействий

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; W_3(s) = e^{-\tau s}; W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 2$ ;  $T_2 = 0,75$  с;  $\tau = 0,13$  с;  $k_4 = 1,5$ ;  $T_4 = 1,8$  с;  $k_5 = 0,5$ .

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.43.

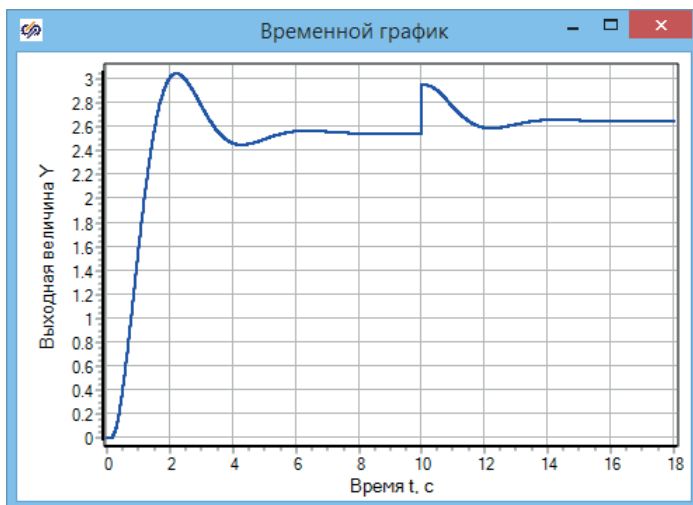


Рис. Е.43. График переходного процесса САР

## Е.17. Линейная САР (вариант 11)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.44.

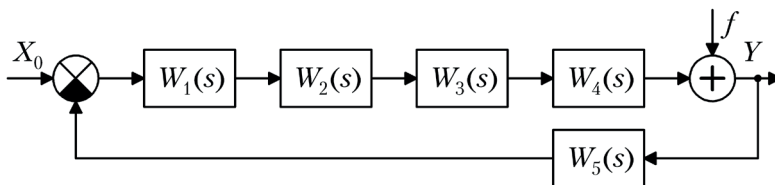


Рис. Е.44. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; \quad W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 2$ ;  $T_2 = 0,1$  с;  $k_3 = 1,1$ ;  $T_3 = 0,2$  с;  $k_4 = 1,5$ ;  $T_4 = 0,8$  с;  $k_5 = 0,5$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.45).

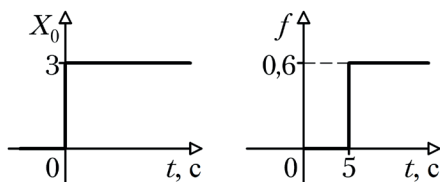


Рис. Е.45. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.46.



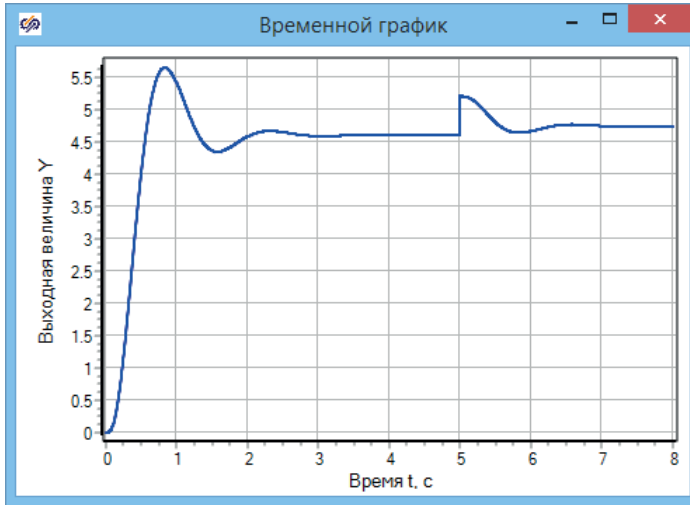


Рис. Е.46. График переходного процесса САР

## Е.18. Линейная САР (вариант 12)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.47.

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta_3 T_3 s + 1}; W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 1,87$ ;  $k_2 = 2$ ;  $T_2 = 0,1$  с;  $k_3 = 0,4$ ;  $T_3 = 0,2$  с;  $\beta_3 = 1,4$ ;  $k_4 = 1,5$ ;  $T_4 = 0,8$  с;  $k_5 = 1$ .

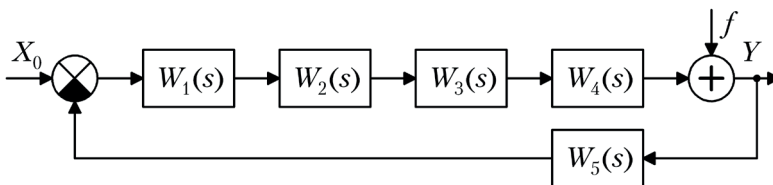


Рис. Е.47. Структурная схема САР

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.48).

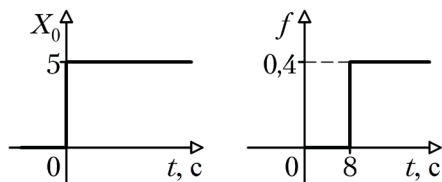


Рис. Е.48. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.49.

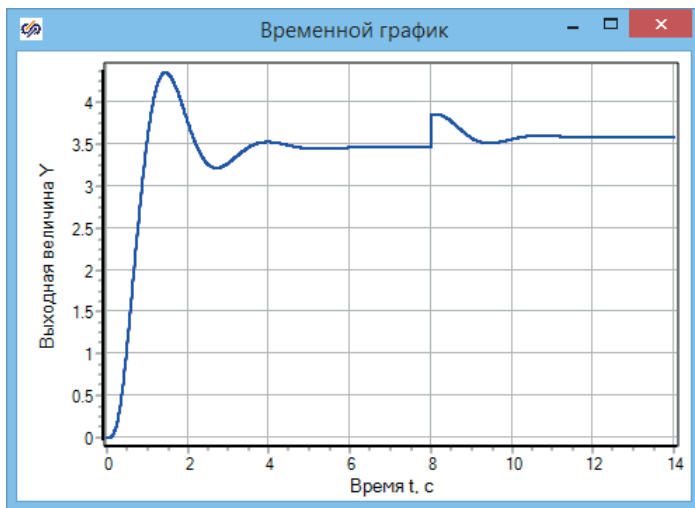


Рис. Е.49. График переходного процесса САР

## Е.19. Линейная САР (вариант 13)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.50.

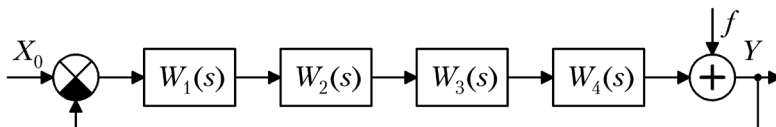


Рис. Е.50. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta_3 T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = \frac{k_4}{T_4^2 s^2 + 2\beta_4 T_4 s + 1},$$

где  $k_1 = 1,87$ ;  $k_2 = 2$ ;  $T_2 = 0,1$  с;  $k_3 = 0,4$ ;  $T_3 = 0,2$  с;  $\beta_3 = 1,4$ ;  $k_4 = 0,3$ ;  $T_4 = 0,35$  с;  $\beta_4 = 0,8$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.51).

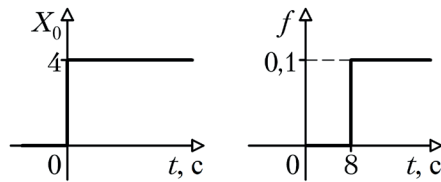


Рис. Е.51. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.52.

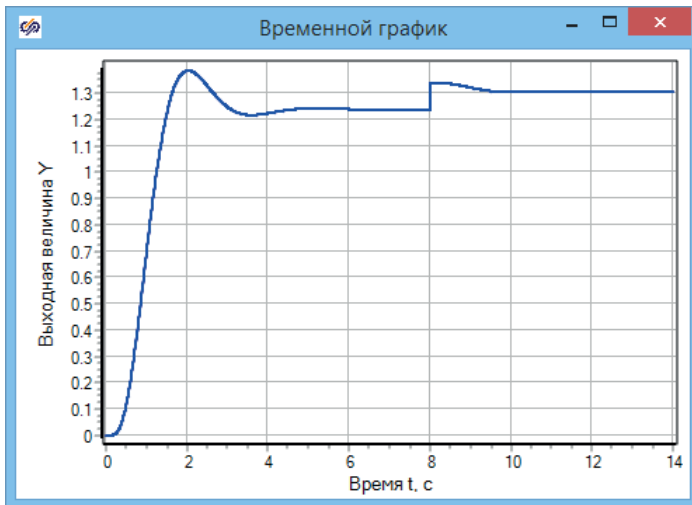


Рис. Е.52. График переходного процесса САР

## Е.20. Линейная САР (вариант 14)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.53.

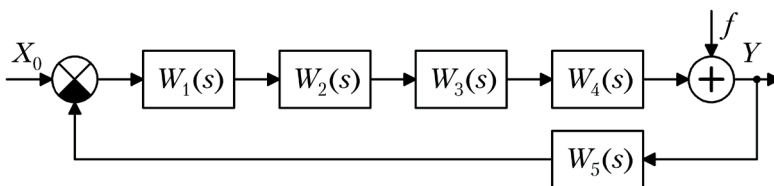


Рис. Е.53. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2^2 s^2 + 2\beta_2 T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta_3 T_3 s + 1};$$

$$W_4(s) = \frac{k_4}{T_4^2 s^2 + 2\beta_4 T_4 s + 1}; \quad W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 3$ ;  $k_2 = 0,1$ ;  $T_2 = 0,3$  с;  $\beta_2 = 0,55$ ;  $k_3 = 0,4$ ;  $T_3 = 0,2$  с;  $\beta_3 = 0,4$ ;  $k_4 = 2$ ;  $T_4 = 0,35$  с;  $\beta_4 = 0,8$ ;  $k_5 = 1$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.54).

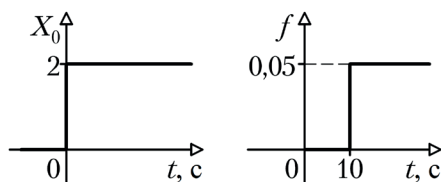


Рис. Е.54. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.55.

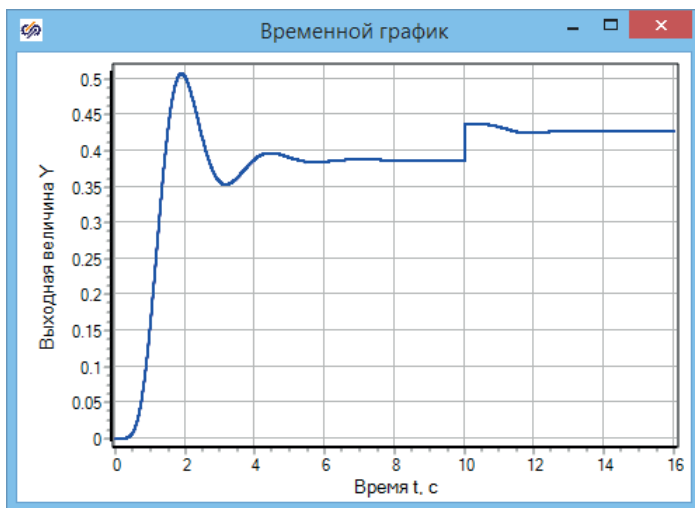


Рис. Е.55. График переходного процесса САР

## Е.21. Линейная САР (вариант 15)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.56.

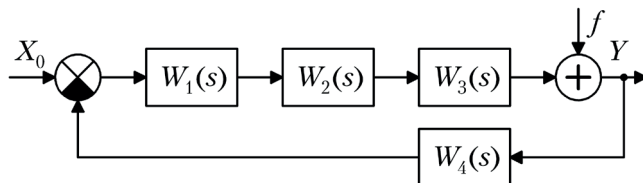


Рис. Е.56. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1}; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2^2 s^2 + 2\beta_2 T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta_3 T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = k_4,$$

где  $k_1 = 5,4$ ;  $T_1 = 1,1$  с;  $k_2 = 0,4$ ;  $T_2 = 0,2$  с;  $\beta_2 = 0,4$ ;  $k_3 = 2$ ;  $T_3 = 0,35$  с;  $\beta_3 = 0,8$ ;  $k_4 = 0,25$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.57).

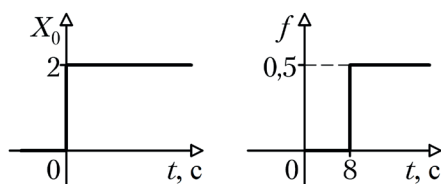


Рис. Е.57. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.58.

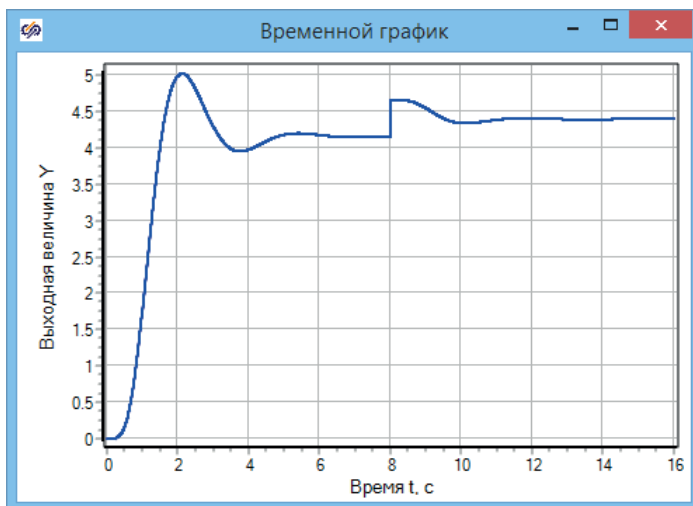


Рис. Е.58. График переходного процесса САР

## Е.22. Линейная САР (вариант 16)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.59.

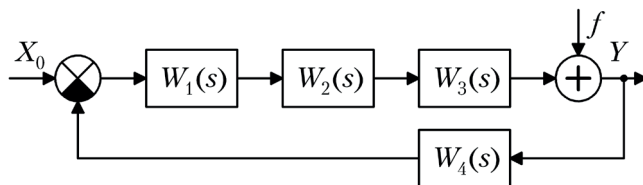


Рис. Е.59. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta_3 T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = k_4,$$

где  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 1$ ;  $T_2 = 1$  с;  $k_3 = 8$ ;  $T_3 = 0,8$  с;  $\beta_3 = 1,2$ ;  $k_4 = 0,3$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.60).

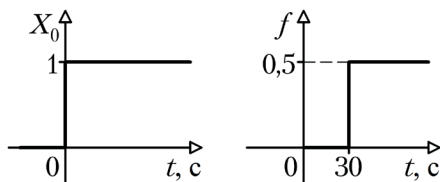


Рис. Е.60. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.61.

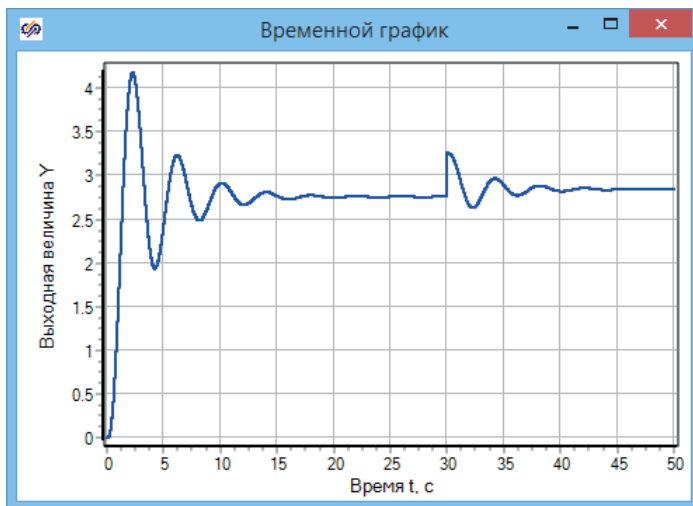


Рис. Е.61. График переходного процесса САР

## Е.23. Линейная САР (вариант 17)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.62.

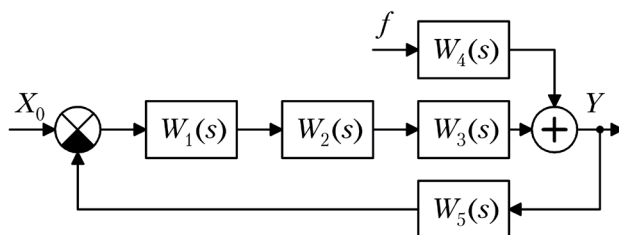


Рис. Е.62. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{s}; W_3(s) = \frac{k_3}{T_3 s + 1}; W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 0,2$ ;  $k_3 = 0,5$ ;  $T_3 = 50$  с;  $k_4 = 0,6$ ;  $T_4 = 50$  с;  $k_5 = 0,3$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.63).

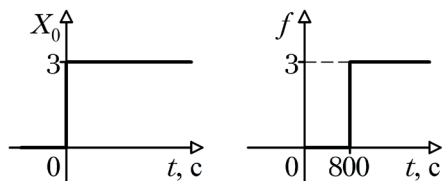


Рис. Е.63. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.64.

