

# Методика моделирования динамики паротурбинной установки

Практикум по моделированию систем автоматического регулирования



А. М. Щекатуров, А. Р. Корсаков

## Методика моделирования динамики паротурбинной установки TK-35/38-3,4 на базе кода HS



Москва, 2022

УДК 62.25 ББК 34.7 Щ37

### Щекатуров А. М., Корсаков А. Р.

**Щ37** Методика моделирования динамики паротурбинной установки ТК-35/38-3,4 на базе кода HS. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 242 с.

#### ISBN 978-5-93700-054-5

В книге подробно рассмотрено создание модели турбины на базе теплогидравлического кода HS – модуля среды динамического моделирования SimInTech. Этот процесс показан на примере моделирования динамики одной из небольших паротурбинных установок (ПТУ). Также приводится пошаговое описание разработки модели датчика, исполнительного механизма и регуляторов для комплексной модели на примере регуляторов уровня в подогревателях, в деаэраторе и в главном конденсаторе.

Несмотря на то что акцент в методике сделан на конкретной турбине, книга будет полезна всем, кто хочет самостоятельно разработать динамическую модель для другой паротурбинной установки, газовой турбины, турбоагрегата или теплофизического объекта.

> УДК 62.25 ББК 34.7

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.



Введение	
Перечень сокращений	

## **V**1

Постановка задачи	11
1.1 Исходные данные	
1.2 Основные положения модели	13

## ▼ 2

Модель проточной части	15
2.1 Создание файла проекта проточной части	.16
2.2 Набор гидравлической части схемы	.17
2.3 Процесс расширения пара	.26
2.4 Дополнение схемы ротором, ступенями и электрогенератором	.34
2.5 Создание файлов с характеристиками ступеней	.37
2.5.1 Задание таблицы коэффициента сопротивления KSI для 1-й ступени	39
2.5.2 Задание таблицы КПД для 1-й ступени	.42
2.5.3 Задание таблицы мощности и нормировка для 1-й ступени	.43
2.5.4 Задание таблицы коэффициента сопротивления KSI для 2-й ступени	43
2.5.5 Задание таблицы КПД для 2-й ступени	.44
2.5.6 Задание таблицы KSI для 3-й ступени	.44
2.5.7 Задание таблицы КПД для 3-й ступени	.45
2.5.8 Задание таблицы KSI для 4-й ступени	.46
2.5.9 Задание таблицы КПД для 4-й ступени	.47
2.6 Настройка свойств блоков на номинальные параметры	.48
2.6.1 Характеристики ступеней турбины	.48

2.6.3 Отладочные параметры на схеме       55         2.6.4 Номинальные параметры пара       57         2.6.5 Начальные параметры теплоносителя в схеме       59         2.6.6 Исправление начальной температуры в схеме       65         2.6.7 О задании начальной температуры или энтальпии       68         2.7 Корректировка характеристик ступеней турбины       69         2.7.1 Четвертая ступень       70         2.7.2 Третья ступень       71         2.7.3 Вторая ступень       71         2.7.4 Первая ступень       72         2.8 Ротор и турбогенератор       72         2.9 Оценка полученных результатов, визуализация       74         2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления       74		2.6.2 Свойства каналов для проточной части	49
2.6.4 Номинальные параметры пара		2.6.3 Отладочные параметры на схеме	55
2.6.5 Начальные параметры теплоносителя в схеме       59         2.6.6 Исправление начальной температуры в схеме       65         2.6.7 О задании начальной температуры или энтальпии       65         в контрольных объемах.       68         2.7 Корректировка характеристик ступеней турбины       69         2.7.1 Четвертая ступень       70         2.7.2 Третья ступень       71         2.7.3 Вторая ступень       71         2.7.4 Первая ступень       72         2.8 Ротор и турбогенератор.       72         2.9 Оценка полученных результатов, визуализация.       74         2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления       74		2.6.4 Номинальные параметры пара	57
2.6.6 Исправление начальной температуры в схеме       65         2.6.7 О задании начальной температуры или энтальпии       65         в контрольных объемах.       68         2.7 Корректировка характеристик ступеней турбины       69         2.7.1 Четвертая ступень       70         2.7.2 Третья ступень       71         2.7.3 Вторая ступень       71         2.7.4 Первая ступень       72         2.8 Ротор и турбогенератор.       72         2.9 Оценка полученных результатов, визуализация.       74         2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления       74		2.6.5 Начальные параметры теплоносителя в схеме	59
2.6.7 О задании начальной температуры или энтальпии в контрольных объемах		2.6.6 Исправление начальной температуры в схеме	65
в контрольных объемах.       68         2.7 Корректировка характеристик ступеней турбины       69         2.7.1 Четвертая ступень       70         2.7.2 Третья ступень       71         2.7.3 Вторая ступень       71         2.7.4 Первая ступень       72         2.8 Ротор и турбогенератор       72         2.9 Оценка полученных результатов, визуализация       74         2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления       74		2.6.7 О задании начальной температуры или энтальпии	
2.7 Корректировка характеристик ступеней турбины       69         2.7.1 Четвертая ступень       70         2.7.2 Третья ступень       71         2.7.3 Вторая ступень       71         2.7.4 Первая ступень       72         2.8 Ротор и турбогенератор       72         2.9 Оценка полученных результатов, визуализация       74         2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления       74		в контрольных объемах	68
2.7.1 Четвертая ступень       70         2.7.2 Третья ступень       71         2.7.3 Вторая ступень       71         2.7.4 Первая ступень       72         2.8 Ротор и турбогенератор       72         2.9 Оценка полученных результатов, визуализация       74         2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления       74	2.7	7 Корректировка характеристик ступеней турбины	69
2.7.2 Третья ступень		2.7.1 Четвертая ступень	70
2.7.3 Вторая ступень       71         2.7.4 Первая ступень       72         2.8 Ротор и турбогенератор       72         2.9 Оценка полученных результатов, визуализация       74         2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления       74		2.7.2 Третья ступень	71
<ul> <li>2.7.4 Первая ступень</li></ul>		2.7.3 Вторая ступень	71
<ul> <li>2.8 Ротор и турбогенератор</li></ul>		2.7.4 Первая ступень	72
2.9 Оценка полученных результатов, визуализация	2.8	3 Ротор и турбогенератор	72
2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления	2.9	Оценка полученных результатов, визуализация	74
		2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления	74
2.9.2 Вывод расходов и погрешностей их вычисления		2.9.2 Вывод расходов и погрешностей их вычисления	78



Модель главного конденсатора	81
3.1 Понятие о субмодели и типовой подпрограмме	83
3.2 Создание теплогидравлической подпрограммы	83
3.2.1 Набор схемы внутри субмодели	85
3.2.2 Создание свойств субмодели	88
3.2.3 Задание имен блоков внутри субмодели	91
3.2.4 Скрипт субмодели конденсатора	91
3.2.5 Параметры конденсатора	93
3.2.6 Окончательное задание всех свойств	96
3.2.7 Подключение каналов к модели конденсатора	97
3.3 Отладка номинальных параметров конденсатора	
3.3.1 Добавление вывода параметров на расчетную схему	100
3.3.2 Анализ переходного процесса	
3.3.3 Стационарное состояние модели конденсатора	
3.4 Объединение конденсатора и модели проточной части	



.10
110
112
114
114
116

4.3.3 Параметры подогревателя	
4.3.4 Добавление каналов по пару и питательной воде	
4.3.5 Отладка номинального состояния	
4.4 Подключение модели ПНД-1 к проточной части	



## Моделирование ПВД-2 и ПВД-3

с использованием подпрограммы ПНД	128
5.1 Исходные данные	
5.2 Создание подпрограммы	
5.3 Задание верных свойств	
5.4 Настройка номинального состояния	
5.5 Объединение проточной части с моделями ПВД-2 и ПВД-3	
5.5.1 Греющий пар	
5.5.2 Питательная вода	

## ▼ 6

О подогревателях воды промежуточного контура	.136
6.1 Исходные данные	136
6.2 Недостающие элементы модели	136

## ▼ 7



Модель питательных электронасосов	152
8.1 Характеристика насоса ЭПН-150-75	152
8.2 Создание схемы группы ЭПН	153
8.3 Свойства блоков и номинальное состояние	154

# ▼9

Модель деаэратора	157
9 1 Отличие деаэратора от ПНЛ и ПВЛ	157
9.2 Набор схемы	
9.3 Предварительная отладка на номинальные параметры	



Объединение подсистем	163
10.1 Характеристика сливного насоса ЭКН-12-50. добавление его в схему	163
10.2 Подключение ПНД-1 к ДА по конденсату греющего пара	164
10.3 Подключение ПНД-1 к ДА по линии главного конденсата	167
10.4 Подключение ПВД-3 и ПВД-2 к ДА	170
10.5 Подключение питательных насосов	173

## **V**11

Оценка получившегося стационарного состояния	175
11.1 Донастройка отдельных частей модели	175
11.2 Оценка полученного результата, направления дальнейшей работы	178

**V**12

Регуляторы уровней	180
12.1 Подход SimInTech к созданию комплексных моделей	180
12.1.1 База сигналов, ее разработка	181
12.1.2 Датчики, добавление в базу и в модель	184
12.1.3 Типовая подпрограмма	187
12.1.4 Модификация типовой подпрограммы датчика	190
12.2 Перечень и описание основных регуляторов ПТУ	193
12.2.1 Регулятор расхода питательной воды	194
12.2.2 Регулятор давления пара в концевых уплотнениях турбины	194
12.2.3 Регулятор давления пара на деаэратор	194
12.2.4 Регулятор давления пара перед опреснительной установкой,	
регулятор давления пара от вспомогательного котлоагрегата на	
хозяйственные и бытовые нужды	195
12.2.5 Регулятор уровня в деаэраторе	195
12.2.6 Регулятор уровня конденсата в ПНД-1	195
12.2.7 Регулятор уровня конденсата в ПВД-2	195
12.2.8 Регулятор уровня конденсата в ПВД-3	196

Список литературы	241
Заключение	240
12.9.1 О реализованных регуляторах	236
12.9 Оценка полученной комплексной модели	234
12.8 РУД-1 – регулятор уровня в деаэраторе атмосферном	230
12.7.1 Реализация и тестирование работы РУК-4	229
12.7 РУК-4 – регулятор уровня конденсата в подогревателе № 3 ПВД-3	228
12.6.1 Реализация и тестирование работы РУК-3	225
12.6 РУК-3 – регулятор уровня конденсата в подогревателе № 2 ПВД-2	225
12.5.3 Тестирование работы регулятора РУК-1	221
уровня конденсата в ПНД-1	220
12.5.2 Краткое описание РУК-2 – дополнительного регулятора	
как из его копии сделать другой регулятор	220
12.5.1 Пошаговое описание модификаций первого регулятора,	
12.5 РУК-1 – основной регулятор уровня в подогревателе № 1 ПНД-1	220
12.4.2 Тестирование работы регулятора	214
12.4.1 Пошаговое описание действий для создания первого регулятора	210
12.4 Разработка РУГК – регулятора уровня в главном конденсаторе	210
такого подхода	203
работающих совместно с моделью объекта, плюсы и минусы	
12.3.2 Упрощенный «быстрый» способ реализации регуляторов,	
12.3.1 Блок управления клапаном	201
12.3 Типовые блоки управления оборудованием	201
12.2.18 Другие (локальные) регуляторы	197
12.2.17 Давление пара в отборе ТА	197
(основной и резервный регуляторы)	197
12.2.16 Давление свежего пара ПТУ	
12.2.15 Частота вращения ротора и электрическая мошность ТГ	197
насосами ПГНД	196
12.2.14 Температура конденсата перед конденсатными	
на выхоле из пологревателя пикового	196
12.2.13 Регулятор температуры волы промежуточного контура	
на выхоле из основных пологревателей промежуточного контура	196
12.2.11 Гегулятор уровня в цистерне соора конденсата	
12.2.11 Регулятор уровня в цистерне сбора конденсата	196
промежуточного контура и в пиковом пологревателе	196
12.2.7 Регулятор уровня конденсата в конденсаторе	190
	106



В данной методике приведено пошаговое описание процесса создания модели турбины на базе теплогидравлического кода HS, являющегося одним из модулей среды динамического моделирования SimInTech.

Идеология «теплогидравлического кода», сложившаяся в атомной отрасли и некоторых других отраслях техники, на многих предприятиях позволяет разделить задачу построения модели сложного теплотехнического объекта на две части, примерно равные по сложности, а именно: а) разработка типовых «блоков» и типовых математических моделей, стоящих за каждым из блоков, а также метода их совместного решения; б) разработка собственно самой модели того или иного объекта.

Если первую задачу решает разработчик теплогидравлического кода и его блоков и делает это по возможности универсальным способом, теоретическим и не зависящим или слабо зависящим от конкретной модели объекта, то вторую задачу решает пользователь (пользователи) кода, применяя стандартные подпрограммы и блоки для своих, уже конкретизированных нужд, настраивая их под особенности конкретного объекта. При этом вторая задача решается уже без непосредственного написания уравнений динамики типовых элементов (трубопровод, узел смешения, насос, регулирующий клапан, граничное условие и т. д.), а пользователь кода использует проработанные ранее элементы как готовые «черные ящики» с описанными входными свойствами и выходными параметрами (результатами расчета кода). Это дает возможность многократного повторного использования стандартных подпрограмм и облегчает пользователям кода их задачи, но не снимает требований к квалификации пользователей – для корректного создания модели от пользователя требуется понимание как архитектуры самого кода, принципов, на которых построена схема решения, так и понимание моделей, принятых допущений и ограничений, заложенных в код и в конкретные математические модели того или иного оборудования либо элемента схемы.

Расчетная теплогидравлическая схема HS в SimInTech строится в схемном окне на своем расчетном слое (шаблоне проекта), в котором допустима простановка только тех блоков, которые может обработать модуль HS. Построение такой схемы ведется по определенным правилам, часть из которых будет поясняться по мере набора схемы. Но, вообще говоря, данное руководство ориентировано на пользователей SimInTech, уже прошедших другие базовые обучающие курсы и знакомых в той или иной степени с интерфейсами SimIn-Tech (например, со скриптами, сигналами, блоками и т. п.).

Методика основана на версии SimInTech 2.21.3.17. По мере разработки кода HS результаты, полученные в следующих версиях, могут в какой-то части отличаться от результатов, приведенных в данной методике.

После создания модели ПТУ в методике приведено пошаговое описание разработки модели датчика, исполнительного механизма и регуляторов для комплексной модели на примере регуляторов уровня в подогревателях, в деаэраторе и в главном конденсаторе. Эта часть АСУ ТП создается в SimInTech на базе схемы общего вида (схемы автоматики) из общетехнической библиотеки блоков и средствами базы данных сигналов SDB, входящей в состав SimInTech, которая позволяет осуществлять синхронный расчет модели объекта и модели алгоритмов и регуляторов.

Выполнена настройка регуляторов, и описаны подходы к анализу работы и динамического поведения расчетной модели. Приведены некоторые примеры регуляторов и алгоритмов из более сложных проектов.

В итоге получается комплексная математическая модель, в которой решается задача совместного расчета модели объекта, его точек контроля (датчиков), алгоритмической части АСУ ТП и моделей исполнительных устройств (электродвигателей), осуществляющих воздействие на объект управления.



АСУ	-	автоматизированная система управления
АСУ ТП	-	автоматизированная система управления технологическими про-
		цессами
АУ	_	автоматическое управление
БД	_	база данных (сигналов)
БУК	_	блок управления клапаном
ВКУ	_	вспомогательная конденсационная установка
ГК	_	главный конденсатор
ДA	_	деаэратор атмосферный
Ду	_	условный диаметр трубопровода
ДУ	_	дистанционное управление
ДУУ	_	дроссельно-увлажнительное устройство
КГП	_	конденсат греющего пара
КПД	_	коэффициент полезного действия
МВт эл.	_	мегаватт электрической мощности
ПВД	_	подогреватель высокого давления
ПИ	_	пропорционально-интегральный (регулятор)
ПИД	_	пропорционально-интегрально-дифференцирующий (регулятор)
ПК	_	питательный клапан
ПНД	_	подогреватель низкого давления
ПЭБ	_	плавучий энергоблок
ПТУ	_	паротурбинная установка
РК	_	регулирующий клапан
РПН	_	разводочный питательный насос
РУ	_	реакторная установка
СУ	_	система управления
ПГНД	_	парогенератор низкого давления
TA	_	турбоагрегат
ТΓ	_	турбогенератор
ЧВД	_	часть высокого давления
ЧНД	_	часть низкого давления
ЭКН	_	главный конденсатный электронасос
ЭКНС	_	конденсатный электронасос сливной
ЭПН	_	главный питательный электронасос
HS	_	от англ. Hydro Solver, наименование теплогидравлического расчет-
		ного модуля (кода) среды SimInTech



Модель турбины для своего создания требует определенных исходных данных. Как минимум это принципиальная тепловая схема турбины, основные параметры (давление, температура или энтальпия) рабочей среды в одном из номинальных режимов работы ПТУ, расход свежего пара на турбину, параметры пара в отборах, давление в конденсаторе. Расход и температура воды, охлаждающей конденсатор. Расходы пара из отборов, номинальные параметры работы ПНД и ПВД, характеристики насосов, диаметры трубопроводов и высотные отметки того или иного оборудования/трубопровода.

На основе этих и других исходных данных возможна разработка модели ПТУ.

### 1.1 Исходные данные

В качестве исходных данных при создании этой модели использовались статья [1], отчет [2], тепловая принципиальная схема паротурбинной установки [3].