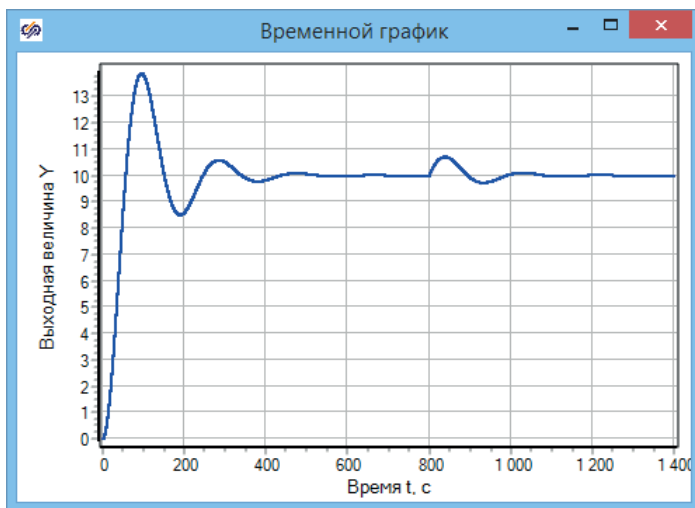


Рис. Е.64. График переходного процесса САР

## Е.24. Линейная САР (вариант 18)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.65.

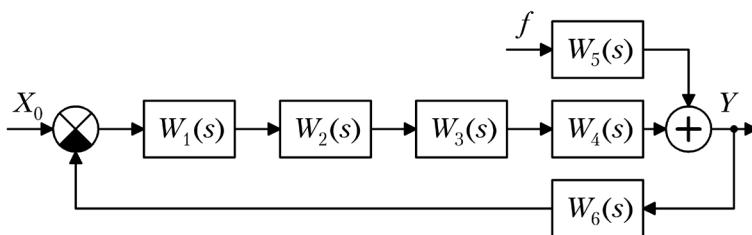


Рис. Е.65. Структурная схема САР



Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; W_3(s) = e^{-\tau s}; W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; W_5(s) = \frac{k_5}{T_5 s + 1}; W_6(s) = k_6,$$

где  $k_1 = 4$ ;  $k_2 = 3$ ;  $T_2 = 15$  с;  $\tau = 30$  с;  $k_4 = 0,5$ ;  $T_4 = 10$  с;  $k_5 = 1$ ;  $T_5 = 10$  с;  $k_6 = 0,1$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.66).

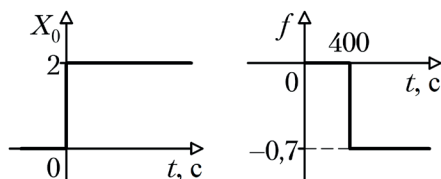


Рис. Е.66. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.67.

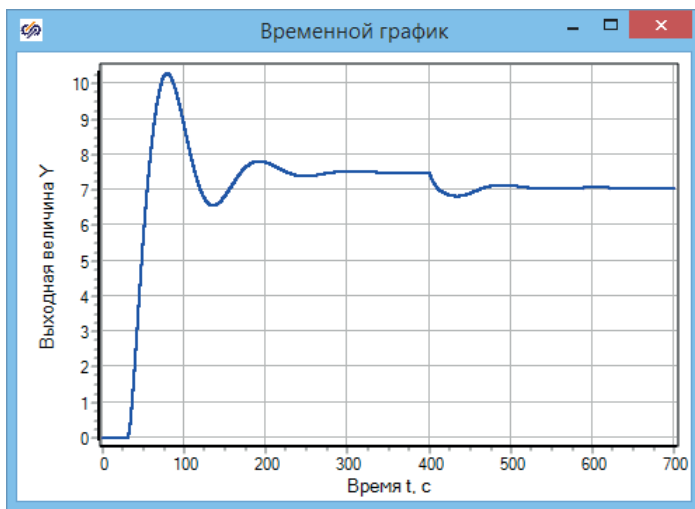


Рис. Е.67. График переходного процесса САР

## Е.25. Линейная САР (вариант 19)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.68.

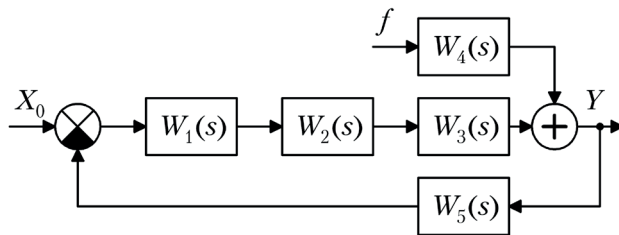


Рис. Е.68. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 2\beta_3 T_3 s + 1};$$

$$W_4(s) = \frac{k_4}{T_4^2 s^2 + 2\beta_4 T_4 s + 1}; \quad W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 6$ ;  $k_2 = 0,8$ ;  $T_2 = 50$  с;  $k_3 = 2$ ;  $T_3 = 18$  с;  $\beta_3 = 0,9$ ;  $k_4 = 1$ ;  $T_4 = 1$  с;  $\beta_4 = 1$ ;  $k_5 = 0,4$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.69).

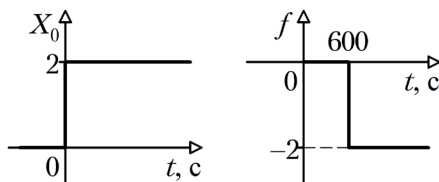


Рис. Е.69. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.70.

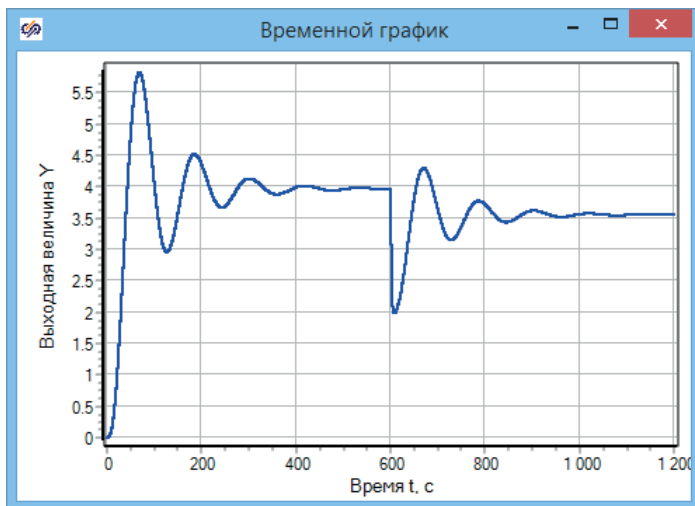


Рис. Е.70. График переходного процесса САР

## Е.26. Линейная САР (вариант 20)

Структурная схема САР приведена на рис. Е.71.

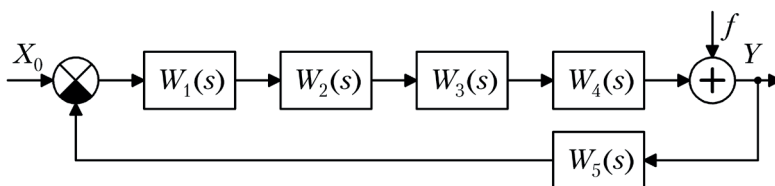


Рис. Е.71. Структурная схема САР

Передаточные функции САР:

$$W_1(s) = k_1; \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3 s + 1}; \quad W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}; \quad W_5(s) = k_5,$$

где  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 2$ ;  $T_2 = 12$  с;  $k_3 = 1,1$ ;  $T_3 = 25$  с;  $k_4 = 1,5$ ;  $T_4 = 11$  с;  $k_5 = 0,5$ .

Выполните моделирование САР в среде SimInTech при заданных входных воздействиях (рис. Е.72).

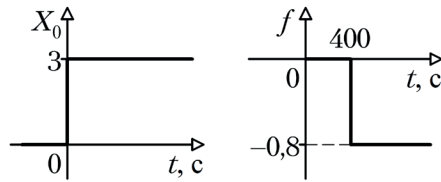


Рис. Е.72. Графики входных воздействий

Ответ: график переходного процесса показан на рис. Е.73.

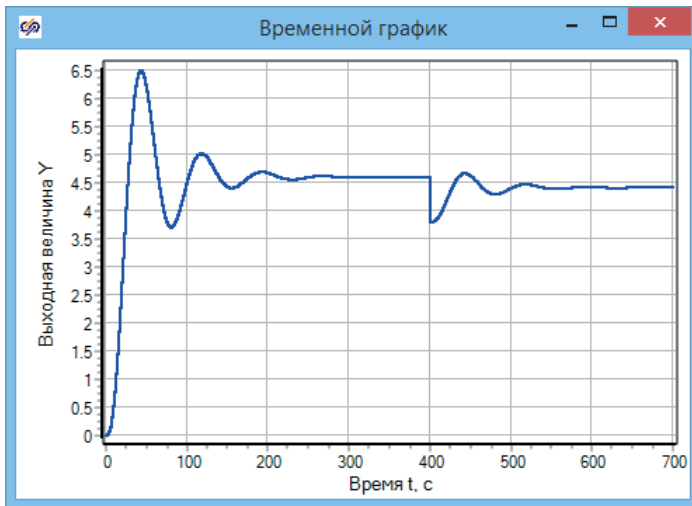


Рис. Е.73. График переходного процесса САП

# Фрагменты библиотек SimInTech

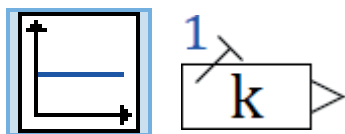


В данном приложении приведено описание выборочных блоков *общетехнической* библиотеки SimInTech из справочной системы программы [5]. В начале описания каждого блока представлены: **наименование**, пиктограмма блока в *палитре компонентов* и его изображение в *схемном окне*.

## Ж.1. Библиотека «Источники»

К библиотеке «Источники» отнесены типовые блоки, которые имитируют различные управляющие и возмущающие воздействия, действующие на систему. Для своей работы блоки этого типа не нуждаются во входных сигналах, поэтому не имеют портов входа.

**Константа**



Блок формирует на выходе заданную пользователем постоянную величину:

$$y(t) = k,$$

где  $y(t)$  – выходной сигнал блока.

Для работы блока необходимо задать величину константы  $k$  (по умолчанию  $k = 1$ ).

### Свойства:

- Значение – значение величины  $k$  на выходе блока.
- Тип данных (для генерации кода) – тип данных выходной переменной, создаваемой при генерации кода для внешней целевой системы. Постоянная величина (константа) при генерации кода может быть *действительным* числом (тип double), или *целым* числом (тип integer), или *логическим* сигналом (тип boolean).
- Название – название формируемой постоянной величины, для справки.

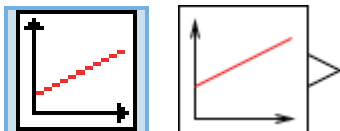
Свойство  $k$  может быть вектором:  $\vec{k} = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ , в этом случае на выходе будет также вектор:

$\vec{y}(t) = \vec{k}$  или  $y_i(t) = k_i$  при  $i = 1, 2, \dots, n$ .

**Примечания:**

1. По умолчанию блок формирует *скалярный* выходной сигнал.
2. Именованные свойства задаются как *локальные* переменные модели (или субмодели) на вкладке **Скрипт** или как *глобальные* сигналы проекта при помощи пункта главного меню **Сервис** → **Сигналы**.
3. Блок может быть использован для генерации кода на языке Си для внешней целевой системы.

**Линейный источник**



Блок векторизован, формирует значение выходного сигнала, вычисленное по формуле:

$$y(t) = a + bt,$$

где  $y(t)$  – выходной сигнал блока;  
 $t$  – текущее модельное время, с;  
 $a$  и  $b$  – коэффициенты.

**Свойства:**

- Свободный член – коэффициент  $a$ .
- Коэффициент при  $t$  – коэффициент  $b$ .

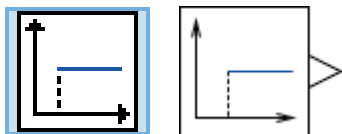
Свойства могут быть векторами  $\vec{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]$  и  $\vec{b} = [b_1, b_2, \dots, b_n]$ , размерности которых должны быть одинаковы, в этом случае на выходе будет также вектор:

$$\vec{y}(t) = \vec{a} + \vec{b}t \text{ или } y_i(t) = a_i + b_i t \text{ при } i = 1, 2, \dots, n.$$

**Примечания:**

1. По умолчанию блок формирует *скалярный* выходной сигнал.
2. Именованные свойства задаются как *локальные* переменные модели (или субмодели) на вкладке **Скрипт** или как *глобальные* сигналы проекта при помощи пункта главного меню **Сервис** → **Сигналы**.

**Ступенька**



Блок формирует значение выходного сигнала, вычисленное по алгоритму:

$$y(t) = \begin{cases} y_0, & \text{при } t \leq t_0; \\ y_1, & \text{при } t > t_0, \end{cases}$$

где  $y(t)$  – выходной сигнал блока;

$y_0$  – начальное значение;  
 $y_1$  – конечное значение;  
 $t$  – текущее модельное время, с;  
 $t_0$  – время срабатывания, с.

#### Свойства:

- Время срабатывания –  $t_0$ .
- Начальное состояние –  $y_0$ .
- Конечное состояние –  $y_1$ .

Свойства могут быть векторами  $\vec{t}_0 = [t_{01}, t_{02}, \dots, t_{0n}]$ ,  $\vec{y}_0 = [y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0n}]$  и  $\vec{y}_1 = [y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n}]$ , размерности которых должны быть одинаковы, в этом случае на выходе будет также вектор:

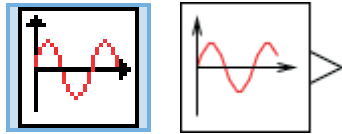
$$y_i(t) = \begin{cases} y_{0i}, & \text{при } t \leq t_{0i}; \\ y_{1i}, & \text{при } t > t_{0i}, \end{cases}$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

#### Примечания:

1. По умолчанию блок формирует *скалярный* выходной сигнал.
2. Именованные свойства задаются как *локальные* переменные модели (или субмодели) на вкладке **Скрипт** или как *глобальные* сигналы проекта при помощи пункта главного меню **Сервис** → **Сигналы**.

*Синусоида*



Блок векторизован, формирует синусоидальный выходной сигнал:

$$y(t) = a \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $y(t)$  – выходной сигнал блока;  
 $a$  – амплитуда синусоиды;  
 $\omega$  – угловая частота синусоиды, рад/с;  
 $t$  – текущее модельное время, с;  
 $\varphi$  – начальная фаза синусоиды, рад.

#### Свойства:

- Амплитуда – коэффициент  $a$ .
- Частота – коэффициент  $\omega$ .
- Фаза – коэффициент  $\varphi$ .

Свойства могут быть векторами  $\vec{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ ,  $\vec{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$  и  $\vec{\varphi} = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]$ , размерности которых должны быть одинаковы, в этом случае на выходе будет также вектор:

$$y_i(t) = a_i \sin(\omega_i t + \varphi_i),$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

**Примечания:**

1. По умолчанию блок формирует *скалярный* выходной сигнал.
2. Именованные свойства задаются как *локальные* переменные модели (или субмодели) на вкладке **Скрипт** или как *глобальные* сигналы проекта при помощи пункта главного меню **Сервис** → **Сигналы**.
3. Блок может быть использован для генерации кода на языке Си для внешней целевой системы.

## Ж.2. Библиотека «Операторы»

Блоки библиотеки предназначены для реализации в процессе моделирования простейших математических операций с сигналами.



Блок векторизован, реализует операцию алгебраического поэлементного суммирования входных сигналов с учетом весовых коэффициентов:

$$y(t) = a_1 u_1(t) + a_2 u_2(t) + \dots + a_n u_n(t),$$

где  $y(t)$  – выходной сигнал блока;

$u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)$  – входные сигналы блока;

$a_1, a_2, \dots, a_n$  – весовые коэффициенты для каждого входного сигнала блока.

**Свойства:**

- Весовые множители для каждого из входов – вектор действительных чисел, на которые умножаются значения входных сигналов блока. Число входных портов блока равно размерности этого массива.

Входные сигналы могут быть векторами  $\vec{u}_1 = [u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1m}]$ ,  $\vec{u}_2 = [u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2m}]$ , ...,  $\vec{u}_n = [u_{n1}, u_{n2}, \dots, u_{nm}]$ , размерности которых должны быть одинаковы, в этом случае на выходе будет также вектор:

$$y_i(t) = a_1 u_{1i}(t) + a_2 u_{2i}(t) + \dots + a_n u_{ni}(t),$$

где  $i = 1, 2, \dots, m$ ;

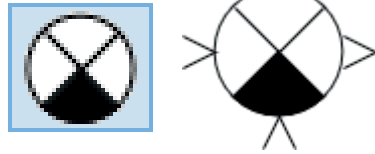
$y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного векторного сигнала блока;

$u_{1i}(t), u_{2i}(t), \dots, u_{ni}(t)$  –  $i$ -й элемент первого, второго и т. д. входного сигнала блока.

**Примечания:**

1. По умолчанию блок формирует выходной сигнал, равный сумме двух входных сигналов (весовых коэффициентов два, и оба равны 1).
2. Именованные свойства могут быть заданы как *локальные* переменные модели (субмодели) на вкладке **Скрипт**, как *глобальные* сигналы проекта при помощи пункта главного меню **Сервис** → **Сигналы** или как *внешние* сигналы проекта при помощи подключаемой базы сигналов.



**Сравнивающее устройство**

Блок векторизован, реализует (по умолчанию) поэлементное вычитание второго входного векторного сигнала из первого:

$$y(t) = u_1(t) - u_2(t),$$

где  $y(t)$  – выходной сигнал блока;

$u_1(t), u_2(t)$  – входные сигналы блока.