Пределы и объем моделирования: от входа свежего пара на турбину до выхода питательной воды из подогревателя высокого давления. Из оборудования смоделировано: проточная часть турбины, включая ступени и отборы пара, модель ротора и электрогенератора; конденсатор КП-3200; группа конденсатных насосов; ПНД-1 (ПН-100); деаэратор атмосферный; конденсатный сливной электронасос; группа питательных насосов; ПВД-2,3 (ПВ-280-1 и ПВ-280). Основные части модели обведены красными прямоугольниками на рис. 1.1.1 (рисунок взят из [1]). Парогенераторы, эжекторы, сетевые подогреватели ПС-450 и ПС-450П не входят в объем моделирования, представленный в методике, однако могут быть относительно несложно читателем добавлены к модели для более полного моделирования других режимов. Арматура и точки контроля не входят в объем моделирования, кроме самых необходимых регулирующих клапанов, позволяющих при ручном управлении ими настроить номинальное состояние.

Следует также учесть, что рассматриваемая модель – учебная, и некоторые важные моменты здесь описаны чрезмерно подробно, а некоторые (либо не очень важные, либо следующего уровня сложности), наоборот, опущены. Переходные режимы не рассматриваются, кроме некоторых переходных режимов около номинального состояния при его настройке.



Принципиальная схема пароконденсатного цикла ПЭБ: ПГ – парогенератор; ГГ – главная турбина; Г – генератор; ГК – главный конденсатор; ДУУ – дроссельно-увлажнительное устройство; КЭН – конденсатный электронасос; ПЭЖ-1, ПЭЖ-2 – пароструйные эжекторы; ЦЭН – циркуляционный электронасос; ЭКС – электронасос конденсатный сливной; ПЭН – питательный электронасос; П1, П2, П3 – подогреватели конденсата и питательной воды; Д – деаэратор; ОПВ – основные подогреватели воды промежуточного контура; ППВ – пиковый подогреватель воды промежуточного контура;

КОПК – компенсатор объема промежуточного контура; ПГНД – парогенератор низкого давления; ОУ – опреснительная установка; РК – регулирующий клапан; КТ – клапан травления

Рисунок 1.1.1 Основные части модели ПТУ

Параметры и исходные данные по оборудованию установки приведены по мере разработки модели. Приведем здесь, в табл. 1.1.1 только основные параметры для одного из режимов работы ПТУ, на которые будет настраиваться модель.

Наименование параметра	Значение
Электрическая мощность генератора при КПД генератора 98 %	35.0 МВт
Номинальная частота вращения ротора	50 об/с (3000 об/мин)
Абсолютное давление свежего пара перед ПТУ	35 кгс/см²
Температура свежего пара перед ПТУ	285 °C
Расход свежего пара на турбину	220 т/ч

Таблица 1.1.1 Основные параметры моделируемого режима работы ПТУ

Окончание табл. 1.1.1

Наименование параметра	Значение
Абсолютное давление пара в I отборе	9.2 кгс/см²
Абсолютное давление пара во II отборе	3.64 кгс/см²
Абсолютное давление пара в III отборе	0.96 кгс/см <sup>2</sup>
Абсолютное давление пара в конденсаторе	0.051 кгс/см²
Расход пара из I отбора (греющий пар на ПВД-3)	18.4 т/ч
Расход пара из регулируемого теплофикационного II отбора (греющий пар на ПВД-2, на ДА, плюс расход на другие нужды)	66.6 т/ч (13 + 5 + 48.6) т/ч
Расход пара из III отбора (греющий пар на ПНД-1)	10 т/ч

### 1.2 Основные положения модели

В коде HS модель теплоносителя является однокомпонентной и односкоростной, что означает расчет параметров теплоносителя в каждом контрольном объеме с одним давлением и одной температурой (энтальпией), а расход теплоносителя между контрольными объемами вычисляется как одна переменная – расход пароводяной смеси, не выделяя отдельно паровую и жидкую фазы. Это накладывает определенные ограничения на моделируемые процессы – мы не можем смоделировать неконденсирующиеся газы в трактах течения рабочего тела, в конденсаторе, в деаэраторе и подогревателях, не можем смоделировать эффект «проскальзывания» одной фазы относительно другой. Не моделируются какие-либо неравновесные процессы с одновременным наличием в одном контрольном объеме перегретого пара и/или недогретой воды. Единственный элемент, где реализована двухтемпературная модель в коде HS, – это пароводяной компенсатор объема.

Можно считать, что модель турбины на базе кода HS является в этом смысле «идеальной» – никаких подсосов воздуха не моделируется, рассматривается только течение чистого водяного теплоносителя (вода, водяной пар или их смесь).

Для сокращения объема материала теплопотери к окружающей среде не рассматриваются подробно – считаем их пренебрежимо малыми. Хотя, вообще говоря, их надо учитывать и моделировать, и код НS позволяет это сделать.

Начнем создавать модель ПТУ по частям, отлаживая сначала по отдельности составные части будущей модели. Практика создания сложных теплогидравлических моделей динамики заключается в следующем: набирается относительно небольшая часть модели, задаются начальные значения параметров и свойства объектов, запускается на расчет, разработчик убеждается в том, что схема устойчива, рассчитываемые параметры адекватны моделируемой установке и в той или иной степени близки к требуемым номинальным параметрам. При сильных отклонениях или неустойчивости вносятся корректировки в задаваемые параметры расчетной схемы, в начальные условия и/или в топологию, итерация «тестовый расчет – оценка» повторяется, затем еще и еще раз, до достижения приемлемого результата. Таким образом, в несколько итераций разработчик добивается того, что моделируемая часть большой модели по своим параметрам (на которые схема выходит «сама» через 10...60...600 секунд рас-

чета) близка к номинальным, и на этом отдельная, автономная отладка этой части завершается, происходит переход к следующей части. Набрав таким образом несколько автономно отлаженных частей, разработчик далее соединяет их в одну большую модель (так же итерациями). За счет того, что по отдельности части уже были отлажены на согласованные друг с другом номинальные параметры, при интеграционном процессе происходит минимум корректировок.

Если делать сразу одну большую модель без промежуточных тестовых моделирований и оценки полученных результатов, есть близкий к 100 % риск получить большую неработоспособную модель, в которой почти невозможно найти причину неустойчивости (как правило, не одну), и скорректировать такую модель, чтобы она начала считать верно, не будет представляться возможным.



Проточная часть состоит из последовательности внутренних узлов и каналов кода HS, входом в которые будет являться граничное условие типа «расход» (блок типа **HS** – **Подпитка**), а выходом из модели будет являться граничное условие типа «давление» (блок типа **HS** – **Граничный узел**), моделирующий конденсатор. Также будет смоделирован каждый из трех отборов своим каналом-ответвлением и своим блоком типа **HS** – **Подпитка**, с заданным отрицательным расходом, соответствующим номинальному расходу пара в каждом отборе.

Такая нодализационная схема позволяет:

- «держать» на заданном уровне расход теплоносителя через соответствующие ступени ПТУ и расходы пара из каждого отбора;
- 2) «держать» заданным и постоянным давление на выхлопе из ПТУ (каким оно и должно быть в конденсаторе при стационарной работе турбины);
- 3) при заданных расходах и давлении на выходе отладить характеристики ступеней турбины, подобрать их таким образом, чтобы при номинальном расходе и параметрах пара на входе в ПТУ давление и температура (энтальпия) пара в отборах были близки к номинальным, а получаемая в модели генератора электрическая мощность соответствовала паспортным данным ПТУ.

Другими словами, тестовые запуски на расчет такой модели (как бы зажатой между граничными условиями типа «давление» с одной стороны и «расход» с других сторон) позволяют привести в соответствие с номинальными параметрами внутреннее содержимое проточной части. И, отладив ее один раз, мы в дальнейшем будем уверены, что при номинальных параметрах свежего пара и номинальном давлении в конденсаторе, а также при номинальных расходах в отборах пара проточная часть «выдаст» нам номинальные распределения давлений и температур по отборам и номинальную мощность на электрогенератор.

### 2.1 Создание файла проекта проточной части

Будем создавать модель турбины в директории «turbine» на диске C:\ (можно создавать в любом другом месте, в методике будем исходить из указанного расположения). Автономные модели частей ПТУ будем набирать сначала каждую в своей директории. Создайте директорию «C:\turbine\Проточная часть», затем создайте новый проект HS в среде SimInTech и сохраните этот новый проект в файл C:\turbine\Проточная часть\TK-35-38.prt.





Для этого выполните следующие действия:

- запустите SimInTech, выберите пункт главного меню Файл Новый проект – Схема теплогидравлическая (рис. 2.1.1). Откроется новый проект с расчетным слоем HS;
- выберите пункт главного меню Файл Сохранить проект как... и в появившемся диалоговом окне выберите расположение «C:\turbine\Проточная часть», впишите имя файла TK-35-38.prt (рис. 2.1.2);
- проект сохранится, а в заголовке окна появится новое имя проекта.

🦃 Сохранение прое	екта				×
$\leftarrow \rightarrow \cdot \cdot \uparrow$	« Локальный диск (C:) »	turbine > Проточная част	ть v õ	🔎 Поиск: Про	точная часть
Упорядочить 🔻	Новая папка				
📌 Быстрый досту 🛄 Desktop <table-cell-rows> Загрузки</table-cell-rows>	уп * Имя * •	^ Нет элементов, уди	Дата изменения овлетворяющих условия	Тип м поиска.	Размер
<u>И</u> мя файла: Тип файла:	TK-35-38.prt				~
<u>т</u> ин файла:	тросківі ( .ptt)			Со <u>х</u> ранить	Отмена .:i

Рисунок 2.1.2

### 2.2 Набор гидравлической части схемы

При активном проекте с расчетным слоем HS палитра блоков в SimInTech претерпевает изменения, и остаются доступными только блоки, допустимые к размещению на теплогидравлической схеме кода HS.

Разместите на новой схеме блоки:

- 9 блоков типа НЅ Внутренний узел (три из них для моделирования ответвлений из отборов);
- 9 блоков типа **HS Канал**;
- 1 блок типа НЅ Граничный узел;
- 4 блока типа **HS Подпитка**.

Каналы лучше размещать, не соединяя пока их с узлами, отдельно. Это позволит более тщательно соединить их с узлами, при этом не возникнет «проблемных» мест (иногда бывает не видно, что узел с каналом рассоединен). Хотя есть возможность, размещая каналы, сразу их соединять с узлами. После размещения всех блоков у вас должна получиться картинка, аналогичная рис. 2.2.1.



Рисунок 2.2.1

Все размещаемые блоки находятся в библиотеке блоков на вкладке **Теплогидравлика**, в первых двух выпадающих пунктах (см. рис. 2.2.2 и 2.2.3).



Рисунок 2.2.2

При простановке на схему этих блоков в них остаются заданными свойства по умолчанию, которые хранятся в библиотеке блоков. Имена блоков автоматически инкрементируются на 1. Сделайте так, чтобы внутренние узлы слева направо именовались Node\_1, Node\_2, Node\_3, Node\_4 и т. д. до Node\_7, 8, 9 для трех узлов под каналами – отводами для отборов. Имена нам потребуются в дальнейшем для привязки к ним графиков и вывода отладочной информации. Для каналов аналогично – вдоль проточной части пусть будут каналы Channel\_1, Channel\_2 и т. д. до Channel\_9 для 3-го отбора.

При наборе схемы, по сути, есть всего две задачи – задать верную топологию (нодализацию) расчетной схемы, задать верно свойства блоков (начальные и геометрические параметры, граничные условия). Причем обе задачи являются крайне важными, а свойства следует осознанно и на основе исходных данных задавать практически у каждого размещенного блока. Некоторые свойства можно будет оставить заданными по умолчанию – однако это скорее исключение, чем правило. От правильности задания свойств зависит конечный ответ и поведение модели при расчетах. При этом на практике часто происходит «противостояние» между разработчиком кода и пользователями. Последние говорят, что код считает неверно, а разработчик говорит, что начальные и геометрические параметры пользователи задали неправильно, отсюда и неверный результат. Истина, как обычно, находится посередине, но при создании какой-то новой модели приходится как пользователям кода подстраиваться под особенности реализации моделей блоков, так и разработчику кода – иногда что-то менять или улучшать в моделях. Чаще всего, конечно, неправ пользователь, потому что код и его блоки были проверены на N предыдущих моделях, а пользователь делает каждый раз уникальную новую модель. Но бывает, что находятся ошибки и в коде.



Рисунок 2.2.3

Приведем простой пример, когда неправ пользователь. Допустим, у нас в каком-то блоке корректным образом реализована модель II закона Ньютона, и ускорение рассчитывается в зависимости от суммы приложенных сил и массы объекта a(t) = F(t)/m. Неопытный пользователь или по незнанию, или просто по невнимательности ставит блок на схему и задает в свойствах блока отрицательную массу –3 кг. При этом на выходе получает ускорение, направленное против приложенной силы, о чем и сообщается разработчику кода, что «у вас там ошибка». Хотя ошибка совсем не там...

В теплогидравлических задачах среда, как правило, течет из области с высоким давлением в область с низким давлением. Но это верно при одной и той же высотной отметке узлов. При расположении какого-либо узла внизу давление там будет выше на величину гидростатического напора, и может быть уже ситуация, когда направление движения среды (расход среды) происходит из узла с меньшим давлением, находящимся вверху, в узел с большим давлением, находящимся внизу. Неопытному пользователю это кажется ошибкой.

Поэтому следует относиться к заданию свойств блоков максимально аккуратно. К коду отношение должно быть таким: да, код может содержать ошибки, иногда и грубые, однако вероятность этого невелика, и в первую очередь следует перепроверить свои заданные свойства. Кроме этого, при наборе схем есть еще ряд негласных «правил» и практических приемов работы, полезных для приведения схемы в работоспособное состояние. Об этом будет позже. Разместив все нужные блоки на схеме, следует соединить их линиями связи – каждую подпитку подключаем к своему внутреннем узлу, а каждый вход и выход канала также подключаем к своему внутреннему или граничному узлу, как показано на рис. 2.2.4.



Рисунок 2.2.4 Блоки, соединенные линиями связи

Далее, для проверки корректности топологии, можно нажать на кнопку инициализации (см. рис. 2.2.4). И если вы проделали все верно, то кнопка **Стоп** (красный квадрат) станет активной, а в нижней строке схемного окна появится надпись **Старт**. Это означает, что схема набрана формально корректно и годится для запуска на расчет.

По умолчанию у размещенных блоков заданы свойства 20-градусной воды при атмосферном давлении, в каналах задан диаметр 0.01 м и длина 1 м. А у блоков, моделирующих граничные условия, выведены на расчетную схему величина расхода (у подпиток по умолчанию 0) и величина давления с температурой для граничного узла. Для отладки схемы бывает полезно в процессе расчета видеть основные параметры блоков на самой расчетной схеме. Давайте добавим такие блоки для внутренних узлов и для размещенных каналов. Нас будут интересовать давления и температуры у внутренних узлов, а также расходы по каналам. Это вкладка Просмотр параметров, там выбираете В узле и блок типа **HS** – Контроль давления, температуры и энтальпии в узле. Разместите его на каждом узле схемы. Для каналов выберите блок из той же вкладки, пункт В канале, и там блок типа HS – Контроль массового расхода в канале. Разместите этот блок на канале входном в левой части схемы, на каналах между отборами, на каналах отборов и на одном канале на выходе схемы. Блоки следует размещать, кликая на соответствующий узел или канал, чтобы блоки контроля становились дочерними к расчетным блокам. Блоки контроля сами по себе ничего не считают, они просто визуализируют расчетные параметры родительских блоков.

При инициализации такой схемы у вас должна получиться картина, похожая на рис. 2.2.5.



Рисунок 2.2.5

При запуске на расчет параметры схемы не должны измениться, т. к. давление в граничном условии совпадает с давлениями во всех контрольных объемах схемы, а расходы во всех подпитках нулевые. То есть модель будет пребывать в «холодном» стационарном состоянии.

Давайте зададим некоторый произвольный небольшой расход на входе и на выходах из отборов, для проверки работоспособности набранной схемы. Например, задайте в подпитках следующие значения расходов: +0.4, -0.05, -0.1 и -0.2 кг/с. Для задания свойств следует перевести схему в остановленное состояние (кнопкой **Стоп**), то есть выключить расчет или инициализированное состояние. Пример задания свойства приведен на рис. 2.2.6.

🏟 Свойст	ва : InputFlow_1	1				—		×
Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные	слои			
Название				Имя	Формула	:	Значени	e
Расход, к	r/c			G	0.4		0.4	
Температ	ypa, °C			т			20	
Определя	ющее свойст	во, по ко	торому в	ы Defi			Темпера	атура
Максимал	њное противо	давлени	е, Па	Pmax			1000000	0
Концентр	ация пассивн	ых приме	есей, кг/к	г С_р			[]	

Рисунок 2.2.6 Задание расхода в подпитке

Таким образом, на входных каналах должен установиться через время расход, равный +0.4 кг/с, на каналах отборов +0.05, +0.1 и +0.2 кг/с, на канале между 1-м и 2-м отборами +0.35 кг/с, на следующем между 2-м и 3-м отборами +0.25 кг/с и потом на выходе +0.05 кг/с. Обратите внимание, что в трех подпитках на отборах следует задать отрицательные значения расходов, что означает «унос» теплоносителя из этих узлов с заданным расходом. Но расход в каналах (во всех в данном случае) будет насчитан положительным, т. к. при размещении каналов мы их разместили по ходу течения теплоносителя, в том числе и по ходу течения теплоносителя в отборы.