**Свойства:**

- Весовые множители для каждого из входов – вектор действительных чисел, на которые умножаются значения входных сигналов блока. Число входных портов блока равно размерности этого массива. По умолчанию весовые коэффициенты равны  $[1, -1]$  для реализации вычитания.

Входные сигналы могут быть векторами  $\vec{u}_1 = [u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1m}]$ ,  $\vec{u}_2 = [u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2m}]$ , ...,  $\vec{u}_n = [u_{n1}, u_{n2}, \dots, u_{nm}]$  размерности которых должны быть одинаковы, в этом случае на выходе будет также вектор:

$$y_i(t) = a_1 u_{1i}(t) + a_2 u_{2i}(t) + \dots + a_n u_{ni}(t),$$

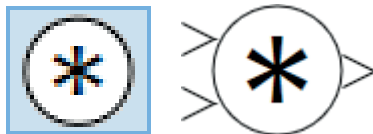
где  $i = 1, 2, \dots, m$ ;

$y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного векторного сигнала блока;

$u_{1i}(t), u_{2i}(t), \dots, u_{ni}(t)$  –  $i$ -й элемент первого, второго и т. д. входного сигнала блока.

**Примечания:**

1. По умолчанию блок формирует выходной сигнал, равный разности двух входных сигналов (весовых коэффициентов два, и они равны  $+1$  и  $-1$ ).
2. Именованные свойства могут быть заданы как *локальные* переменные модели (субмодели) на вкладке **Скрипт**, как *глобальные* сигналы проекта при помощи пункта главного меню **Сервис** → **Сигналы** или как *внешние* сигналы проекта при помощи подключаемой базы сигналов.

**Перемножитель**

Блок векторизован, реализует умножение входных сигналов блока (при скалярных сигналах на входе) или поэлементное умножение входных величин блока (при векторных сигналах на входе):

$$y(t) = u_1(t)u_2(t) \times \dots \times u_n(t) \text{ или } y_i(t) = u_{1i}(t)u_{2i}(t) \times \dots \times u_{ni}(t),$$

где  $y(t)$  – выходной скалярный сигнал блока;

$u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)$  – входные скалярные сигналы блока;

$i = 1, 2, \dots, m$ ;

$y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного векторного сигнала блока;

$u_{1i}(t), u_{2i}(t), \dots, u_{ni}(t)$  –  $i$ -й элемент первого, второго и т. д. векторного входного сигнала блока.

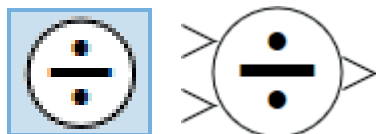
#### Свойства:

- Количество портов – количество входных портов блока  $n$  (целое натуральное число).

#### Примечания:

1. Размерность выходного сигнала всегда равна размерности входных сигналов. Блок формирует скалярный выходной сигнал при скалярных входных сигналах. Если входные сигналы векторные, то их размерности должны совпадать.
2. Именованное свойство может быть задано как *локальная* переменная модели (субмодели) на вкладке **Скрипт**, как *глобальный* сигнал проекта при помощи пункта главного меню **Сервис** → **Сигналы** или как *внешний* сигнал проекта при помощи подключаемой базы сигналов.

*Делитель*



Блок векторизован, реализует деление входных сигналов блока (при скалярных сигналах на входе) или поэлементное деление входных величин блока (при векторных сигналах на входе):

$$y(t) = u_1(t)/u_2(t) \text{ или } y_i(t) = u_{1i}(t)/u_{2i}(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $y(t)$  – выходной скалярный сигнал блока;

$u_1(t), u_2(t)$  – входные скалярные сигналы блока;

$y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного векторного сигнала блока;

$u_{1i}(t)$  и  $u_{2i}(t)$  –  $i$ -е элементы первого и второго векторных входных сигналов блока;

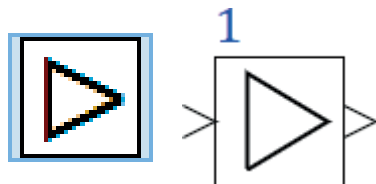
$n > 1$  – размерность входов и выхода.

**Обязательное условие:**  $u_{2i}(t) \neq 0$ .

**Свойства:** для работы блока свойства задавать не требуется.

**Примечание:** размерность выходного сигнала всегда равна размерности входных сигналов. Блок формирует скалярный выходной сигнал при скалярных входных сигналах. Если входные сигналы векторные, то их размерности должны совпадать.

*Усилитель*



Блок производит умножение (усиление) входной величины на заданный коэффициент усиления  $k$  (в случае скалярного сигнала на входе) или поэлементное умножение входного векторного сигнала на заданный коэффициент усиления  $k$ :

$$y(t) = ku(t) \text{ или } \tilde{y}(t) = k\tilde{u}(t) \Leftrightarrow y_i(t) = ku_i(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $y(t)$  – выходной скалярный сигнал блока;  
 $u(t)$  – входной скалярный сигнал блока;  
 $y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного векторного сигнала блока;  
 $u_i(t)$  –  $i$ -й элемент векторного входного сигнала блока;  
 $n$  – размерность входа и выхода.

#### Свойства:

- Коэффициент усиления – действительное число  $k$ , скалярный множитель для входной величины.

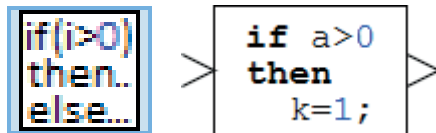
#### Примечания:

1. Размерность выходного сигнала равна размерности входного сигнала.
2. Именованное свойство может быть задано как *локальная* переменная модели (субмодели) на вкладке **Скрипт**, как *глобальный* сигнал проекта при помощи пункта главного меню **Сервис** → **Сигналы** или как *внешний* сигнал проекта при помощи подключаемой базы сигналов.

## Ж.3. Библиотека «Динамические»

В данную библиотеку включены типовые блоки, динамика которых описывается обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями, системами уравнений в переменных состояния и в форме Коши (линейными или нелинейными).

#### Язык программирования



Блок *Язык программирования* предназначен для создания блоков, выполняющих сложные операции, включая операции над матрицами, векторами, комплексными числами. Диалоговое окно этого блока – окно текстового редактора алгоритмов, в котором пользователь записывает математическую модель на встроенном языке программирования.

Блок позволяет реализовать произвольный алгоритм, написанный на встроенном языке программирования среды SimInTech. При генерации кода для блока может быть задан шаблон генерации произвольного кода на языке Си.

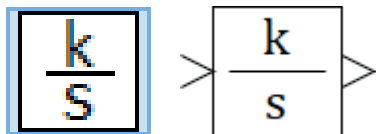
Подробнее о встроенном языке программирования см. в соответствующем разделе справки SimInTech.

#### Свойства (основные):

- Тип сортировки – флаг, определяющий порядок расчета блока в общей схеме.
- Заголовок модуля – заголовок текста при генерации кода, здесь декларируются специальные комментарии.

- Секция декларации переменных – текст, вставляемый в начало программы при генерации кода.
- Основная секция кода – основной текст программы при генерации кода для блока.
- Секция запоминания состояний – текст, вставляемый в конец программы при генерации кода, здесь производится вычисление переменных состояния.
- Декларации переменных – текст, вставляемый в select-файл для описания переменных состояния блока.
- Значения переменных по умолчанию – текст для установки начальных значений переменных состояния блока.

*Интегратор*



Блок векторизован, реализует математическую модель звена, динамика которого описывается линейным обыкновенным дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = k_i x_i(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного сигнала блока;

$k_i$  – элемент вектора коэффициентов усиления;

$x_i(t)$  –  $i$ -й элемент входного сигнала блока;

$n$  – размерность входа, выхода и вектора коэффициентов усиления.

При нулевых начальных условиях динамика блока может быть представлена следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{s} \text{ (интегратор),}$$

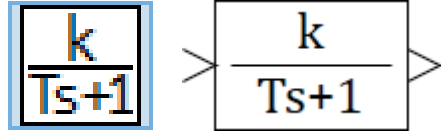
поэтому пиктограмма данного блока имеет вид передаточной функции идеально-го интегрирующего звена.

Размерности сигналов входа, выхода и вектора коэффициентов усиления должны совпадать.

#### **Свойства:**

- Коэффициенты усиления – вектор коэффициентов  $k_i$ , на который умножается входная величина.
- Начальные условия – вектор начальных значений  $y_i(0)$  выходной величины блока.

**Примечание:** по умолчанию блок реализует интегрирование скалярного входного сигнала.

**Инерционное звено 1-го порядка**

Блок векторизован, реализует математическую модель звена, динамика которого описывается линейным обыкновенным дифференциальным уравнением вида:

$$T_i \frac{dy_i(t)}{dt} + y_i(t) = k_i x_i(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $T_i$  – элемент вектора постоянных времени, с;

$y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного сигнала блока;

$k_i$  – элемент вектора коэффициентов усиления;

$x_i(t)$  –  $i$ -й элемент входного сигнала блока;

$n$  – размерность входа, выхода, векторов постоянных времени и коэффициентов усиления.

При нулевых начальных условиях динамика блока может быть представлена следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} \text{ (апериодика 1-го порядка),}$$

поэтому пиктограмма данного блока имеет вид передаточной функции апериодического звена 1-го порядка.

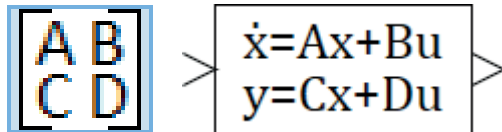
Размерности сигналов входа, выхода, векторов постоянных времени и коэффициентов усиления должны совпадать.

**Обязательное условие:**  $T_i \neq 0$ .

**Свойства:**

- Коэффициенты усиления – вектор коэффициентов  $k_i$ , на который умножается входная величина.
- Постоянные времени – вектор постоянных времени  $T_i$  в секундах.
- Начальные условия – вектор начальных значений  $y_i(0)$  выходной величины блока.

**Примечание:** по умолчанию блок реализует «инерцию» скалярного входного сигнала.

**Переменные состояния**

Блок реализует описание многомерной линейной динамической системы в матричной форме:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) = Cx(t) + Du(t), \end{cases}$$

где  $A, B, C, D$  – матрицы: системы, входа, выхода и обхода соответственно;

$x(t)$  – вектор переменных состояния (размерностью  $[N_x]$ );

$u(t)$  – вектор входа (размерностью  $[N_u]$ );

$y(t)$  – вектор выхода (размерностью  $[N_y]$ ).

Размерность матрицы  $A$  –  $[N_x \times N_x]$ .

Размерность матрицы  $B$  –  $[N_u \times N_x]$ .

Размерность матрицы  $C$  –  $[N_x \times N_y]$ .

Размерность матрицы  $D$  –  $[N_u \times N_y]$ .

**Примечание:** первое число в квадратных скобках – количество столбцов, второе число – количество строк.

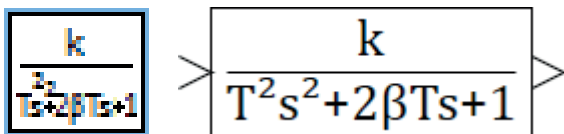
**Обязательное условие:**  $N_x \geq N_y$ .

Вход и выход блока – векторные сигналы (размерностью  $[N_u]$  и  $[N_y]$  соответственно).

**Свойства:**

- Число переменных состояния –  $N_x$ .
- Число входных воздействий –  $N_u$ .
- Число выходов –  $N_y$ .
- Матрица  $A(N_x \times N_x)$ .
- Матрица  $B(N_u \times N_x)$ .
- Матрица  $C(N_x \times N_y)$ .
- Матрица  $D(N_u \times N_y)$ .
- Начальные условия ( $N_x$ ) – вектор начальных условий размерностью  $[N_x]$ .

**Колебательное звено**



Блок векторизован, реализует математическую модель звена, динамика которого описывается линейным обыкновенным дифференциальным уравнением вида:

$$T_i^2 \frac{d^2 y_i(t)}{dt^2} + 2\beta_i T_i \frac{dy_i(t)}{dt} + y_i(t) = k_i x_i(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $T_i$  – элемент вектора постоянных времени, с;

$y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного сигнала блока;

$\beta_i$  – элемент вектора коэффициентов демпфирования;

$k_i$  – элемент вектора коэффициентов усиления;

$x_i(t)$  –  $i$ -й элемент входного сигнала блока;

$n$  – размерность входа, выхода, векторов постоянных времени, коэффициентов демпфирования и усиления.

При нулевых начальных условиях динамика блока может быть представлена следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\beta Ts + 1},$$

поэтому пиктограмма данного блока имеет вид передаточной функции типового колебательного звена.

Размерности сигналов входа, выхода, векторов постоянных времени, коэффициентов демпфирования и усиления должны совпадать.

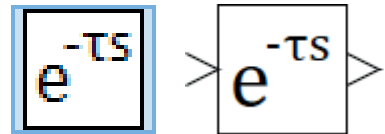
**Обязательное условие:**  $T_i \neq 0$ .

**Свойства:**

- Коэффициенты усиления – вектор коэффициентов  $k_i$ , на который умножается входная величина.
- Постоянные времени – вектор постоянных времени в  $T_i$  секундах.
- Коэффициент демпфирования – вектор коэффициентов  $\beta_i$ .
- Начальные условия – вектор начальных значений  $y_i(0)$  выходной величины блока.
- Начальные условия по производной – вектор начальных условий для производной выходной величины  $y'_i(0)$  блока.

**Примечание:** по умолчанию свойства блока заданы для скалярного входного сигнала.

*Идеальное транспортное запаздывание*



Блок векторизован, реализует математическую модель звена, динамика которого описывается линейным уравнением с запаздыванием:

$$y_i(t) = x_i(t - \tau_i) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного сигнала блока;

$x_i(t)$  –  $i$ -й элемент входного сигнала блока;

$x_i(t - \tau_i)$  – значение  $i$ -го элемента входного сигнала, запомненное в блоке  $\tau_i$  секунд назад, по отношению к текущему модельному времени;

$\tau_i$  – элемент вектора времен запаздывания;

$n$  – размерность входа, выхода и вектора времен запаздывания.

При нулевых начальных условиях динамика блока может быть представлена следующей передаточной функцией (для скалярного варианта сигналов):

$$W(s) = e^{-\tau s},$$

поэтому пиктограмма данного блока имеет аналогичный вид.

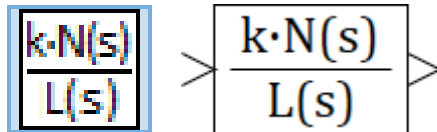
Размерности сигналов входа, выхода и вектора времен запаздывания должны совпадать.

**Свойства:**

- Время запаздывания – вектор времен запаздывания  $\tau_i$  в секундах.
- Начальный размер стека – начальный размер массива, в котором сохраняются входные данные блока.

**Примечание:** по умолчанию блок реализует «запаздывание» скалярного входного сигнала.

*Передающая функция  
общего вида*



Блок реализует математическую модель звена, динамика которого (для каждого скалярного сигнала) описывается линейным обыкновенным дифференциальным уравнением вида:

$$L(s)y(t) = N(s)x(t);$$

$$L(s)y(t) = a_0 y(t) + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \dots + a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n};$$

$$N(s)x(t) = b_0 x(t) + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \dots + b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m},$$

где  $y(t)$  – выходной сигнал блока;

$x(t)$  – входной сигнал блока (может быть векторным, тогда и векторы коэффициентов, и выход блока тоже будут векторными той же размерности);

$a_i, b_j$  – коэффициенты ( $i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 0, 1, 2, \dots, m; n \geq m$ ).

При нулевых начальных условиях динамика блока может быть представлена следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}.$$

Размерности сигналов входа, выхода и векторов коэффициентов должны совпадать.

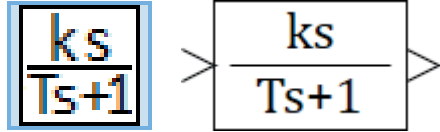
**Свойства:**

- Коэффициенты числителя – вектор  $b_j$  размерностью  $[m]$ .
- Коэффициенты знаменателя – вектор  $a_i$  размерностью  $[n]$ .
- Начальные условия – вектор начальных значений  $y_i(0)$  выходной величины блока.

**Примечание:**

- Коэффициенты  $a_i$  и  $b_j$  вводятся по возрастающим степеням  $s$ .
- По умолчанию блок реализует обработку скалярного входного сигнала.



**Инерционно-дифференцирующее звено**

Блок векторизован, реализует математическую модель звена, динамика которого описывается линейным обыкновенным дифференциальным уравнением вида:

$$T_i \frac{dy_i(t)}{dt} + y_i(t) = k_i \frac{dx_i(t)}{dt} \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $T_i$  – элемент вектора постоянных времени, с;

$y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного сигнала блока;

$k_i$  – элемент вектора коэффициентов усиления;

$x_i(t)$  –  $i$ -й элемент входного сигнала блока;

$n$  – размерность входа, выхода, векторов постоянных времени и коэффициентов усиления.

При нулевых начальных условиях динамика блока может быть представлена следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{ks}{Ts + 1},$$

поэтому пиктограмма данного блока имеет вид передаточной функции инерционно-дифференцирующего звена.

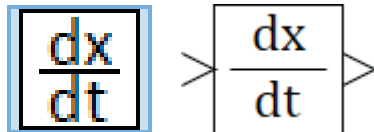
Размерности сигналов входа, выхода и вектора коэффициентов должны совпадать.

**Обязательное условие:**  $T_i \neq 0$ .

**Свойства:**

- Коэффициенты усиления – вектор коэффициентов  $k_i$ , на который умножается входная величина.
- Постоянные времени – вектор постоянных времени  $T_i$  в секундах.
- Начальные условия – вектор начальных значений  $y_i(0)$  выходной величины блока.

**Примечание:** по умолчанию свойства блока заданы для скалярного входного сигнала.

**Производная**

Блок реализует численное определение производной на каждом временном шаге как отношение приращений  $\Delta x_i(t)$  динамической переменной и времени  $\Delta t$ :

$$y_i(t) = \frac{dx_i(t)}{dt} = \frac{\Delta x_i(t)}{\Delta t} \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного сигнала блока;

$x_i(t)$  –  $i$ -й элемент входного сигнала блока;

$n$  – размерность входа и выхода.

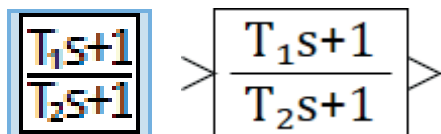
Размерности сигналов входа и выхода совпадают.

**Свойства:**

- Начальные условия – вектор начальных значений  $y_i(0)$  выходной величины блока.

**Примечание:** по умолчанию блок реализует вычисление производной для скалярного входного сигнала.

*Инерционно-форсирующее звено*



Блок реализует математическую модель звена, динамика которого описывается линейным обыкновенным дифференциальным уравнением вида:

$$T_{2i} \frac{dy_i(t)}{dt} + y_i(t) = T_{1i} \frac{dx_i(t)}{dt} + x_i(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $T_{1i}$ ,  $T_{2i}$  – элементы векторов постоянных времени, с;

$y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного сигнала блока;

$x_i(t)$  –  $i$ -й элемент входного сигнала блока;

$n$  – размерность входа, выхода и векторов постоянных времени.

При нулевых начальных условиях и для скалярного входного сигнала динамика блока может быть представлена следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}.$$

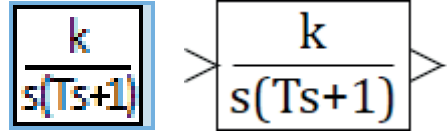
Размерности сигналов входа, выхода и векторов постоянных времени должны совпадать.

**Обязательное условие:**  $T_{2i} \neq 0$ .

**Свойства:**

- Постоянная времени  $T_1$  – вектор постоянных времени  $T_{1i}$  в секундах.
- Постоянная времени  $T_2$  – вектор постоянных времени  $T_{2i}$  в секундах.
- Начальные условия – вектор начальных значений  $y_i(0)$  выходной величины блока.

**Примечание:** по умолчанию блок реализует «инерционное форсирование» скалярного входного сигнала.

**Инерционно-интегрирующее звено**

Блок векторизован, реализует математическую модель звена, динамика которого описывается линейным обыкновенным дифференциальным уравнением вида:

$$T_i \frac{d^2 y_i(t)}{dt^2} + \frac{dy_i(t)}{dt} = k_i x_i(t) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $T_i$  – элемент вектора постоянных времени, с;

$y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного сигнала блока;

$k_i$  – элемент вектора коэффициентов усиления;

$x_i(t)$  –  $i$ -й элемент входного сигнала блока;

$n$  – размерность входа, выхода, векторов постоянных времени и коэффициентов усиления.

При нулевых начальных условиях динамика блока может быть представлена следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)},$$

поэтому пиктограмма данного блока имеет вид передаточной функции инерционно-интегрирующего звена.

Размерности сигналов входа, выхода, векторов постоянных времени и коэффициентов усиления должны совпадать.

**Обязательное условие:**  $T_i \neq 0$ .

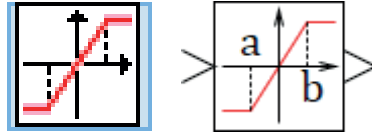
**Свойства:**

- Коэффициенты усиления – вектор коэффициентов  $k_i$ , на который умножается входная величина.
- Постоянные времени – вектор постоянных времени  $T_i$  в секундах.
- Начальные условия – вектор начальных значений  $y_i(0)$  выходной величины блока.
- Начальные условия по производной – вектор начальных условий для производной выходной величины  $y'_i(0)$  блока.

**Примечание:** по умолчанию свойства блока заданы для скалярного входного сигнала.

## Ж.4. Библиотека «Нелинейные»

В данную библиотеку включены основные нелинейные звенья, несколько вариантов блоков сохранения минимума и максимума, звено переменного запаздывания, а также ряд других блоков, условно отнесенных к этой библиотеке.

**Линейное с насыщением**

Блок реализует алгоритм линейного звена с насыщением:

$$y(t) = \begin{cases} y_1, & \text{если } x(t) \leq a; \\ kx(t), & \text{если } a < x(t) < b; \\ y_2, & \text{если } x(t) \geq b, \end{cases}$$

где  $y(t)$  – вектор выходных сигналов блока;

$a, b, y_1, y_2$  – параметры статической характеристики блока (рис. Ж.1);

$k = (y_2 - y_1)(b - a)$  – коэффициент усиления;

$x(t)$  – вектор входных сигналов блока.

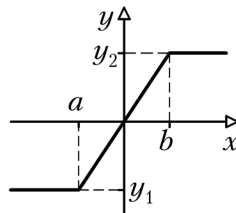
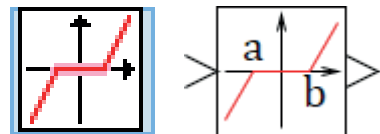


Рис. Ж.1. Статическая характеристика блока

**Свойства:**

- Нижняя граница аргумента – параметр  $a$ .
- Верхняя граница аргумента – параметр  $b$ .
- Нижнее значение функции – параметр  $y_1$ .
- Верхнее значение функции – параметр  $y_2$ .

**Примечание:** для реализации векторной обработки преобразуемые сигналы должны быть «сжаты» в векторный входной сигнал посредством типового блока «Мультиплексор».

**Линейное с зоной нечувствительности**

Блок реализует преобразование вектора входных сигналов посредством единой нелинейной статической характеристики типа «линейная с зоной нечувствительности» по следующему алгоритму:

$$y(t) = \begin{cases} k[x(t) - a], & \text{если } x(t) < a; \\ 0, & \text{если } a \leq x(t) \leq b; \\ k[x(t) - b], & \text{если } x(t) > b, \end{cases}$$

где  $y(t)$  – вектор выходных сигналов блока;

$k$  – коэффициент усиления;

$a, b$  – параметры статической характеристики блока (рис. Ж.2);

$x(t)$  – вектор входных сигналов блока.

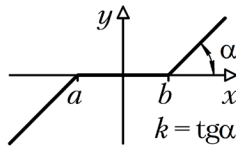


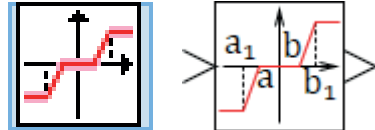
Рис. Ж.2. Статическая характеристика блока

#### Свойства:

- Нижняя граница аргумента – параметр  $a$ .
- Верхняя граница аргумента – параметр  $b$ .
- Коэффициент усиления – параметр  $k$ .

**Примечание:** для реализации векторной обработки преобразуемые сигналы должны быть «сжаты» в векторный входной сигнал посредством типового блока «Мультиплексор».

#### *Линейное с насыщением и зоной нечувствительности*



Блок реализует преобразование вектора входных сигналов посредством единой нелинейной статической характеристики типа «линейная с насыщением и зоной нечувствительности» по следующему алгоритму:

$$y(t) = \begin{cases} y_1, & \text{если } x(t) \leq a_1; \\ k_1[x(t) - a], & \text{если } a_1 < x(t) < a; \\ 0, & \text{если } a \leq x(t) \leq b; \\ k_2[x(t) - b], & \text{если } b < x(t) < b_1; \\ y_2, & \text{если } x(t) \geq b_1, \end{cases}$$

где  $y(t)$  – вектор выходных сигналов блока;

$a, a_1, b, b_1, y_1, y_2$  – параметры статической характеристики блока (рис. Ж.3);

$k_1 = y_1/(a_1 - a)$ ,  $k_2 = y_2/(b_1 - b)$  – коэффициенты усиления;

$x(t)$  – вектор входных сигналов блока.

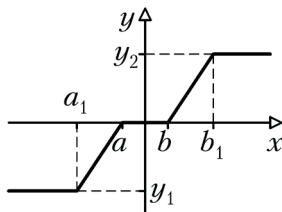
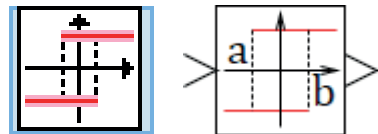


Рис. Ж.3. Статическая характеристика блока

**Свойства:**

- Нижняя граница ограничения – параметр  $a_1$ .
- Нижняя граница зоны нечувствительности – параметр  $a$ .
- Верхняя граница зоны нечувствительности – параметр  $b$ .
- Верхняя граница ограничения – параметр  $b_1$ .
- Нижнее значение функции – параметр  $y_1$ .
- Верхнее значение функции – параметр  $y_2$ .

**Примечание:** для реализации векторной обработки преобразуемые сигналы должны быть «сжаты» в векторный входной сигнал посредством типового блока «Мультиплексор».

**Релейное неоднозначное (гистерезис)**

Блок реализует преобразование входных сигналов посредством единой нелинейной статической характеристики типа «релейная неоднозначная» при различных начальных условиях по следующему алгоритму:

$$y(t) = \begin{cases} y_1, & \text{если } x(t) < a; \\ y(t - \Delta t), & \text{если } a \leq x(t) \leq b; \\ y_2, & \text{если } x(t) > b, \end{cases}$$

где  $y(t)$  – вектор выходных сигналов блока;

$a, b, y_1, y_2$  – параметры статической характеристики блока (рис. Ж.4);

$\Delta t$  – предыдущий временной шаг интегрирования;

$x(t)$  – вектор входных сигналов блока.

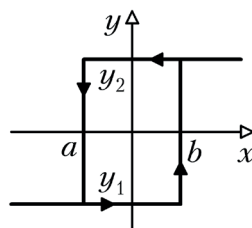


Рис. Ж.4. Статическая характеристика блока

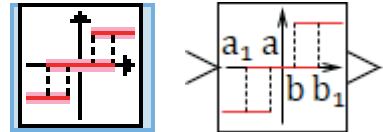
**Свойства:**

- Нижняя граница переключения – параметр  $a$  (минимальное значение входной величины, при котором значение на выходе равно нижнему значению).
- Верхняя граница переключения – параметр  $b$  (максимальное значение входной величины, при котором значение на выходе равно верхнему значению).

- Нижнее значение функции – параметр  $y_1$  (минимальное значение на выходе блока).
- Верхнее значение функции – параметр  $y_2$  (максимальное значение на выходе блока).
- Начальные условия  $(0;1)$  – начальное состояние реле: 0 – выключено, 1 – включено.

**Примечание:** для реализации векторной обработки преобразуемые сигналы должны быть «сжаты» в векторный входной сигнал посредством типового блока «Мультиплексор».

### *Релейное с зоной нечувствительности*



Блок реализует преобразование входных сигналов посредством единой нелинейной статической характеристики типа «релейная неоднозначная с зоной нечувствительности» при различных начальных условиях по следующему алгоритму:

$$y(t) = \begin{cases} y_1, & \text{если } x(t) < a_1; \\ 0, & \text{если } a < x(t) < b; \\ y(t - \Delta t), & \text{если } a_1 \leq x(t) \leq b \text{ или если } b \leq x(t) \leq b_1; \\ y_2, & \text{если } x(t) > b_1, \end{cases}$$

где  $y(t)$  – вектор выходных сигналов блока;

$a, a_1, b, b_1, y_1, y_2$  – параметры статической характеристики блока (рис. Ж.5);

$\Delta t$  – предыдущий временной шаг интегрирования;

$x(t)$  – вектор входных сигналов блока.

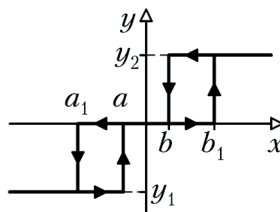


Рис. Ж.5. Статическая характеристика блока

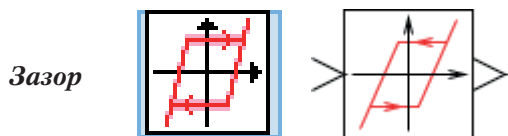
При наличии «перехлеста» зон возврата процесс переключения определяется с учетом предыдущего состояния реле.

### **Свойства:**

- Нижняя граница переключения – параметр  $a_1$  (минимальное значение входной величины, при котором значение на выходе равно нижнему значению).
- Нижняя граница зоны нечувствительности – параметр  $a$ .

- Верхняя граница зоны нечувствительности – параметр  $b$ .
- Верхняя граница переключения – параметр  $b_1$  (максимальное значение входной величины, при котором значение на выходе равно верхнему значению).
- Нижнее значение функции – параметр  $y_1$  (минимальное значение на выходе блока).
- Верхнее значение функции – параметр  $y_2$  (максимальное значение на выходе блока).
- Начальные условия  $(0;1)$  – начальное состояние реле: 0 – выключено, 1 – включено.

**Примечание:** для реализации векторной обработки преобразуемые сигналы должны быть «сжаты» в векторный входной сигнал посредством типового блока «Мультиплексор».



Блок реализует преобразование вектора входных сигналов посредством единой нелинейной статической характеристики типа «Зазор» при различных начальных условиях по следующему алгоритму:

$$y(t) = \begin{cases} k[x(t) - b], & \text{если } x(t) > \frac{y(t - \Delta t)}{k} + b; \\ y(t - \Delta t), & \text{если } \frac{y(t - \Delta t)}{k} - b \leq x(t) \leq \frac{y(t - \Delta t)}{k} + b; \\ k[x(t) + b], & \text{если } x(t) < \frac{y(t - \Delta t)}{k} - b, \end{cases}$$

где  $y(t)$  – вектор выходных сигналов блока;

$k = \operatorname{tg} \alpha$  – коэффициент усиления;

$b$  – параметр статической характеристики блока (рис. Ж.6);

$\Delta t$  – предыдущий временной шаг интегрирования;

$x(t)$  – вектор входных сигналов блока.

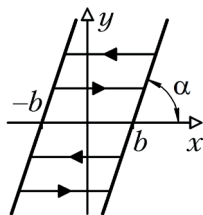


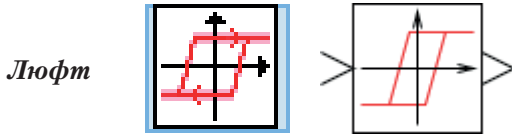
Рис. Ж.6. Статическая характеристика блока



**Свойства:**

- Половина ширины зоны зазора – параметр  $b$ .
- Коэффициент усиления – параметр  $k$ .
- Начальные условия – вектор начальных условий  $y(0)$ .

**Примечание:** для реализации векторной обработки преобразуемые сигналы должны быть «сжаты» в векторный входной сигнал посредством типового блока «Мультиплексор».



Блок реализует преобразование вектора входных сигналов посредством единой нелинейной статической характеристики типа «Люфт» при различных начальных условиях по следующему алгоритму:

$$y(t) = \begin{cases} y_1, & \text{если } x(t) \leq \frac{y_1}{k} - b; \\ k[x(t) - b], & \text{если } \frac{y(t - \Delta t)}{k} + b < x(t) < \frac{y_2}{k} + b; \\ y(t - \Delta t), & \text{если } \frac{y(t - \Delta t)}{k} - b \leq x(t) \leq \frac{y(t - \Delta t)}{k} + b; \\ k[x(t) + b], & \text{если } \frac{y_1}{k} - b < x(t) < \frac{y(t - \Delta t)}{k} - b; \\ y_2, & \text{если } x(t) \geq \frac{y_2}{k} + b, \end{cases}$$

где  $y(t)$  – вектор выходных сигналов блока;

$k = \operatorname{tg} \alpha$  – коэффициент усиления;

$b, y_1, y_2$  – параметры статической характеристики блока (рис. Ж.7);

$\Delta t$  – предыдущий временной шаг интегрирования;

$x(t)$  – вектор входных сигналов блока.

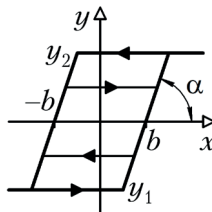
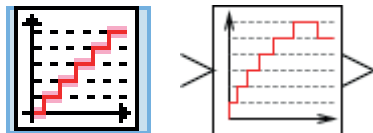


Рис. Ж.7. Статическая характеристика блока

**Свойства:**

- Половина ширины люфта – параметр  $b$ .
- Коэффициент усиления – параметр  $k$ .
- Нижнее значение функции – параметр  $y_1$ .
- Верхнее значение функции – параметр  $y_2$ .
- Начальные условия – вектор начальных условий  $y(0)$ .

**Примечание:** для реализации векторной обработки преобразуемые сигналы должны быть «сжаты» в векторный входной сигнал посредством типового блока «Мультиплексор».

**Квантователь по уровню**

Блок производит квантование сигнала по дискретным уровням с заданным шагом по уровню. Алгоритм работы блока:

$$y_i(t) = d_i \operatorname{sign}[x_i(t)] \operatorname{floor} \left( \left| \frac{x_i(t)}{d_i} \right| + 0,5 \right) \text{ при } i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $y_i(t)$  –  $i$ -й элемент выходного сигнала блока;

$d_i$  –  $i$ -й элемент вектора шагов квантования по уровню;

$\operatorname{sign}$  – функция знака;

$\operatorname{floor}$  – функция округления до меньшего целого числа;

$x_i(t)$  –  $i$ -й элемент входного сигнала блока;

$n$  – размерность входа, выхода и вектора шагов квантования по уровню.