Если вы все проделали верно, то результат расчета на 5-й секунде и далее будет похож на рис. 2.2.7.



Рисунок 2.2.7 Тестовый расчет с холодной водой

В данном случае, так как мы задали расход, соразмерный с проходным сечением каналов, решение схемы «сошлось», и через несколько секунд она вышла на стационарный режим с указанными расходами. Обратите внимание, что давления во внутренних узлах стали равными уже не 1 атмосфере (100 000 Па, заданным по умолчанию), а пересчитались в новые значения, и мы получили какой-то перепад давления на каждом из каналов. При этом в третьем отборе, например, давление опустилось ниже атмосферного для «обеспечения» заданного расхода.

Однако на практике часты ситуации, когда начальные параметры схемы, заданные геометрические свойства и граничные условия не так близко сочетаются или вообще друг другу не подходят (как в примере с формулой II закона Ньютона и отрицательной массой), тогда гидравлический решатель HS не может справиться с постановкой задачи, и решение расходится (схема становится неустойчивой и либо в некоторых узлах давление выходит в нижнее ограничение в 1000 Па, либо улетает в плюс бесконечность). Например, вы можете «случайно» ошибиться и задать расход в третьем отборе не –0.2, а –2 кг/с. При этом схема не сможет обеспечить такой же расход в канале данного отбора (не хватит перепада давления и в канале диаметром 1 см, который задан, не сможет установиться такой расход), и давление в узле, к которому подключена такая подпитка, уйдет почти сразу в 1е3 Па. Схема при этом останется «работоспособной», но величина давления 1е3 Па – сигнал пользователю кода HS, что он вышел за пределы моделирования. В другой ситуации вы можете увидеть или скачки давлений, температур и/или расходов, и надо отличать такой «аварийный» и, как правило, неверный расчет от правильного, когда расчетная схема «сошлась» и все балансы (массы, энергии) в стационарных и переходных режимах соблюдаются.

Обратите внимание, что в процессе тестового расчета модель вышла на стационарный режим (то есть в такой режим, в котором параметры не меняются или меняются незначительно в малой окрестности равновесного состояния) в течение нескольких первых секунд расчета. В более сложных схемах бывает так, что требуется подождать 60...600 секунд, а иногда и более, для того чтобы схема вышла на т. н. «стационар». Случается что схема не может выйти в стационарный режим (например, переполняется или опустошается бак, система совершает некоторые сильные колебания вокруг точки равновесия, или вообще набранная модель как система неустойчива, или выбранный шаг интегрирования слишком велик и не позволяет численной схеме сойтись).

Давайте подробнее рассмотрим этот факт – выхода на стационар – для набранной, относительно простой пока схемы, для чего построим график давлений во внутренних узлах схемы. Для этого:

- выделите внутренние узлы вдоль проточной части от подпитки до граничного узла (исключая его). Чтобы выделить узлы, зажмите клавишу Shift на клавиатуре и левой кнопкой мыши прощелкайте 6 узлов, с зажатой клавишей Shift, и узлы выделятся совместно, подсветившись красными прямоугольниками, см. рис. 2.2.8;
- далее на любом из выделенных узлов нажмите правую кнопку мыши, в появившемся контекстном меню выберите пункт Свойства;
- в открывшемся окне свойств убедитесь, что в заголовке будет перечислено 6 имен узлов. В нашем случае, так как мы ставили узлы последовательно на схему слева направо, они имеют имена Node\_1, Node\_2 и т. д. до Node\_6, см. рис. 2.2.9;
- перейдите на вкладку Параметры;
- выберите одну строчку с параметром Давление, Па (параметр с именем\_p);
- нажмите внизу кнопку с графиком (рис. 2.2.9).

После выполнения этих действий в проекте появится новое графическое окно с временным графиком, в котором будет выведено 6 параметров, а именно: Node\_1.\_p, Node\_2.\_p, Node\_3.\_p и т. д. Почему это важно: в дальнейшем нам придется для отладки выводить те или иные графики, и механизм их создания мы уже не будем расписывать так подробно. Сейчас нам потребуется график давлений в узлах для наблюдения, оценки и анализа переходного процесса выхода расчетной схемы в стационарное состояние.



Рисунок 2.2.8 Выделение нескольких узлов для организации графика

🦃 Свойства: Node_1 Node_2 Node_3 Node_4 Node_5 Nod	le_6	- 0	Х
Свойства Параметры Общие Визуальные слои			
Название	Имя	Значение	
Давление, Па	_p	87165.568	^
Энтальпия, Дж/кг	_h	83911.226	
Температура, °С	_t	20.002058	
Удельный объём, м³/кг	_v	0	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	_rho	0	
Расходы по веткам, кг/с	_9	[]	
Расход подпитки в узел, кг/с	_gp	0	
Концентрации пассивных примесей, кг/кг	_c_passive	[]	
Масса теплоносителя, кг	_m	0	
Номер связного контура, к которому принадлежит узел	_n_cont	0	
Производная (др/дН)р при постоянном давлении	_drdh_p	0	
Производная (др/дР)Н при постоянной энтальпии	_drdp_h	0	
Тепловая мощность, Вт	_qf	0	
Мошность от металла. Вт	amet	0	~
📀 ta 🛍 🔍 🗞   A 🔤 🖳 🍯			

Рисунок 2.2.9 Выбор нужного параметра у нескольких узлов



Рисунок 2.2.10 Процесс при максимальном шаге = 0.05 секунды



Рисунок 2.2.11 Процесс при максимальном шаге = 0.01 секунды

Если в параметрах расчета установить конечное время расчета равным 1 секунде (примерно за это время достигается стационарное состояние), шаг расчета и шаг синхронизации оставить 0.05 секунды, запустить на расчет, то вы получите график, как на рис. 2.2.10. При этом видны изломы и не очень адекватное поведение параметров в переходном процессе (хотя схема в итоге сошлась и устойчива). Если поставить максимальный шаг расчета равным 0.01 секунды, получите график, близкий к рис. 2.2.11. Там тоже есть изломы, и по факту это кусочно-линейные графики, т. к. они выведены с шагом 0.01 секунды. Но они уже гораздо лучше визуально отображают переходной процесс, который произошел в узлах схемы. На практике для большинства теплогидравлических задач хватает шага расчета порядка 0.01...0.05 секунды для адекватного описания всех процессов. В редких случаях, или в специфичных задачах, требуются более мелкие шаги. Мы будем использовать далее шаг 0.05 секунды, поскольку не будем рассматривать какието быстро протекающие процессы, такого шага дискретизации нам хватит.

Что мы можем сказать по полученному графику переходного процесса, и почему он получился вообще? Дело в том, что в каждом проставленном блоке – в узлах и в каналах – есть ряд свойств, которые можно отнести к начальным условиям. Для узлов это начальное давление и начальная температура (или начальная энтальпия – в коде HS можно задаваться либо температурой, либо энтальпией среды). Для каналов – тоже начальное давление и начальная температура (энтальпия) для ячейки канала, а также начальный расход среды в канале. По умолчанию в блоках проставлено давление 1e5 Па и температура 20 °С. Для каналов стоит автоматическое определение начальных условий, и в них код сам вычисляет давления в ячейках вдоль канала, а расход устанавливает нулевым в начальный момент времени. Далее все параметры пересчитываются на каждом шаге расчета. Подпитки начинают свою работу сразу, на первом же шаге расчета, граничный узел тоже не меняет своего давления, а остальным блокам приходится «подстраиваться» под заданные граничные условия. Поэтому требуется некоторое время расчета для этой подстройки, а на графике мы видим, что все 6 давлений стартуют со значения в 100 000 Па и постепенно выходят на равновесные (для заданных расходов в подпитках и для заданного давления в конце тракта) значения.

В сложных моделях, для того чтобы не ждать каждый тестовый запуск этого выхода на стационарное состояние и из-за практической невозможности корректно задать начальные параметры в каждом блоке (на это потребуется колоссальное время, количество блоков может достигать нескольких тысяч), используют механизм т. н. рестарта. Пользователь дожидается выхода на стационар (один раз), когда произойдет стабилизация параметров, далее записывается исходное состояние (рестарт), и схема настраивается на запуск не с начальных свойств, записанных в блоках схемы, а с тех значений, которые записаны в рестарте. Это кратно сокращает время на разработку и отладку модели, потому что не требуется каждый запуск ждать выхода в равновесное состояние. Кроме того, в сложных моделях таких равновесных состояний может быть не одно, а 10, 20 или 100. Они записаны в файлы с разными именами, и модель можно запускать с какого-то выбранного состояния. В блоках мы можем задать только одно начальное состояние.

Ради интереса и практики вы можете задать давления по узлам и хотя бы расходы по каналам, более близкие к тем значениям, которые получаются в стационарном состоянии, и увидеть, что схеме требуется уже меньше времени, чтобы к нему прийти. Если задать идеально верно все начальные свойства, то схема сразу запустится на расчет с равновесных значений, а переходного процесса на графике не будет.

### 2.3 Процесс расширения пара

На данном этапе мы построили только гидравлическую схему проточной части и никак ее не параметризовали. Просто проверили верность топологии на аб-

страктных параметрах расходов холодной воды. А для верной работы этой схемы на номинальных параметрах турбины следует разместить еще 4 блока типа **HS – ступень турбины**, задать верно их характеристики, разместить 1 блок типа **HS – Ротор**, 1 блок типа **HS – Электрогенератор**, верно все соединить и задать свойства и начальные параметры схемы, затем привести все в соответствие с одним из номинальных режимов ПТУ.

Однако, прежде чем это проделать, следует из исходных данных правильным образом выбрать нужную информацию для задания характеристик ступеней турбины и для лучшего понимания, какие именно параметры пара должны быть вдоль проточной части. В исходных данных [2] приведено несколько режимов работы ПТУ: спецификационный (35 МВт эл.), режим максимальной тепловой мощности (22,2 МВт эл.), режим максимальной электрической мощности (38,5 МВт), номинальный теплофикационный, номинальный конденсационный. В работе [1] приведены аналогичные режимы (конденсационный и теплофикационный номинальные с 35 МВт эл., конденсационный максимальный, 38 МВт эл., см. рис. 2.3.1 а, б, в). Выберем один из них, на который будем настраивать модель, – пусть это будет спецификационный режим, в котором электрическая мощность составляет 35 МВт, в наличии одно из высоких значений расхода пара из регулируемого теплофикационного отбора (66.6 т/ч), нулевой расход пара на пиковый подогреватель. На рис. 2.3.1 наиболее близкий режим к выбранному – это «б», теплофикационный номинальный режим.

Для задания характеристик ступеней турбины в коде HS нам требуется знать как минимум параметры пара на входе и выходе каждой ступени, а также потери в ступени. Причем в общем случае это должно быть известно при разных расходах теплоносителя через ступень, от нулевого до номинального, и при разных частотах вращения. Эти данные далеко не всегда есть в наличии, поэтому приведем здесь упрощенный способ задания характеристики, пригодный в том случае, когда у нас есть параметры пара только на входе и выходе из турбины и величины давления пара в отборах.

Наименование параметра	Значение
Электрическая мощность генератора при КПД генератора 98 %	35.0 МВт
Номинальная частота вращения ротора	50 об/с (3000 об/мин)
Абсолютное давление свежего пара перед ПТУ	35 кгс/см² (3.43 МПа)
Температура свежего пара перед ПТУ	285 °C
Расход свежего пара на турбину	220 т/ч (61.1 кг/с)
Абсолютное давление пара в I отборе	9.2 кгс/см² (0.913 МПа)
Абсолютное давление пара во II отборе	3.64 кгс/см² (0.357 МПа)
Абсолютное давление пара в III отборе	0.96 кгс/см² (0.094 МПа)

Основываясь на данных [2], будем строить процесс расширения пара в ПТУ при следующих параметрах спецификационного режима:

Окончание таблицы

Наименование параметра	Значение
Абсолютное давление пара в конденсаторе	0.051 кгс/см² (0.005 МПа)
Расход пара из І отбора (совпадает с расходом греющего пара на ПВД-3)	18.4 т/ч
Расход пара из регулируемого теплофикационного II отбора (расход греющего пара на ПВД-2, плюс расход на другие нужды)	66.6 т/ч (13+53.6) т/ч
Расход пара из III отбора (совпадает с расходом греющего пара на ПНД-1)	10 т/ч

Примечание: обратите внимание, что часть расхода из второго отбора (из 66.6 т/ч) идет на ПВД-2, в размере 13 т/ч.

Из исходных данных становится очевидно, что на турбину поступает **220 т/ч** свежего пара. После первого отбора расход пара должен составлять 220 – 18.4 = **201.6 т/ч**. После второго отбора 220 – 18.4 – 66.6 = **135 т/ч**. После третьего отбора расход пара будет равным 220 – 18.4 – 66.6 – 10 = **125 т/ч**, и это расход пара, поступающего в итоге в конденсатор (значит, с этим же расходом конденсатные насосы должны откачивать конденсат, это пригодится далее при разработке модели конденсатора). Таким образом, мы получили, что через 4 ступени турбины (поскольку отборов три, мы будем моделировать турбину при помощи 4 блоков типа «ступень турбины», эквивалентным образом, хотя в действительности ступеней может быть больше) будет идти расход пара, равный соответственно 220, 201.6, 135 и 125 т/ч.



**Рисунок 2.3.1** Процессы расширения пара в турбине для расчетных режимов в координатах *h*,s-диаграммы: a) *N* = 35 MBT эл., *Q* = 0; б) *N* = 35 MBT эл., *Q* = 0 MBT; в) *N* = 38 MBT эл., *Q* = 0



Рисунок 2.3.1 (окончание)

Предположим, что нам неизвестен процесс действительного расширения пара (как указано на рис. 2.3.1 а, б, в), а известны только начальные параметры пара, давления в отборах и итоговая электрическая мощность на генераторе. Основываясь на этих данных, мы можем построить изоэнтропийную линию начиная из точки p0 = 3.43 МПа, t0= 285 °С и до давления в конденсаторе 0.005 МПа, отмечая на ней давления в отборах и записывая величину энтальпии. Можно воспользоваться или бумажной версией h,s-диаграммы, или какой-либо из электронных версий.



Рисунок 2.3.2 Свежий пар на турбину

Например, на рис. 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5 и 2.3.6 приведены скриншоты из программы «Диаграмма HS для воды и водяного пара v2.5.2017.125». Этот максимальный теоретический (располагаемый) теплоперепад в действительности не весь перейдет в механическую мощность, а только его часть будет использована для раскрутки ротора турбины и электрогенератора. Какая именно часть – мы определим далее подбором, итерационным способом.





Рисунок 2.3.4 Давление II отбора

По рисункам видно, что энтальпия пара (в идеальном варианте) будет равна от входа к выходу из проточной части, по точкам 0, 1, 2, 3, 4 соответственно: 2940, 2669, 2509, 2305 и 1946 кДж/кг. В действительности энтальпия пара будет несколько выше, кроме нулевой точки, однако по рис. 2.3.7 видно, что более высокое значение энтальпии (около 2185 кДж/кг, сравните также с рис. 2.3.1, взятым из [1]) для реального процесса всего на 10–15 % выше, чем наша «идеальная» энтальпия 1946 кДж/кг. Поэтому в первом приближении построим характеристики ступеней турбины, основываясь на идеальном процессе, сделав просто КПД ступеней пониже. А затем, второй итерацией, когда в модели мы получим уже более реалистичные (приближенные к реальному процессу расширения пара) значения энтальпий в отборах и на выхлопе турбины, скорректируем характеристики ступеней.



Рисунок 2.3.5 Давление III отбора

Рисунок 2.3.6 Давление конденсатора



Рисунок 2.3.7 Примерная точка конца действительного процесса расширения пара в турбине (изобара от точки 4)

Отметим, что если количество отборов равно 3, то количество процессов «понижения параметров пара» равно 4 (линии 0–1, 1–2, 2–3 и 3–4). Именно этим процессам, или линиям, будут соответствовать блоки типа **HS** – **Ступень турбины**, которые далее мы разместим на схеме. Количество отборов, равное трем, мы уже сделали ранее при нодализации схемы. Если бы у нас была турбина с другими исходными данными, с другим количеством ступеней, то и расчетную схему мы бы делали по-другому.

### 2.4 Дополнение схемы ротором, ступенями

### И ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОМ

Вообще говоря, в нашей модели сейчас течет вода, и не очень корректно ставить ступени турбины. Однако пока что мы набираем топологию схемы, а параметризовать и приводить модель к правильным параметрам пара будем позже.

Дополним нашу схему ступенями турбины и ротором с электрогенератором. Для этого разместите на канале перед первым отбором блок типа **HS** – **ступень турбины**, как показано на рис. 2.4.1. Блок ротора мы будем размещать сверху, над каналами, поэтому механический порт у размещенного блока разместите сверху. Для этого надо зайти в свойства блока, вкладка **Порты**, и там выбрать **Сверху**, рис. 2.4.2.



Рисунок 2.4.1 Выбор блока HS – Ступень турбины

Блок ступени турбины должен стать «дочерним» блоком к каналу, то есть «прикрепиться» к своему каналу. Если попробовать подвигать канал на схеме, то вместе с ним будет перемещаться и ступень турбины – это верное поведение.