**Свойства:**

- Шаг квантования – вектор  $\vec{d}$  шагов квантования по каждому элементу входного вектора. Размерность свойства должна совпадать с размерностью входного вектора.

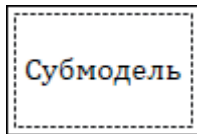
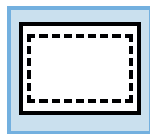
**Примечания:**

1. По умолчанию блок реализует обработку скалярного входного сигнала.
2. С использованием данного блока несложно реализовать алгоритм обработки сигналов в аналого-цифровом преобразователе.

## Ж.5. Библиотека «Субструктуры»

Блоки библиотеки предназначены: во-первых, для создания и функционирования многоуровневых структурных схем; во-вторых, для организации передачи данных посредством механизма *глобальных* переменных; в-третьих, для формирования именованных областей памяти.

*Субмодель*



Блок формирует «оболочку» для создания вложенной схемы, набранной как из типовых блоков, так и из *Субмоделей* более глубокого уровня вложенности.

Количество входов и выходов данного блока определяется автоматически при наполнении внутренней структуры блока типовыми блоками *Порт входа* и *Порт выхода*.

Открытие диалогового окна блока проводится в следующей последовательности:

- переместите курсор мыши на *Субмодель* и выполните однократный щелчок *правой* клавишей мыши: откроется контекстное меню блока;
- переместите курсор мыши на опцию **Свойства** и выполните однократный щелчок *левой* клавишей мыши: откроется диалоговое окно данного блока.

Блок (как и многие другие блоки) имеет следующие свойства:

- Графическое изображение – предназначено для изменения типовой пиктограммы блока на любую оригинальную пиктограмму.
- Имя объекта – имя блока в *схемном окне*. Имя субмодели влияет на глобальные имена блоков, расположенных внутри субмодели: *глобальные* имена вложенных в субмодель блоков будут иметь вид **<Имя субмодели>.<Имя блока>** (через символ «точка»). Более глубокий уровень вложенности имеет аналогичный вид.
- Тип элемента – наименование типа элемента. Используется, например, при разработке собственных типовых моделей, собственных блоков на базе субмодели.
- Подсказка – текст, выводимый как подсказка при наведении курсора мыши на блок в *схемном окне*.
- Видимость при выполнении – флаг отображения блока при выполнении расчета (моделирования).
- Цвет – цвет блока на *схемном окне*. При наличии пиктограммы это цвет фона.
- Координаты точек – свойство чаще используется как справочное или для точного размещения (позиционирования) блока на схеме.
- Угол поворота – угол поворота пиктограммы блока на *схемном окне*.
- Ширина – ширина пиктограммы блока на схеме.
- Высота – высота пиктограммы блока на схеме.
- Показывать рамку – флаг отображения рамки у изображения блока на схеме.
- Цвет рамки – цвет рамки блока на *схемном окне*.
- Подпись блока – текст (строка), выводимый(ая) в качестве подписи рядом с блоком на схеме. Может быть размещен(а) произвольно, но относительно блока и остается привязанным(ой) к нему при перемещении блока. Стиль

(шрифт, цвет, выравнивание) подписи задается другими (соседними) свойствами.

- Стиль подписи – указывает, что именно выводить в качестве подписи блока.
- Имя файла субмодели – позволяет хранить и редактировать схему субмодели в отдельном файле.

Внутреннее *схемное окно* субмодели «открывается» следующими способами:

- двукратным щелчком *левой* клавишей мыши в поле блока. Двукратный щелчок мыши на пустом месте открывшегося *схемного окна* субмодели возвращает на предыдущий (верхний) уровень схемы;
- из пункта выпадающего контекстного меню **Действия** → **Войти в субмодель**.

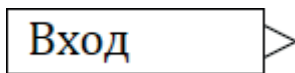
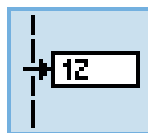
Закрытие внутренней структуры субмодели производится двумя способами:

- двукратным щелчком *левой* клавишей мыши в свободном месте *субмодельного схемного окна*;
- нажатием кнопки  «Стрелка вверх» в *панели инструментов схемного окна*.

### Примечания:

1. Более подробную информацию о процедурах работы с данным блоком см. в 5-м разделе «Приёмы работы», п. 5.1 «Понятие “Субмодель”», справочной системы SimInTech.
2. Возможный уровень вложенности субмоделей друг в друга не ограничен.

*Порт входа*



Блок используется внутри субмодели и определяет наличие у нее входного порта. Служит для соединения внешней части схемы со схемой, находящейся внутри субмодели.

Блок организует:

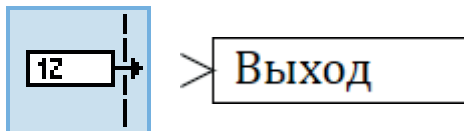
- прием данных от типовых блоков и субмоделей, внешних по отношению к данной;
- передачу данных для преобразования типовыми блоками (или субмоделями) внутренней структуры данной субмодели.

Количество блоков *Порт входа* автоматически определяет количество входов в данную субмодель.

При закрытии внутреннего схемного окна автоматически происходит «перерисовка» изображения данной субмодели.

Блок *Порт входа* может обрабатывать как скалярные, так и векторные входные сигналы.

**Примечание:** рекомендуется сразу же после переноса блока из *палитры компонентов* в *схемное окно* присвоить этому блоку «уникальное» имя: например, **Вход № 1**. Для указания имени порта соединения необходимо произвести двойной щелчок по блоку.

**Порт выхода**

Блок используется внутри субмодели и определяет наличие у нее выходного порта.

Служит для соединения внешней части схемы со схемой, находящейся внутри субмодели.

Блок организует:

- прием данных от типовых блоков и субмоделей внутренней структуры данной субмодели;
- передачу данных для преобразования типовыми блоками (или субмоделями), внешними по отношению к данной субмодели.

Количество блоков *Порт выхода* автоматически определяет количество выходов из данной субмодели.

При закрытии внутреннего схемного окна автоматически происходит «перерисовка» изображения данной субмодели.

Блок *Порт выхода* может обрабатывать как скалярные, так и векторные сигналы.

**Примечание:** рекомендуется сразу же после переноса блока из *палитры компонентов* в *схемное окно* присвоить этому блоку «уникальное» имя, например **Выход № 1**. Для указания имени порта соединения необходимо произвести двойной щелчок по блоку.

**Комментарий**

Блок является сервисным, при помощи него можно вставить в любое место схемы произвольный комментарий в формате RTF.

Для редактирования комментария необходимо произвести двойной щелчок по блоку.

Блок фактически является сервисным и предоставляет возможность пользователю выполнить поясняющие текстовые сообщения в специальном текстовом окне. Для ввода текстового сообщения необходимо:

- перенести из *палитры компонентов* в *схемное окно* (*главное* или *субмодельное*) блок *Комментарий*, расположив его на желаемое место;
- переместить курсор мыши на блок *Комментарий* и выполнить двукратный щелчок *левой* клавишей мыши: откроется специальное текстовое окно с заголовком «Редактор комментариев»;
- ввести необходимый текст, поясняющий решаемую задачу в среде SimIn-Tech;

- закрыть специальное текстовое окно с заголовком «Редактор комментариев», выбрав пункт меню **Файл** → **Закрыть**.

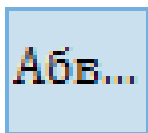
Примеры оформления поясняющих комментариев к решаемой задаче рекомендуется посмотреть в любом демопримере SimInTech (каталог «Демо»).

Подпись под блоком *Комментарий* на *схемном окне* выполняется таким же образом, как и для блока *Заметка*, а именно:

- выделить блок *Комментарий* однократным щелчком *левой* клавиши мыши;
- переместить курсор мыши под пиктограмму и выполнить двукратный щелчок *левой* клавишей мыши в тот момент, когда появится указатель курсора мыши с вопросительным знаком: откроется текстовое окно;
- ввести требуемое текстовое сообщение (например, «Информация о проекте») и закрыть текстовое окно, выполнив двукратный щелчок *левой* клавишей мыши в свободном месте *схемного окна*.

**Примечание:** тип, размер и цвет введенного текстового сообщения под блоком *Комментарий* устанавливаются (редактируются) при выделенном блоке *Комментарий* посредством меню свойств блока (как и для всех других блоков).

*Заметка*



**Текст**

Блок является сервисным и предоставляет возможность выполнить поясняющие текстовые сообщения в любом месте любого *схемного окна* проекта.

Для ввода текстового сообщения необходимо:

- перенести из *палитры компонентов* в *схемное окно* блок *Заметка*, расположив его на желаемое место;
- выполнить двойной щелчок *левой* клавишей мыши на появившемся слове **Текст**;
- в открывшемся окне текстового редактора ввести необходимые комментарии (заметку, поясняющий схему текст и т. п.);
- нажать на кнопку  **Применить** в *панели инструментов* текстового редактора.

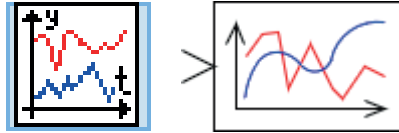
**Свойства:** для работы блока свойства задавать не требуется.

**Примечания:**

1. Произвольный текст, который вставляется на схему, не влияет на расчет.
2. Шрифт, размер, цвет и другие характеристики введенного текстового сообщения можно изменить в свойствах блока, выбрав пункт **Шрифт** на вкладке **Общие**.

## Ж.6. Библиотека «Данные»

Блоки библиотеки предназначены для реализации ряда операций с данными моделирования (расчета).

**Временной график**

Блок реализует отображение текущих результатов моделирования в виде временных зависимостей для одной или одновременно для нескольких переменных.

В *схемном окне* изображение блока подобно изображению любого типового блока – прямоугольник с характерной пиктограммой.

При двукратном щелчке *левой* клавишей мыши по изображению блока в *схемном окне* открывается так называемое *графическое окно* (рис. Ж.8).

**Примечание:** диалоговое окно свойств блока можно вывести путем однократного нажатия *правой* кнопкой мыши на блоке.

**Свойства:**

- Количество входных портов – количество портов блока, по умолчанию **1**; другими словами, количество отображаемых в *графическом окне* сигналов (скаляров или векторов).

Если входные сигналы скалярные, то количество графиков равно количеству входных сигналов.

Если входные сигналы векторные (например, три векторных сигнала размерностью **4**, **3** и **5**), то количество графиков, отображаемых в *графическом окне*, равно сумме размерностей входных сигналов – **12**.

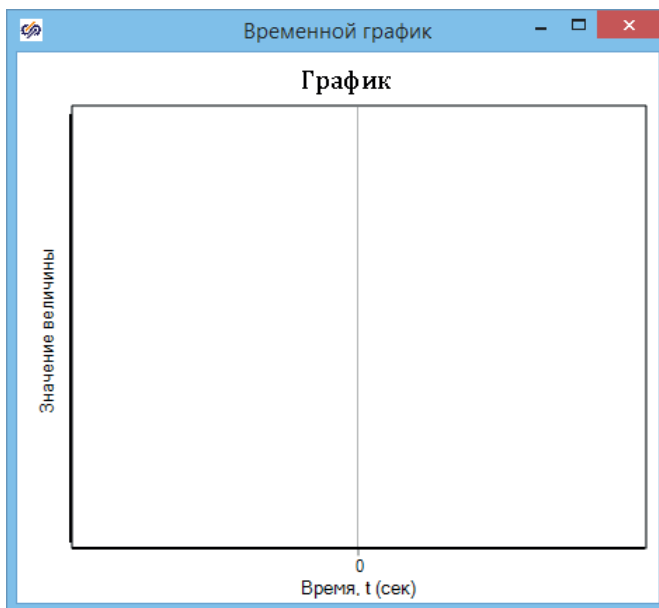


Рис. Ж.8. *Графическое окно* **Временной график**

Доступ к **дополнительным настройкам** осуществляется через контекстное меню *графического окна*.

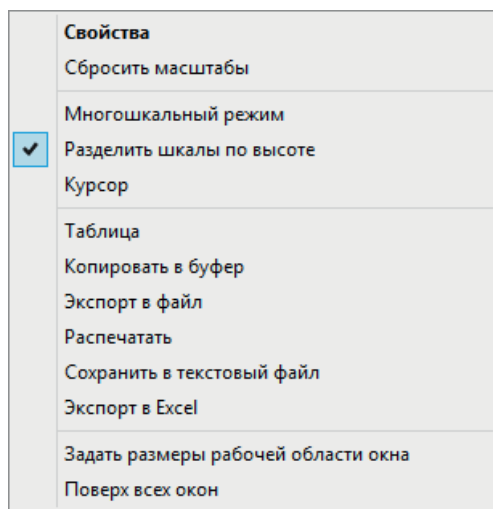


Рис. Ж.9. Контекстное меню *графического окна*

При нажатии *правой* кнопкой мыши на *графическом окне* появится выпадающее меню с пунктом меню **Свойства**, а также со следующими возможностями (рис. Ж.9):

- **Сбросить масштабы** – установка исходного автомасштабирования для осей X и Y;
- *Многошкальный режим* – возможность вывода разных шкал для отображения разных величин;
- **Разделить шкалы по высоте** – включение/отключение разделения шкалы по высоте в многошкальном режиме отображения данных моделирования;
- **Курсор** – дополнительная возможность для точного исследования отображаемой временной зависимости;
- **Таблица** – сменить способ отображения временной зависимости на табличную (обратное переключение аналогично);
- **Копировать в буфер** – скопировать изображение *графического окна* в буфер обмена для вставки в другие программы (Paint, Word, Photoshop и пр.);
- *Экспорт в файл* – сохранить изображение в одном из распространенных графических форматов;
- **Распечатать** – вывести график на печать;
- **Сохранить в текстовый файл** – сохранить временную зависимость в текстовый файл в табличном виде;
- **Экспорт в Excel** – экспортирование временной зависимости в табличном виде в MS Excel;



- **Задать размеры рабочей области окна** – задание точных размеров ширины и высоты рабочей области *графического окна* в пикселях;
- **Поверх всех окон** – если включено, то график отображается поверх всех других окон.

Настройка параметров *графического окна* (цвет и тип линий, параметры осей координат, параметры заголовка графика и подписей по осям координат и т. п.) производится в специальном диалоговом окне **Свойства графика**, представленном на рис. Ж.10.

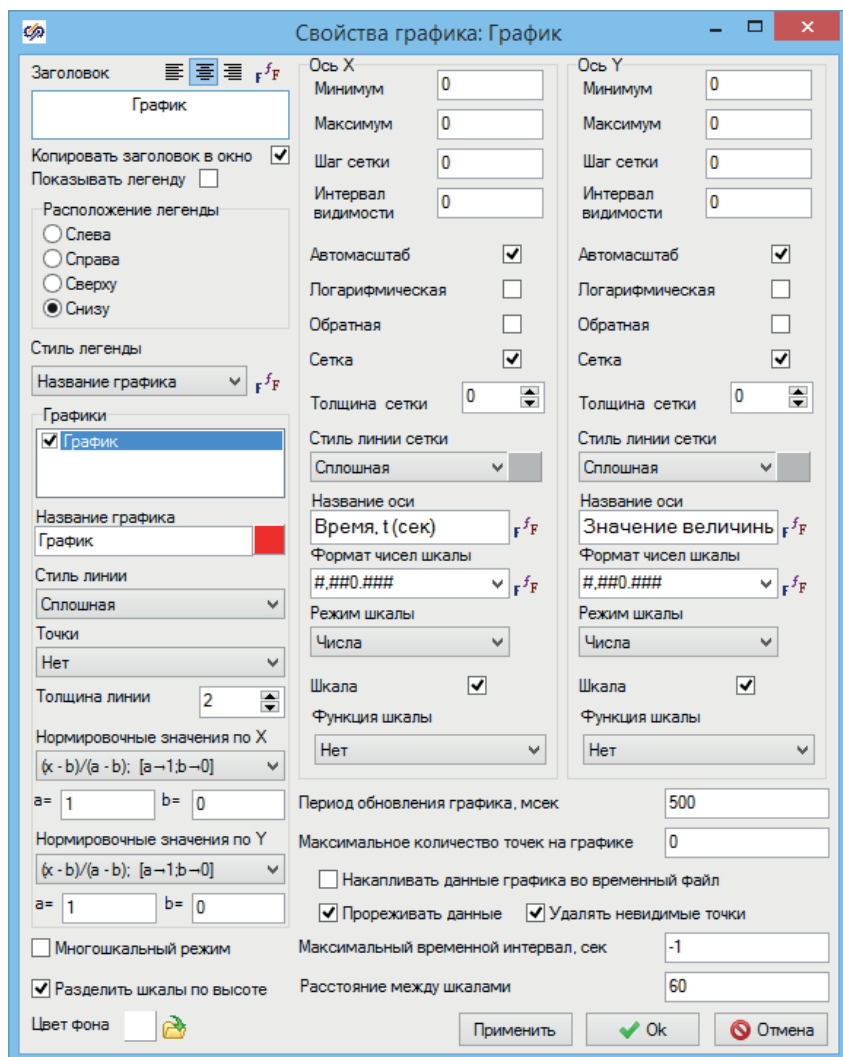
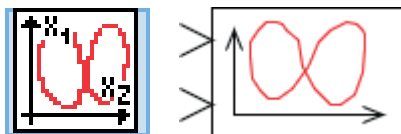


Рис. Ж.10. Диалоговое окно **Свойства графика**

Все возможности этого окна лучше изучать самостоятельно. Наиболее часто используемые возможности:

- **Заголовок** – наименование графика (вверху), можно задать параметры шрифта;
- **Название графика** – наименование графика в легенде;
- **Стиль линии** – стиль линии, которой отображается выбранная временная зависимость;
- **Толщина линии** – толщина в пикселях линии выбранного графика;
- **Цвет фона** – выбор цвета заливки фона графика (по умолчанию белый цвет);
- **Выбрать подложку графика** (кнопка ) – выбор растрового изображения в качестве фона графика; изображение будет отмасштабировано в размер графика;
- **Автомасштаб** – возможность автомасштабирования (или нет) графика. По умолчанию автомасштабирование включено;
- **Название оси** – строка текста, отображаемого около оси с наименованием этой оси;
- **Период обновления графика** – если вы исследуете длительные процессы, полезно период обновления увеличить. Если быстрые, то лучше этот параметр уменьшить;
- **Прореживать данные** – если включено (по умолчанию да), то отображаемые данные подвергаются прореживанию по следующему алгоритму: если 3 последовательные расчетные точки лежат на одной прямой (с заданной точностью), то средняя точка не отображается на графике, так как отрезок, проведенный через 1-ю и 3-ю точки, содержит и 2-ю точку. Если необходимо иметь информацию обо всех расчетных данных, выводимых на график, то необходимо снять (выключить) эту опцию;
- **Удалять невидимые точки** – если включено (по умолчанию да), то те расчетные данные (точки графика), которые подверглись прореживанию, будут удалены из оперативной памяти и из графика. Данная процедура позволяет избежать чрезмерно больших массивов данных, накапливаемых в памяти компьютера при моделировании длительных переходных процессов.