🏟 Свойства Т	ırbine_1		_		×	
Свойства Пар	аметры Общие	Порты	Визуаль	ьные с	лои	
1: MPORT	RT Параметры порта					
	Имя по	Имя порта МГ				
	Режим	порта В	Выход ~ Механическая ~			
	Тип свя	зи 🚺				
	Распол	ожени <mark>:</mark> С	Сверху 🗸			
	ота П	По умолчанию 🛛 🗸				
Невидимый 🗌 Неактивны						
	Клонируемый 🗌 На весь блок 🗌					
	По цен	гру 🗌	Угол по	линии		
	Полох X: 0 Y: -0.	кение пор 5	та вручну	/Ю		
	Автома Переме	тическое ещаемый і	неское положение 🗹 немый на схеме 🗌			

Рисунок 2.4.2 Расположение порта сверху

После размещения ступени турбины на канале до первого отбора скопируйте его в буфер обмена и еще три раза подряд вставьте этот блок, размещая каждый раз его на следующем канале вдоль проточной части.

Теперь размещаем блок ротора – он в библиотеке находится там же, где и ступень турбины, на пару строк выше. В этом блоке будет решаться уравнение моментов – с учетом момента инерции ротора, на него будут действовать ступени турбины с какими-то своими моментами, момент от силы трения и момент от электрогенератора.

Разместите ротор над всей схемой, поверните его на 90° по часовой стрелке, чтобы он стал горизонтальным на схеме, и задайте в нем 5 (пять) механических портов, как показано на рис. 2.4.3.


Рисунок 2.4.3

Блок электрогенератора будем размещать справа от ротора – выберите его из палитры блоков: вкладка **Турбонасосное оборудование**, блок типа **HS** – **Электрогенератор**. Разместите его на схеме справа напротив ротора. Его входной порт разместите слева (по умолчанию он будет справа), аналогично расположению порта у ступени турбины. А один из портов ротора разместите справа, напротив электрогенератора. Лучше, чтобы это был пятый порт ротора, хотя не принципиально. В итоге все механические порты будут расположены напротив друг друга, и, увеличив размер ротора, можно соединить механическими линиями связи все неподключенные механические порты, как показано на рис. 2.4.4.

В нашем случае размер блока ротора пришлось увеличить до 384×64 пунктов, а блока генератора – до 64×64. Тогда все порты оказались напротив друг друга. Следует отметить, что оформлению схемы тоже надо уделять внимание – хорошо оформленная схема гораздо лучше читается другими специалистами и позволяет своевременно обнаруживать ошибки самому разработчику.



Рисунок 2.4.4

Задайте у ротора номинальную частоту вращения равной 50 Гц, а начальную частоту вращения = 0 (ротор остановлен). Момент инерции лучше сделать побольше, например 2 кг · м<sup>2</sup>.

Если после этого запустить модель на расчет, то ротор начнет раскручиваться и в итоге дойдет где-то до оборотов с частотой 45 Гц. Напомним, что сейчас у нас в контуре вода, а характеристики ступеней не заданы (там стоит абстрактная характеристика «Тест турбины», которая моделирует какую-то тестовую ступень турбины с параметрами, далекими от нашей установки).

#### 2.5 Создание файлов с характеристиками ступеней

Итак, создание топологии расчетной схемы проточной части турбины завершено, номинальные параметры по давлениям и расходам пара нам примерно понятны (см. раздел 2.3), приступим к настройке расчетной схемы, чтобы приблизить процесс к номинальному.

В целях обучения мы будем делать всю настройку шаг за шагом, малыми шагами, и после каждого изменения анализировать, к чему приводит это изменение и как именно изменилась «равновесная точка», на которой работает модель.

Начнем с задания характеристик ступеней турбины. Характеристики, которые использует код HS для ступеней турбин, находятся в папке C:\SimInTech\ bin\DataBase\HS\ENGINES\TURBINES. Давайте возьмем какую-либо характеристику уже существующей ступени за основу, чтобы не выдумывать все с нуля. Например, скопируйте файл template1\_st1\_ksi.tbl и переименуйте его, задав ему имя (по имени моделируемой турбины) tk35\_38\_st1.tbl в той же папке. Откройте этот файл редактором таблиц SimInTech. Это специализированная утилита, где совмещен скрипт SimInTech и возможность автоматизации формирования двумерных массивов.

Ступень турбины для кода HS характеризуется двумя зависимостями – для местного гидравлического сопротивления (KSI) и для коэффициента полезного действия (КПД). Обе зависимости задаются как функции двух переменных – расхода и частоты вращения. Но т. к. исходные данные по турбинам и по компрессорам в общем случае могут быть разными, характеристика задается в функции от приведенного расхода и от приведенной частоты вращения. Под приведенной величиной понимается величина, нормированная на какой-либо множитель, или величина в других единицах измерения. Либо могут быть ситуации, когда характеристика задана в единицах измерения, преобразованных по какой-либо формуле. Подробнее смотрите в справке по блоку ступени турбины. Третья таблица – мощности – в блоке ступени турбины не используется, и нужна еще 4-я табличка, где заданы как раз коэффициенты нормировки и в каком виде заданы таблицы КПД и KSI. На рис. 2.5.1 представлен интерфейс, который вы должны увидеть, открыв на редактирование файл tk35 38 st1.tbl, скопированный из библиотечного файла template1 st1 ksi.tbl. Структуру таблиц и файла менять не надо – мы просто исправим некоторые вещи в скрипте и пересчитаем таблицы под нашу ситуацию.

У нас в табличном виде будет по оси X расход в т/ч, а по оси Y – частота вращения в относительных единицах (от 0 до 1, где 0 – ротор остановлен, 1 – ротор вращается с номинальной частотой 50 Гц). Таким образом, коэффициент перевода из кг/с (то, что считается в модели) в т/ч равен 3.6 (одна тонна в час равна 1000 кг в 3600 секунд = 1000/3600 кг/с, и наоборот), а коэффициент перевода из герц в относительную величину равен 0.02 (т. к. номинальная частота вращения будет равна 50 Гц, этому будет соответствовать единичная относительная частота вращения то 1/50 Гц = 0.02).

Поскольку в исходных данных у нас отсутствует характеристика ступеней, заданная в графическом или табличном виде, то задание здесь характеристики является довольно формальным простым делом, в котором мы зададим по сути одну номинальную точку, не зависящую от частоты вращения, и немного расширим границы применимости характеристики, задав ее до 1.2 относительной частоты вращения и для еще одной точки по расходу, выходящей также за 100%-ный номинальный расход. Например, для расхода 110 % от номинального. В дальнейшем если от модели потребуется верная работа в других режимах (и для них будут известны параметры), то характеристику надо будет скорректировать. Пока что мы говорим о 100%-ной номинальной работе модели и в окрестности этой точки.



Рисунок 2.5.1 Характеристика ступени турбины, взятая за основу

Если бы мы делали характеристику с нуля, то нам пришлось бы или руками заполнять каждую ячейку трех таблиц, или придумывать некоторую свою автоматизацию для заполнения. Воспользуемся той автоматизацией, которая уже есть в этом файле, для чего давайте поймем логику ее работы.

В файле, взятом нами за основу, таблицы KSI и КПД заполняются скриптом, написанным около каждой таблицы. Обратите внимание, что (см. рис. 2.5.1) в правой части интерфейса описана архитектура таблицы и скрипта, а именно: количество столбцов равно 3, количество строк 7, тип таблицы двумерная, имена матрицы, массива столбцов и массива строк заданы как M, X, Y. Из этого ничего менять не надо, просто, исходя из этих обозначений, построен скрипт, автоматически заполняющий таблицу, – в нем в итоге считаются векторы X размерностью Nx = 3, вектор Y размерностью Ny = 7 и матрица M размерностью [Ny, Nx].

## 2.5.1 Задание таблицы коэффициента сопротивления KSI для 1-й ступени

Идем последовательно по скрипту, начинаем с первой таблицы и меняем только то, что требуется, на наши величины.

Первые строки с комментариями, константами и до строки const w = ... оставляем без изменений – это все нам подходит:

```
initialization
{
Таблица коэффициента сопротивления KSI как функция
приведенного расхода Спр и приведенной частоты вращения Ыпр
X - G \Pi p = G [T/4];
Y - W \Pi p = W / W H O M [-]
Z - KSInp = (Pin-Pou)*2*S^2/Vnp/G^2 [-], где
S – [м^2] – плошадь проходного сечения, при котором рассчитывается значение KSIпр
в таблице
Vпр [м^3/кг] – удельный объем, при котором рассчитывается значение KSIпр в таблице
Pin,Pou [Па] – давление на входе и выходе
Для использования таблицы в программе необходимо вычислить нормировочные
коэффициенты, преобразующие приведенные характеристики в абсолютные с учетом того,
что программа работает в системе СИ
}
Vпр = 0.0207093; // удельный объем, при котором рассчитывается значение KSIпр
в таблице
S = 1; // площадь проходного сечения, при котором рассчитывается значение KSIпр
в таблице
Кх_Н = 3.6; // коэффициент перевода G в Gпр
Ку_Н = 0.02; // коэффициент перевода W[об/с] в Wпр
Kz_H = Vnp/S/S; // коэффициент перевода KSInp в KSI
const w = [0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2];
```

Константа Nel (см. рис. 2.5.1 и свой файл) далее в скрипте не используется – ее можно убрать вообще (всю строку).