*Фазовый портрет*



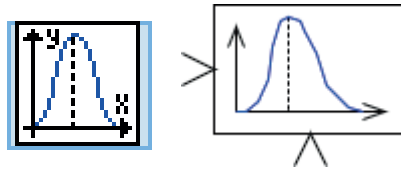
Блок имеет два входа, реализует отображение текущих результатов моделирования на фазовой плоскости для одной пары или одновременно для нескольких пар фазовых переменных.

Блок имеет два векторизованных входа: для каждой точки значение абсциссы берется с первого входа, значение ординаты – со второго входа. Размерности входных сигналов должны быть одинаковыми.

Блок использует *графическое окно* **Фазовый портрет**, аналогичное блоку «Временной график».

**Свойства:** для работы блока свойства задавать не требуется.

*График  $Y$  от  $X$*



Блок реализует вывод на график зависимости вектора  $Y$  (второй вход) от вектора  $X$  (первый вход).

Блок предназначен для отображения текущих результатов моделирования в виде графика  $Y(t, x)$ , реализующего после каждого шага интегрирования (расчета) построение кривой  $y(t) = f(x, t)$ , где  $x$  – вектор, содержащий независимые от времени постоянные элементы.

Данный блок может быть использован для отображения результатов расчета в линейно распределенных динамических задачах, где, например, вектор  $x$  – вектор относительных пространственных координат в моделируемом объекте, а вектор-функция  $y(t)$  описывает нестационарное распределение какой-то физической величины в моделируемом объекте.

**Свойства:**

- Количество графиков – натуральное число  $N$ . Если введено, например, число 3, то блок будет иметь 6 входных портов: порты слева для ввода данных, которые соответствуют координатам по оси абсцисс, и порты снизу для ввода значений вектор-функций  $y(t)$ .

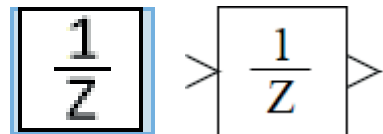
Размерности входов должны совпадать.

Блок использует *графическое окно* **График  $Y$  от  $X$** , аналогичное блоку «Временной график».

## Ж.7. Библиотека «Дискретные»

В данную библиотеку включены типовые блоки, динамика которых описывается дискретными передаточными функциями и линейными разностными (т. е. дискретными во времени) уравнениями состояния.

*Запаздывание на период квантования*



Блок реализует дискретное запаздывание входного сигнала на один период квантования:

$$y(t) = x(t_{k-1}),$$

где  $y(t)$  – значение выходного сигнала в текущий момент расчетного (модельного) времени  $t$ ;

$x(t_{k-1})$  – значение входного сигнала в предпоследний момент дискретизации  $t_{k-1}$ .

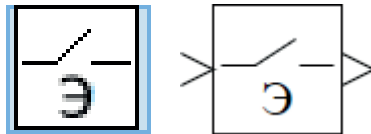
Квантование по времени происходит с периодом  $T$ , который задается свойством блока.

**Свойства:**

- Период квантования – период квантования  $T$  расчета блока.
- Начальные условия – начальное значение  $y(0)$  выходной величины блока.

**Примечание:** для правильной работы данного блока необходимо задать максимальный шаг интегрирования не больше, чем  $0,5T$ . При интегрировании с постоянным шагом рекомендуется задать шаг таким, чтобы период квантования был кратен шагу интегрирования  $T = kh$ , где  $k$  и  $h$  – целое число и шаг интегрирования.

**Экстраполятор**



Блок реализует экстраполяцию нулевого порядка:

$$y(t) = x(t_k),$$

где  $y(t)$  – значение выходного сигнала в текущий момент расчетного (модельного) времени  $t$ ;

$x(t_k)$  – значение входного сигнала в последний момент дискретизации  $t_k$ .

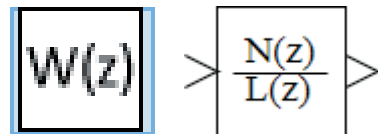
Квантование по времени происходит с периодом  $T$ , который задается свойством блока.

**Свойства:**

- Период квантования – период квантования  $T$  расчета блока.

**Примечание:** для правильной работы данного блока необходимо задать максимальный шаг интегрирования не больше, чем  $0,5T$ . При интегрировании с постоянным шагом рекомендуется задать шаг таким, чтобы период квантования был кратен шагу интегрирования  $T = kh$ , где  $k$  и  $h$  – целое число и шаг интегрирования.

**Дискретная передаточная функция  
общего вида**



Блок реализует математическую модель звена, динамика которого (для каждого скалярного сигнала) описывается дискретной передаточной функцией:

$$W(z) = \frac{b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + \dots + b_m z^m}{a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n},$$

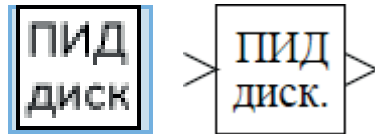
где  $a_i, b_j$  – коэффициенты ( $i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 0, 1, 2, \dots, m; n \geq m$ ).

**Свойства:**

- Период квантования – период квантования  $T$  расчета блока.
- Коэффициенты числителя – вектор  $b$  размерностью  $[m]$ .
- Коэффициенты знаменателя – вектор  $a$  размерностью  $[n]$ .
- Начальные условия – вектор начальных значений выходной величины блока при  $t = 0$ .

**Примечания:**

1. По умолчанию блок реализует обработку скалярного входного сигнала.
2. Коэффициенты  $a_i, b_j$  вводятся по возрастающим степеням  $z$ .
3. Для правильной работы данного блока необходимо задать максимальный шаг интегрирования не больше, чем  $0,5T$ . При интегрировании с постоянным шагом рекомендуется задать шаг таким, чтобы период квантования был кратен шагу интегрирования  $T = kh$ , где  $k$  и  $h$  – целое число и шаг интегрирования.

**Дискретный ПИД-регулятор**

Блок реализует передаточную функцию дискретного ПИД-регулятора:

$$W(z) = k_{\Pi} + k_{\text{И}} \frac{Tz}{z-1} + k_{\text{Д}} \frac{z-1}{Tz},$$

где  $k_{\Pi}, k_{\text{И}}, k_{\text{Д}}$  – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие;  
 $T$  – период квантования, с.

**Свойства:**

- Период квантования – период квантования  $T$  расчета блока.
- Начальные условия – вектор начальных значений выходной величины блока при  $t = 0$ .
- Пропорциональная составляющая –  $k_{\Pi}$ .
- Интегральная составляющая –  $k_{\text{И}}$ .
- Дифференциальная составляющая –  $k_{\text{Д}}$ .

**Примечание:** для правильной работы данного блока необходимо задать максимальный шаг интегрирования не больше, чем  $0,5T$ . При интегрировании с постоянным шагом рекомендуется задать шаг таким, чтобы период квантования был кратен шагу интегрирования  $T = kh$ , где  $k$  и  $h$  – целое число и шаг интегрирования.

# Дополнения к лабораторным работам



ПРИЛОЖЕНИЕ

3

В приложении приводятся дополнительные материалы к лабораторным работам 6 и 8.

## 3.1. Дополнение к лабораторной работе 6. Блок Язык программирования как алгоритмическое средство программирования

Многие действующие и разрабатываемые современные технические устройства, в том числе и автоматические системы, с точки зрения их математического описания, являются гибридными, поведение которых описывается не только дифференциально-алгебраическими уравнениями, но и логическими условиями, задающими переходы из одного дискретного состояния в другое. В дополнение к сказанному следует отметить, что в большом многообразии САУ (САУ) имеется класс систем с распределенными параметрами (их динамика описывается дифференциальными уравнениями в частных производных), проектирование которых невозможно без использования алгоритмических средств программирования. Блок *Язык программирования* и большой набор дискретных, переключательных и логических элементов, имеющихся в SimInTech, позволяют реализовывать гибридные модели, а также модели систем с распределенными параметрами без привлечения дополнительных программ, непосредственно в среде SimInTech.

С помощью блока *Язык программирования* можно создавать модели на основе встроенного в SimInTech алгоритмического языка. Этот язык подобен языку системы Matlab. Он позволяет задавать алгебраические соотношения и дифференциальные уравнения, а также выполнять операции с действительными и комплексными матрицами и векторами, логическими переменными, геометрическими точками, полиномами. Возможны и более сложные типы данных – записи и ссылки. Среди конструкций языка – условные и безусловные переходы, циклы, пользовательские функции и процедуры [24].

Для применения блока *Язык программирования* обучающемуся необходимо предварительно изучить основные конструкции языка и приемы работы в его

среде, используя справочную систему SimInTech. Приведенные ниже несложные демонстрационные примеры, по мнению авторов, позволят пользователю получить первоначальные практические навыки алгоритмического программирования в среде SimInTech.

### Пример 1. Моделирование поступательного движения тела с учетом силы сухого трения

Моделируется движение бруска, прикрепленного к пружине, под действием внешней силы  $F_{in}$  с учетом сухого трения (рис. 3.1). Он базируется на основе примера, заимствованного из демонстрационного пакета системы Matlab (Stick-Slip Friction Demonstration, файл sf\_stickslip.mdl).

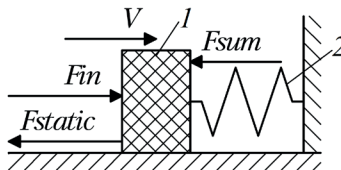


Рис. 3.1. Схематичное представление простейшей динамической системы с сухим трением:  
1 – брусок; 2 – пружина

Движение данной системы описывается следующими уравнениями:

$$M \frac{dV}{dt} = F_{sum} - F_{sliding} * \text{sign}(V) \text{ при } V \neq 0 \text{ (движение);} \quad (3.1)$$

$$F_{sum} = F_{static} * \text{sign}(F_{sum}) \text{ при } V = 0 \text{ (покой),} \quad (3.2)$$

где  $M$  – масса бруска, кг;

$F_{sum} = F_{in} - F_{pr}$ , здесь  $F_{pr}$  – сила пружины ( $F_{pr} = K * X$ ), Н;

$F_{sliding}$  – сила трения скольжения ( $F_{static} * F_{sliding}$ ), Н;

$F_{static}$  – сила, которую нужно приложить, чтобы сдвинуть брусок с места (сила трения покоя), Н;

$K$  – коэффициент упругости пружины, Н/м;

$V$  и  $X$  – соответственно, скорость и перемещение бруска, м/с и м.

В соответствии с уравнениями (3.1) и (3.2) изменение состояния бруска описывается следующими логическими условиями: если брусок остановился или был в состоянии покоя и при этом суммарная сила  $F_{sum}$  не превышает по модулю  $F_{static}$ , то брусок остается в состоянии покоя; в противном случае он находится в состоянии движения. В соответствии с этими условиями программа вычисления скорости бруска  $V$  имеет следующий вид:

```
input Fsum;
output Velocity;
init V=0;
var Vold=V;
```

```

if (abs(Fsum)<=Fstat) and (V*Vold<=0)
then begin V'=0; V=0 end //покой
else V'=(Fsum-Fsliding*sign(V))/M; //движение
if goodstep then Vold=V; //скорость на предыдущем успешном шаге
Velocity=V;

```

(3.3)

Здесь **goodstep** – системная логическая переменная, которая принимает значение **true** в случае успешного шага интегрирования и **false** в противном случае. На каждом шаге интегрирования производится оценка ошибки. Если оценка ошибки меньше допустимой, то шаг считается успешным (**goodstep = true**). В противном случае (**goodstep = false**) происходит возврат к предыдущему шагу, после чего выполняется шаг меньшего размера. Изменение состояния (покой или движение) фиксируется только при успешном шаге.

Структурная модель динамической системы (рис. 3.1) с учетом (3.1)–(3.3), числовых значений ее параметров ( $M = 10$  кг;  $K = 2943$  Н/м;  $F_{stat} = 40$  Н;  $F_{sliding} = 40$  Н) и внешней силы  $Fin$  в виде треугольной функции времени ( $Fin\_max = 100$  Н, период 10 с) показана на рис. 3.2, а программные ее реализации – на рис. 3.3 и 3.4. Результаты моделирования движения бруска в графическом виде приведены на рис. 3.5. Для детального анализа графиков, представленных на рис. 3.5, рекомендуется развернуть во весь экран *графическое окно* соответствующего блока *Временной график*.

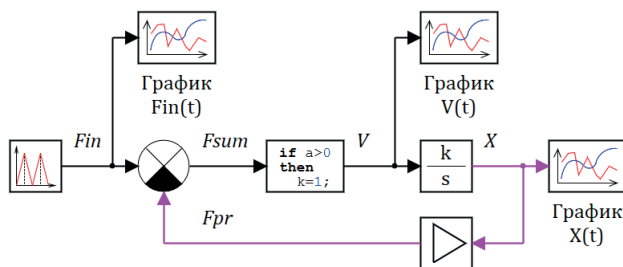


Рис. 3.2. Структурная модель динамической системы с «сухим трением» в среде SimInTech

```

1 M=10; // масса тела
2 K=2943; // жесткость пружины
3 Fstat=40; // сила трения покоя
4 Fsliding=40; // сила трения движения

```

Рис. 3.3. Задание глобальных параметров в редакторе скрипта проекта



```

1 input Fsum;
2 output Velocity;
3 init V=0;
4 var Vold=V;
5 if (abs(Fsum) <= Fstat) and (V*Vold <= 0) then
6 begin
7   V'=0; V=0; //покой
8 end else
9   V'=(Fsum-Fsliding*sign(V))/M; //движение
10 if goodstep then Vold=V; //скорость на предыдущем успешном шаге
11 Velocity=V;

```

Рис. 3.4. Программный код в редакторе алгоритмов блока Язык программирования, реализующего модель движения тела

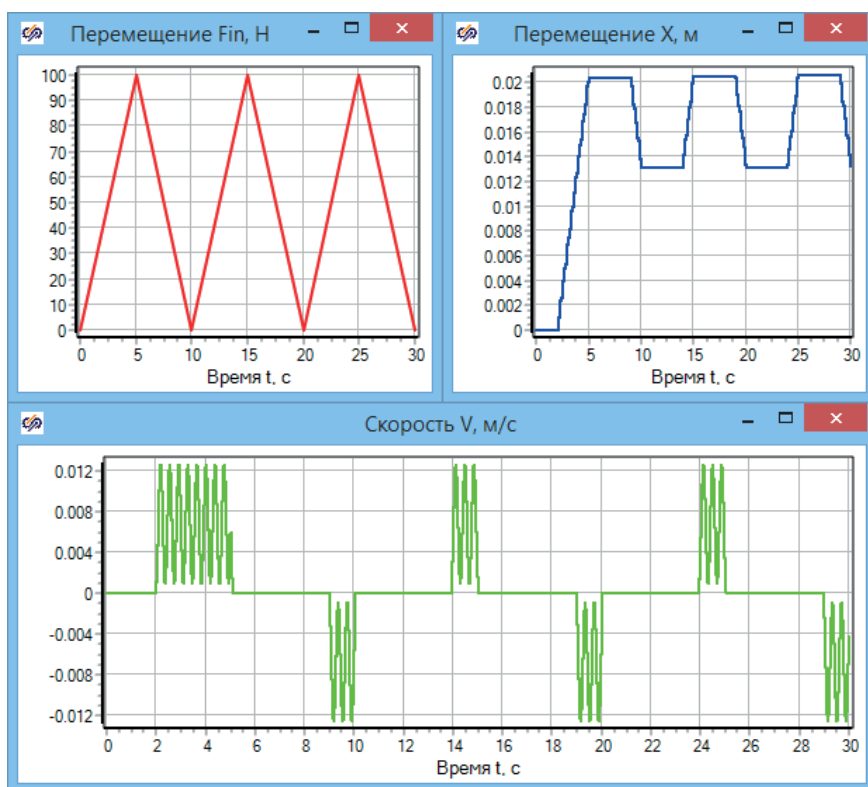


Рис. 3.5. Результаты моделирования движения бруса

## Пример 2. Моделирование процесса одномерной теплопроводности

Однородная стенка большой площади и толщиной  $l$  разделяет две среды с разной температурой (рис. 3.6): слева – среда, температура которой меняется во времени в соответствии с функцией  $u(t)$ , справа – в соответствии с функцией  $v(t)$ . Температура  $T$  внутренних точек стенки – функция двух переменных: координаты  $x$  и времени  $t$ , т. е.  $T(x, t)$ . Вследствие большой площади и однородности стенки ее точки, лежащие на одной вертикали, имеют одинаковую температуру (изотермичны) [25].

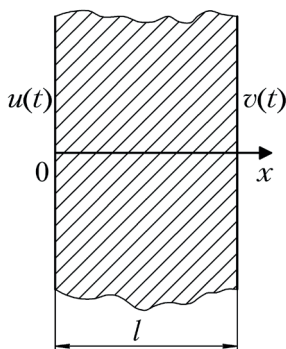


Рис. 3.6. Фрагмент вертикального сечения стенки

При заданных функциях  $u(t)$  и  $v(t)$  требуется, посредством компьютерного моделирования, исследовать процесс распределения температуры для внутренних точек стенки.

Термические процессы в рассматриваемой стенке описываются одномерным уравнением теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \text{ при } 0 \leq x \leq l \text{ и } 0 \leq t \leq t_{\text{end}}, \quad (3.4)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $t_{\text{end}}$  – конечное время процесса, с.

Решение уравнения (3.4) должно соответствовать краевым условиям  $T(0, t) = u(t)$ ,  $T(l, t) = v(t)$  и начальному условию  $T(x, 0) = f(x)$ . Здесь  $f(x)$  в общем случае некоторая функция, характеризующая распределение температуры по толщине стенки в первоначальный момент времени. В рассматриваемом случае примем  $f(x) = T_0 = \text{const}$  (все точки стенки при  $t = 0$  имеют равные значения температуры  $T_0$ ).

Применяя к (3.4) приближенный метод аппроксимации уравнения в частных производных системой обыкновенных дифференциальных уравнений (метод прямых), получим систему ОДУ [24]:

$$T'_i = K(T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}), T_i(0) = T_0, i = 2, \dots, N-1;$$

$$T_1 = u(t), T_N = v(t), K = \frac{\alpha}{\Delta x^2}, \Delta x = \frac{1}{N-1}. \quad (3.5)$$

На основе математической модели (3.5) проведено компьютерное моделирование процесса остывания стенки помещения толщиной  $l = 30$  см в течение времени  $t_{\text{end}} = 500$  с при начальном условии  $f(x) = T_0 = 25$  °С.

Графики функций, отображающих краевые условия  $T(0, t) = u(t)$  и  $T(l, t) = v(t)$ , показаны на рис. 3.7.

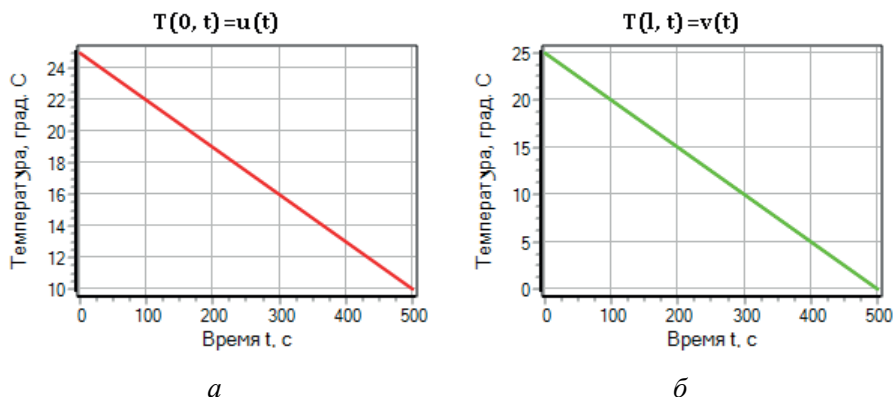


Рис. 3.7. Графики функций краевых условий:  
а – изменения температуры внутри помещения;  
б – изменения температуры за пределами помещения

Записанная на основе (3.5) в окне текстового редактора алгоритмов блока *Язык программирования* программа решения рассматриваемой задачи показана на рис. 3.8. Все необходимые константы определены и заданы в редакторе *скрипта проекта* (рис. 3.9). Результаты моделирования процесса остывания стенки отражены на рис. 3.10 и 3.11.

```

1 input u, v; // входы блока (граничные условия)
2 output x[N], T[N]; // векторные выходы блока
3 init T=N#T0; // начальные условия
4 x=linspace(0,1,N); // x - массив узлов равномерной сетки
5 T[1]=u; T[N]=v;
6 for (i=2,N-1) T'[i]=K*(T[i-1]-2*T[i]+T[i+1]);

```

Рис. 3.8. Программный код в редакторе алгоритмов блока *Язык программирования*, реализующего модель одномерной теплопроводности

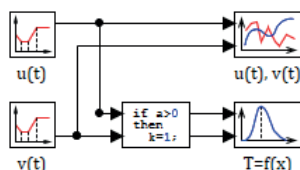
```

1 N=20; // число узлов сетки
2 l=30; // толщина стенки
3 T0=25; // начальное условие
4 a=0.02; // коэффициент температуропроводности
5 K=(a*(N-1)^2)/l; // вычисляемая константа
6 tend=500; // конечное время процесса

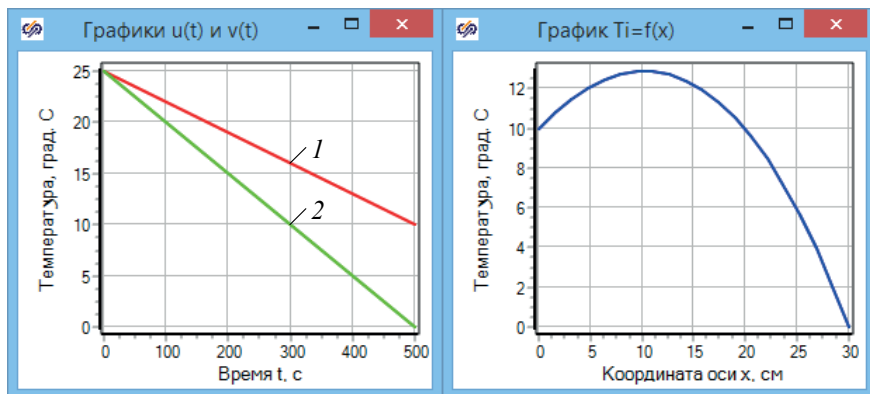
```

Рис. 3.9. Программный код в редакторе скрипта проекта с глобальными параметрами

Для отображения распределения температуры по толщине стенки использован типовой блок *График Y от X*, на входы которого подаются векторные сигналы  $x$  и  $T$ .



*a*



*б*

*в*

Рис. 3.10. Результаты моделирования процесса остывания стенки:  
*a* – структурная модель; *б* – графики функций  $u(t)$  (1) и  $v(t)$  (2);  
*в* – график  $T_i = f(x)$  при  $t = t_{\text{end}} = 500$  с (остальные графики наблюдаются в процессе моделирования, некоторые из них показаны на рис. 3.11)

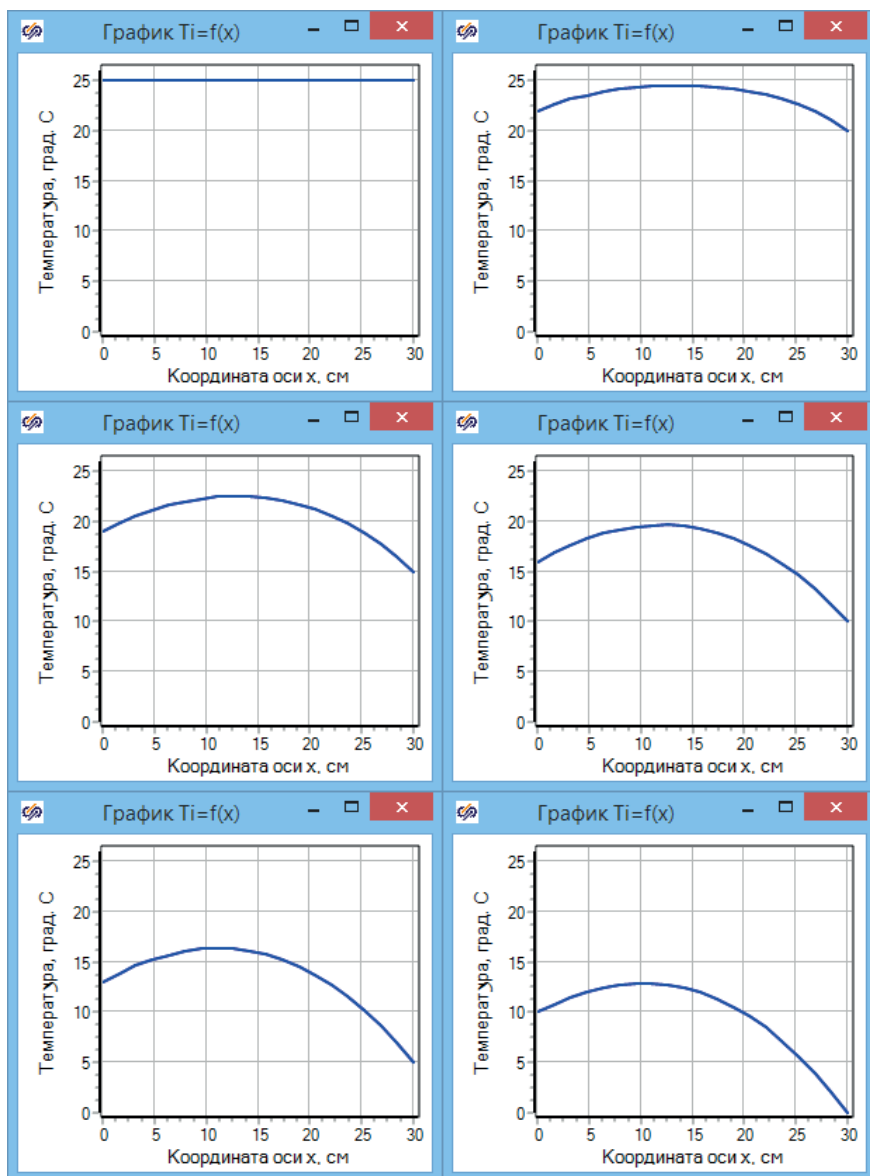


Рис. 3.11. Графики изменения температуры по толщине стенки в моменты времени 0, 100, 200, 300, 400 и 500 с

### 3.2. Дополнение к лабораторной работе 8. Моделирование цифровых САР с учетом дискретизации сигналов в АЦП

При управлении несколькими объектами регулирования посредством одной микроЭВМ имеет место двойная дискретизация непрерывных сигналов по времени в процессе поочередного подключения объектов к микроЭВМ и при обработке сигналов в АЦП. Длительность периода квантования сигналов в первом случае на один-два порядка больше длительности дискретизации сигналов в АЦП. В связи с этим при мультиплексорном режиме работы микроЭВМ (при обслуживании нескольких объектов регулирования) длительностью процесса квантования сигналов в АЦП можно пренебречь и учитывать только период квантования, обусловленный мультиплексированием, рассматривая САР с микроЭВМ как импульсную систему. Такой подход использовался выше в работе 8. Если микроЭВМ обслуживает только один объект регулирования и период дискретизации сигнала в АЦП не отвечает требованиям теоремы Котельникова, то САР следует моделировать с учетом рекомендаций, рассмотренных в п. 1.3.7. Иллюстрация методики моделирования цифровых САР с учетом процесса дискретизации сигналов в АЦП рассмотрена в следующем примере.

**Пример.** Для регулирования угла поворота каждого звена промышленного робота (см. п. Г.3 приложения Г) применена следящая система с цифровым регулированием посредством автономной микроЭВМ (рис. 3.12).

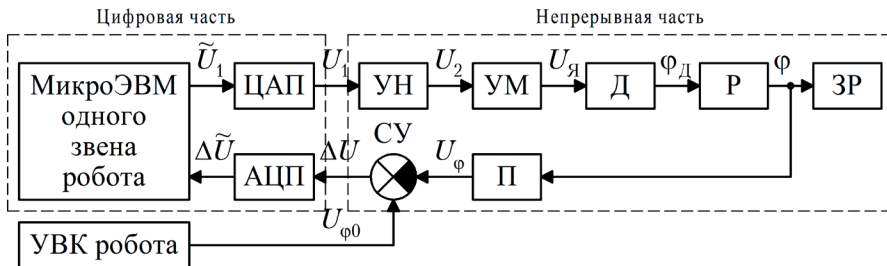


Рис. 3.12. Функциональная схема  
цифровой САР углового перемещения звена робота:

УН, УМ – соответственно электронный усилитель напряжения и мощности;

Д – двигатель постоянного тока; Р – редуктор; ЗР – звено робота;

П – потенциометрический датчик угловых перемещений

В данной системе задающее воздействие формируется в управляющем вычислительном комплексе (УВК) головной микроЭВМ, преобразуется с помощью ЦАП в аналоговый сигнал  $U_{\phi 0}$ , который сравнивается с аналоговым сигналом обратной связи  $U_{\phi}$  в сравнивающем устройстве (СУ). Сигнал рассогласования  $\Delta U_{\phi}$  с выхода СУ поступает на вход АЦП, преобразуется в последнем в цифровую форму  $\Delta \tilde{U}_{\phi}$ .

и после обрабатывается в микроЭВМ по предписанному алгоритму. Далее цифровой выходной сигнал  $\tilde{U}_1$  микроЭВМ, преобразованный ЦАП в аналоговый сигнал  $U_1$  и усиленный электронными усилителями до величины  $U_{\text{я}}$ , воздействуя на якорную цепь двигателя, обеспечивает заданное угловое перемещение  $\phi$  звена робота.

Все элементы непрерывной части следящей системы (рис. 3.12), за исключением двигателя Д, являются пропорциональными звеньями, передаточные коэффициенты которых следующие: усилителя напряжения  $k_{\text{УН}} = 10$ ; усилителя мощности  $k_{\text{УМ}} = 5$ ; редуктора  $k_{\text{р}} = 0,333$ ; потенциметрического датчика угловых перемещений П  $k_{\text{П}} = 0,26$  В/рад. Двигатель постоянного тока, являющийся динамическим звеном, при определенных допущениях (см. пример в п. 1.1.2) можно представить структурной схемой, показанной на рис. 3.13. Числовые значения параметров структурной схемы:  $k_1 = -0,18$  А·с/рад;  $k_2 = 0,16$ ;  $k_3 = 8$ ;  $k_4 = 1$ ;  $T_1 = 0,01$  с;  $T_2 = 0,05$  с;  $T_3 = 0,1$  с.

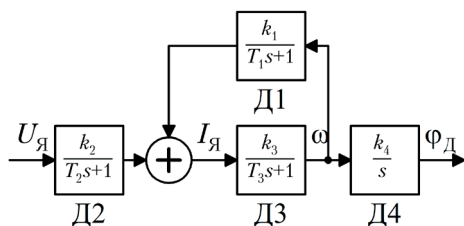


Рис. 3.13. Структурная схема двигателя постоянного тока

В качестве микроЭВМ в следящей системе использованы 8-разрядный микроконтроллер и 8-разрядные АЦП и ЦАП. В АЦП для преобразования сигнала рассогласования  $\Delta U_{\phi}$  в цифровой сигнал (цифровые коды) используются 7 разрядов (один разряд АЦП задействован как знаковый). Интервал квантования сигнала по времени  $T = 0,02$  с. Максимальное напряжение  $U_{1\text{max}} = 5$  В. Максимальное значение угла поворота звена робота  $\phi_1 = 3,14$  рад =  $180^\circ$ . В ЦАП реализован экстраполятор нулевого порядка. Максимальное значение выходного напряжения ЦАП  $U_{2\text{max}} = 5$  В.

АЦП после линеаризации его статической характеристики можно интерпретировать пропорциональным звеном с коэффициентом передачи, определяемым следующей формулой (см. (Д.15), п. Д.2.3 приложения):

$$k_{\text{АЦП}} = \frac{1}{h_1}. \quad (3.6)$$

Величина  $h_1$  рассчитывается по выражению

$$h_1 = \frac{U_{1\text{max}}}{2^{\alpha_1} - 1},$$

где  $U_{1\text{max}}$  – паспортное максимальное значение входного напряжения АЦП, соответствующее его насыщению, В;

$\alpha_1$  – число двоичных разрядов АЦП (без учета знакового разряда).

Числовое значение  $k_{\text{АЦП}}$ , рассчитанное по формуле (3.6) ( $U_{1\text{max}} = 5 \text{ В}$ ,  $\alpha_1 = 7$  и  $(2^{\alpha_1} - 1) = 127$ ,  $h_1 = U_{1\text{max}}/(2^{\alpha_1} - 1) = 5/127 = 0,0394 \text{ В}$ ):

$$k_{\text{АЦП}} = 1/0,0394 = 25,38 \text{ 1/В.}$$

Коэффициент передачи ЦАП:

$$k_{\text{ЦАП}} = h_2. \quad (3.7)$$

Величина  $h_2$  определяется выражением

$$h_2 = \frac{U_{2\text{max}}}{2^{\alpha_2} - 1},$$

где  $U_{2\text{max}}$  – паспортное максимальное значение выходного напряжения ЦАП, соответствующее его насыщению, В;

$\alpha_2$  – число двоичных разрядов ЦАП (без учета знакового разряда).

При  $U_{2\text{max}} = 5 \text{ В}$ ,  $\alpha_2 = 7$  и  $(2^{\alpha_2} - 1) = 127$ ,  $h_2 = \frac{U_{2\text{max}}}{2^{\alpha_2} - 1} = 5/127 = 0,0394 \text{ В}$ ;  $k_{\text{ЦАП}} = h_2 = 0,0394 \text{ В}$ .

Целью моделирования рассматриваемой следящей системы является определение алгоритма управляющей программы микроЭВМ, обеспечивающего процесс регулирования, при котором звено робота при отработке задающего сигнала перемещается в заданное положение без каких-либо колебаний, т. е. чтобы в системе имел место апериодический переходный процесс. Эта цель может быть достигнута посредством управляющей программы, формирующей один из типовых законов регулирования. В связи с этим в структурную непрерывно-дискретную модель следящей системы (рис. 3.14), составленную на основе функциональной схемы (рис. 3.12) с учетом динамических свойств элементов ее линейной части, введен дискретный ПИД-регулятор с передаточной функцией  $W_{\text{ПИД}}(z)$ .

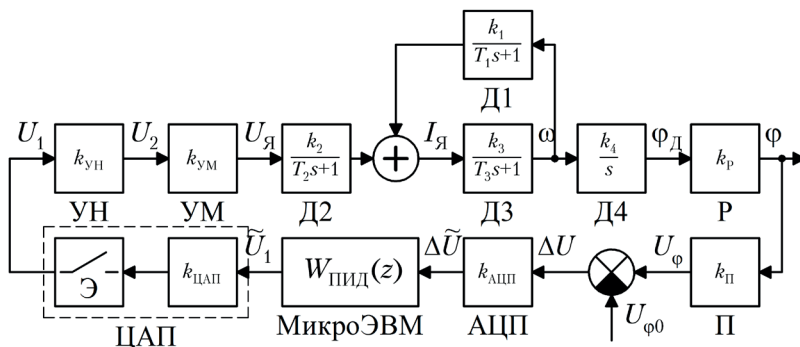


Рис. 3.14. Непрерывно-дискретная модель цифровой следящей системы

Структурная схема моделирования, введенная в *схемное окно* проекта, приведена на рис. 3.15, а результат, полученный в процессе многовариантных расчетов



на ее основе (с целью определения типа закона регулирования с рациональными параметрами), показан на рис. 3.16.

Над блоками структурной схемы моделирования (рис. 3.15) синим шрифтом указаны значения свойств блоков.

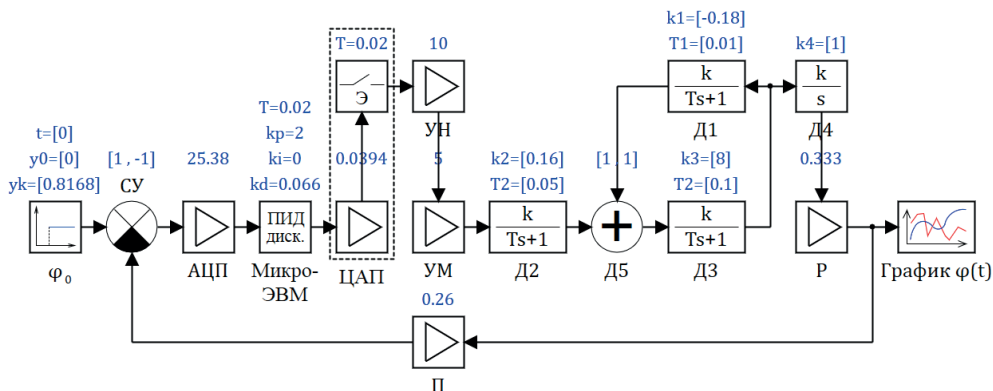


Рис. 3.15. Структурная схема моделирования в среде SimInTech

Для сравнения на рис. 3.17 показан график переходного процесса регулирования следящей системы при *П*-законе регулирования. Визуальный анализ графика показывает: переходный процесс в данном случае имеет перерегулирование, что недопустимо по технологическим требованиям.

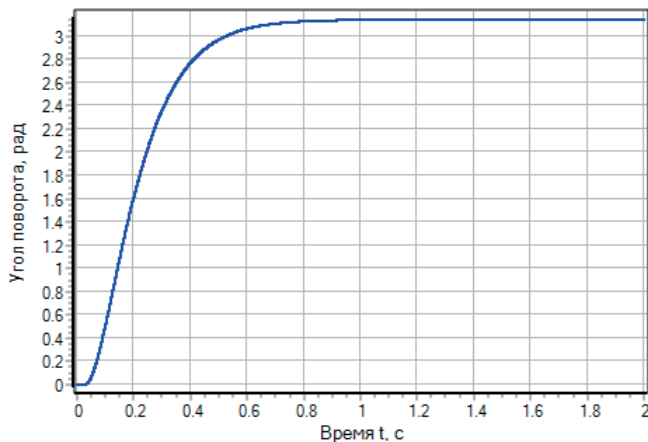


Рис. 3.16. График переходного процесса при *ПД*-законе регулирования ( $k_{\text{П}} = 2$ ;  $k_{\text{И}} = 0$ ;  $k_{\text{Д}} = 0,066$ )

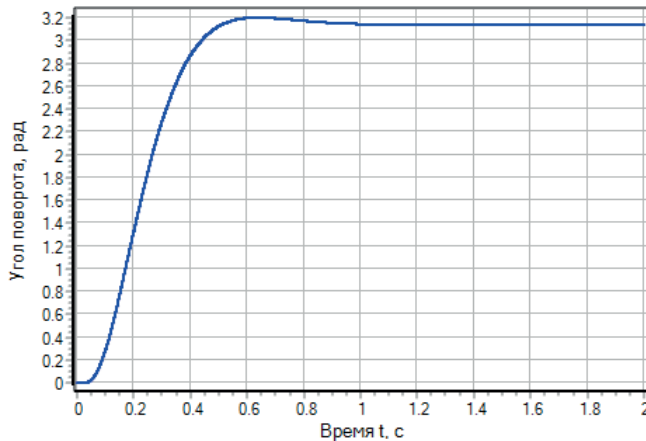


Рис. 3.17. График переходного процесса при  $\Pi$ -законе регулирования ( $k_{\Pi} = 2$ ;  $k_{\text{И}} = 0$ ;  $k_{\text{Д}} = 0$ )

Известно (см. п. 1.3.7), что в структурных моделях цифровых систем при  $\alpha_1 = \alpha_2$  можно не учитывать статических свойств АЦП и ЦАП, а также, применительно к SimInTech, исключать из них блок *Экстраполятор*, т. к. экстраполяция сигнала выполняется в предыдущем блоке *Дискретный ПИД-регулятор*. Таким образом, моделировать рассматриваемую цифровую следящую САР можно как обычную импульсную систему (рис. 3.18).

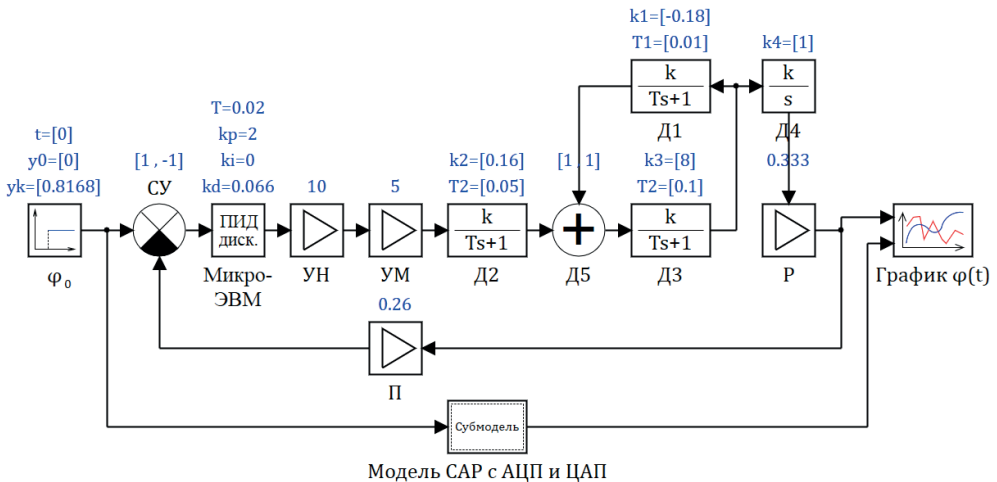


Рис. 3.18. Модель САР без АЦП и ЦАП и исходная модель, реализованная в блоке *Субмодель*

Результаты моделирования двух моделей в виде двух слитных графиков (рис. 3.19, 3.20) подтверждают их адекватность.

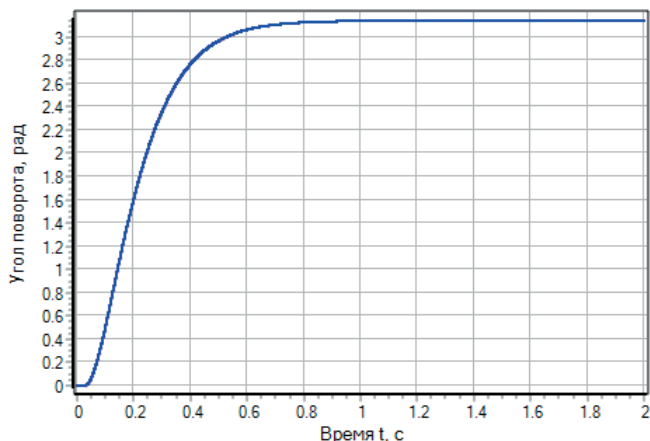


Рис. 3.19. Графики переходных процессов в модели без АЦП и ЦАП и исходной модели при ПД-законе регулирования ( $k_P = 2$ ;  $k_I = 0$ ;  $k_D = 0,066$ )

| Временной график |             |               |             |               |
|------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| №                | График - X  | График - Y    | График - X  | График - Y    |
| 1                | 0           | 0             | 0           | 0             |
| 2                | 0.019664078 | 0             | 0.019664078 | 0             |
| 3                | 0.020664078 | 3.0522277E-6  | 0.020664078 | 3.0521422E-6  |
| 4                | 0.021664078 | 2.4230831E-5  | 0.021664078 | 2.4230152E-5  |
| 5                | 0.022664078 | 8.1143259E-5  | 0.022664078 | 8.1140987E-5  |
| 6                | 0.023664078 | 0.00019082297 | 0.023664078 | 0.00019081763 |
| 7                | 0.024664078 | 0.00036972331 | 0.024664078 | 0.00036971296 |
| 8                | 0.025664078 | 0.00063371382 | 0.025664078 | 0.00063369607 |
| 9                | 0.026664078 | 0.0009980789  | 0.026664078 | 0.00099805095 |
| 10               | 0.027664078 | 0.0014775184  | 0.027664078 | 0.001477477   |
| 11               | 0.028664078 | 0.0020861499  | 0.028664078 | 0.0020860915  |
| 12               | 0.029664078 | 0.002837513   | 0.029664078 | 0.0028374335  |
| 13               | 0.030664078 | 0.0037445742  | 0.030664078 | 0.0037444693  |
| 14               | 0.031664078 | 0.004819734   | 0.031664078 | 0.004819599   |
| 15               | 0.032664078 | 0.0060748342  | 0.032664078 | 0.0060746641  |
| 16               | 0.033664078 | 0.0075211669  | 0.033664078 | 0.0075209563  |

Рис. 3.20. Графическое окно с числовыми значениями графиков переходных процессов в модели без АЦП и ЦАП и исходной модели при ПД-законе регулирования ( $k_P = 2$ ;  $k_I = 0$ ;  $k_D = 0,066$ )

**Индивидуальное задание.** Рассмотренные выше результаты моделирования следящей системы получены с использованием непрерывно-дискретной модели как наиболее точной. Для оценки возможности использования приближенной непрерывной модели применительно к рассматриваемой следящей системе выполните ее моделирование на основе непрерывной модели.

## Литература

1. *Баум Ф. И.* Программное обеспечение SimInTech для программирования приборов систем управления / Ф. И. Баум, О. С. Козлов, И. А. Паршиков, В. Н. Петухов, К. А. Тимофеев, А. М. Щекатуров // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 6. С. 354–357.
2. *Паршиков И. А.* Моделирование энергоблока с реакторной установкой с жидкометаллическим теплоносителем в программном комплексе SimInTech / И. А. Паршиков, В. Н. Петухов, К. А. Тимофеев, А. М. Щекатуров // Университетский научный журнал. 2013. № 5. С. 144–156.
3. *Щекатуров А. М.* Методика разработки функционального программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода в SimInTech / А. М. Щекатуров, К. А. Тимофеев, О. С. Козлов // Университетский научный журнал. 2015. № 15. С. 80–87.
4. Системы автоматического регулирования: Практикум по математическому моделированию / под ред. Б. А. Карташова. Ростов-на-Дону: Феникс, 2015. 458 с.
5. Справочная система SimInTech. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://simintech.ru/help/rus/>.
6. *Попов Е. П.* Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е. П. Попов. М.: Наука, 1989. 301 с.
7. *Певзнер Л. Д.* Практикум по теории автоматического управления / Л. Д. Певзнер. М.: Высшая школа, 2006. 590 с.
8. *Ким Д. П.* Теория автоматического управления. Т. 1: Линейные системы / Д. П. Ким. М.: Физматгиз, 2003. 287 с.
9. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1–3 / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
10. *Топчиев Ю. И.* Атлас для проектирования систем автоматического регулирования / Ю. И. Топчиев. М.: Машиностроение, 1989. 752 с.
11. *Бородин И. Ф.* Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин, Ю. А. Судник. М.: КолосС, 2006. 343 с.
12. *Башарин А. В.* Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ / А. В. Башарин, Ю. В. Постников. Л.: Энергия, 1990. 512 с.

13. *Петраков Ю. В.* Теория автоматического управления технологическими системами / Ю. В. Петраков, О. И. Драчев. М.: Машиностроение, 2008. 336 с.
14. *Бесекерский В. А.* Системы автоматического управления с микроЭВМ / В. А. Бесекерский, В. В. Изранцев. М.: Наука, 1987. 320 с.
15. *Иващенко Н. Н.* Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н. Н. Иващенко. М.: Машиностроение, 1978. 736 с.
16. *Карташов А. Б.* Исследование и разработка регулируемого электропривода подачи рабочего органа выгрузчика консервированных кормов: сб. трудов конкурсных работ молодых ученых Дона «Фундаментальные и прикладные проблемы современной техники» / А. Б. Карташов. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 1997. 365 с.
17. *Карташов Б. А.* Моделирование нелинейных динамических систем в среде программного комплекса «МВТУ» / Б. А. Карташов, А. Б. Карташов, М. Ю. Медведько, Е. А. Шабаев // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 8. С. 25–30.
18. *Корн Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука, 1977. 831 с.
19. *Филлипс Ч.* Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.
20. *Герман-Галкин С. Г.* Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
21. ТРМ1 измеритель-регулятор микропроцессорный двухканальный. Руководство по эксплуатации. 2017. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.owen.ru/uploads/re\\_2trm1\\_m\\_din\\_2371.pdf](http://www.owen.ru/uploads/re_2trm1_m_din_2371.pdf).
22. ТРМ12 измеритель ПИД-регулятор микропроцессорный одноканальный. Руководство по эксплуатации. 2017. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.owen.ru/uploads/re\\_trm12\\_m\\_din\\_2374.pdf](http://www.owen.ru/uploads/re_trm12_m_din_2374.pdf).
23. Каталог 2016. Оборудование для автоматизации. Каталог продукции ПО «ОВЕН». 2017. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.owen.ru/upl\\_files/catalog15/catalog\\_OWEN\\_2016.pdf](http://www.owen.ru/upl_files/catalog15/catalog_OWEN_2016.pdf).
24. *Козлов О. С.* Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем / О. С. Козлов, Д. Е. Кондаков, Л. М. Скворцов, К. А. Тимофеев, В. В. Ходаковский // Информационные технологии. 2005. № 9. С. 20–25.
25. *Урмаев А. С.* Практикум по моделированию / А. С. Урмаев. М.: Наука, 1976. 192 с.

Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «Планета Альянс» наложенным платежом, выслав открытку или письмо по почтовому адресу:

115487, г. Москва, 2-й Нагатинский пр-д, д. 6А.

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в интернет-магазине: **www.aliants-kniga.ru**.

Оптовые закупки: тел. **(499) 782-38-89**.

Электронный адрес: **books@aliants-kniga.ru**.

Карташов Борис Александрович  
Шабаев Евгений Адимович  
Козлов Олег Степанович  
Щекатуров Александр Михайлович

**Среда динамического моделирования  
технических систем SimInTech  
Практикум по моделированию  
систем автоматического регулирования**

Главный редактор *Мовчан Д. А.*  
dmkpress@gmail.com

Корректор *Синяева Г. И.*

Верстка *Чаннова А. А.*

Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Формат 70×100 1/16.

Гарнитура «Петербург». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 26,5. Тираж 200 экз.

Веб-сайт издательства: [www.dmk.ru](http://www.dmk.ru)