Вместо const G = [5475.0]; вписываем наш расход 220 т/ч, а лучше даже сразу 221 т/ч, так как по нашим исходным данным 1 т/ч пойдет на ДУУ. Таким образом, определим две константы:

```
const G = [221.0];
const Gduu = [1];
```

Видно, что турбина, которую мы взяли за основу, – это какая-то большая паровая турбина мощностью почти 1300 МВт, с гораздо большим расходом пара. Имя константы **Gduu** напишите вместо **Gupl**.

Далее, исходя из наших исходных данных, на этой 1-й ступени турбины давление пара должно уменьшиться с 35 до 9.2 кгс/см<sup>2</sup>. Поэтому следующие две константы **Pin** и **Pou** определим как

```
const Pin = [35.0]; //кгс/см2
const Pou = [ 9.2];
```

На этом задание констант для скрипта расчета таблицы KSI почти завершено. Осталось только в самом скрипте подправить еще два момента. Так как мы задали давление в кгс/см<sup>2</sup>, его надо перевести в паскали. Для этого используем множитель 98066.5 вместо 1е5, который там задан ниже. И вместо **Gupl** напишите **Gduu** в скрипте. Два цикла для вычисления M[x,y] должны выглядеть таким образом:

```
for (i=2,Nx-1) begin
    X[i] = G[i-1] - Gduu[i-1];
    For (j=1,Ny) begin
        M[j,i]=(Pin[i-1]-Pou[i-1])*98066.5*2*S^2/Vnp*(3.6/X[i])^2;
        Y[j]=W[j];
    end;
end;
for (j=1,Ny) begin
        X[1]=0;
        M[j,1]=3*M[j,2];
        X[Nx]=1.1*X[Nx-1];
        M[j,Nx]=0.9*M[j,Nx-1];
end;
```

Если теперь сохранить файл характеристики и нажать в редакторе таблиц на зеленую кнопку пуск (**F9**) в заголовке редактора (кнопка называется **Вычислить таблицу**), то скрипт интерпретируется, строки и столбцы, а также ячейки таблицы KSI пересчитаются, и она у вас должна выглядеть идентично рис. 2.5.2. Если что-то отличается, проделайте вышеописанные операции еще раз.

М	Х	1	2	3
Y		0	220	242
1	0	196284.43	65428.144	58885.329
2	0.2	196284.43	65428.144	58885.329
3	0.4	196284.43	65428.144	58885.329
4	0.6	196284.43	65428.144	58885.329
5	0.8	196284.43	65428.144	58885.329
6	1	196284.43	65428.144	58885.329
7	1.2	196284.43	65428.144	58885.329

Рисунок 2.5.2 Таблица местного гидравлического сопротивления характеристики 1-й ступени турбины

Таким образом, мы получили, что независимо от частоты вращения ротора при нулевом расходе через ступень она будет иметь относительно большое сопротивление, на номинальном расходе около 65 500, при расходе на уровне 110 % от номинального сопротивление ступени будет поменьше – это искусственные добавки к номинальной точке, чтобы интерполяция характеристики ступени шла монотонно и более-менее гладко при работе на разных расходах. Если бы у нас были более подробные исходные данные, то можно было бы задать больше точек по расходу, задать зависимость от частоты вращения, а два вышеприведенных цикла проанализировать и, скорее всего, скорректировать. Для нашей учебной модели будет достаточно такой характеристики.

## 2.5.2 Задание таблицы КПД для 1-й ступени

Переходим к таблице КПД. Здесь так же, как и ранее, до строчки const w = ... нас все устраивает и ничего не меняем. Потом задаем расходы аналогично, как задавали в первой таблице:

```
const G = [221.0];
const Gduu = [1];
```

Далее задаем константы Hin и Hou такими, как мы посчитали в подразделе 2.3 для 0-й и 1-й точек:

```
const Hin = [2940];
const Hou = [2669]; //энтальпия пара (пароводяной смеси) в отборе взята
теоретическая, для изоэнтропийного процесса
// ниже реальный процесс корректируется поправочным множителем "внутренний КПД турбины"
```

После этого меняем только в первом цикле Gupl на Gduu и добавляем поправочный коэффициент 0.75 на наше незнание реального процесса, т. к. энтальпию на выходе ступени мы взяли теоретическую.

end;

М	Х	1	2
Y		0	220
1	0	0.068441327	0.069132653
2	0.2	0.068441327	0.069132653
3	0.4	0.068441327	0.069132653
4	0.6	0.068441327	0.069132653
5	0.8	0.068441327	0.069132653
6	1	0.068441327	0.069132653
7	1.2	0.068441327	0.069132653

Рисунок 2.5.3 Таблица КПД характеристики 1-й ступени турбины

Видно, что КПД ступени получился не зависящим от частоты вращения и немного большим на номинальном расходе, чем при нулевом расходе.

## 2.5.3 Задание таблицы мощности и нормировка для 1-й ступени

Таблица мощности в характеристиках турбин не используется (она оставлена для идентичности структуры таблиц у ступеней турбин и компрессоров), таблицу нормировки оставляем такой же, как и в файле, взятом за образец. В комментариях к скрипту там все подробно описано.

На рис. 2.5.4 приведен пример того, как должна выглядеть 4-я таблица. Она будет такой же и в следующих ступенях, и к ней больше возвращаться не будем. Если бы мы задавали таблицы в каких-то других единицах измерения или в другом виде (предусмотренном в коде HS), то здесь пришлось бы также вносить корректировки.



Рисунок 2.5.4 Нормировка таблиц характеристик ступени турбины

# 2.5.4 Задание таблицы коэффициента сопротивления KSI для 2-й ступени

Для 2-й ступени таблица KSI будет строиться по примерно такому же принципу, поэтому за основу возьмем файл от 1-й ступени. Сохраните на диск все изменения, которые мы там сделали, а потом пересохраните файл с именем файла уже **tk35\_38\_st2.tbl**.

Будем отмечать только те строки, которые изменяем или добавляем. Напомним, что расход через вторую ступень будет меньше расхода через первую ступень на величину расхода пара из первого отбора, равного 18.4 т/ч. Давление на входе во вторую ступень будет равно давлению в отборе (9.2 кгс/см<sup>2</sup>), или давлению на выходе из первой ступени. Давление на выходе из второй ступени равно 3.64 кгс/см<sup>2</sup>. Поэтому после констант **G** и **Gduu** (они остаются теми же, что и для первой ступени) дописываем еще новую константу **G1otb**, а **Pin**, **Pou** изменяем на верные:

```
const G = [221.0]; //T/4
const Gduu = [1];
const G1otb = [18.4];
```

```
const Pin = [9.2]; //κгс/см2
const Pou = [3.64];
```

После этого, чтобы скрипт учел G1otb, добавляем его со знаком минус в строке вычисления вектора расходов:

```
X[i]=G[i-1]-Gduu[i-1]-G1otb[i-1];
```

Это все отличия 2-й ступени от 1-й. Пересчитав таблицу, вы должны получить величины 0, 201.6 и 221.76 для значений расходов (для X[i], для каждого из столбцов таблицы), а для ячеек таблицы величины M[x,y], равные 50373.862, 16791.287 и 15112.158.

## 2.5.5 Задание таблицы КПД для 2-й ступени

Для КПД 2-й ступени дописываем также величину расхода в 1-м отборе, корректируем величины энтальпии на входе и выходе:

```
const G1otb = [18.4];
const Hin = [2669];
const Hou = [2509];
```

Затем учитываем G1otb:

X[i]=G[i-1]-Gduu[i-1]-G1otb[i-1];

И вносим поправку на то, что энтальпию мы указываем для теоретического процесса:

```
M[j,i]=(Hin[i-1]-Hou[i-1])/Hin[i-1] * 0.75; // внутренний КПД турбины
```

После пересчета таблицы КПД она должна стать такой, как показано на рис. 2.5.5:

м	X	1	2
Y		0	201.6
1	0	0.044511053	0.044960659
2	0.2	0.044511053	0.044960659
3	0.4	0.044511053	0.044960659
4	0.6	0.044511053	0.044960659
5	0.8	0.044511053	0.044960659
6	1	0.044511053	0.044960659
7	1.2	0.044511053	0.044960659

```
Рисунок 2.5.5 Таблица КПД характеристики 2-й ступени турбины
```

## 2.5.6 Задание таблицы KSI для 3-й ступени

Файл с характеристикой третьей ступени делаем на основе характеристики для 2-й ступени. Сохраните сначала предыдущие изменения в файл **tk35\_38\_st2.tbl**. Затем пересохраните файл в **tk35\_38\_st3.tbl**.

Для первой таблицы дописываем величину расхода пара во втором отборе и давления на входе и выходе ступени:

```
const G = [221.0];
const Gduu = [1];
const G1otb = [18.4];
const G2otb = [66.6];
const Pin = [3.64]; //ĸrc/cm2
const Pou = [0.96]; //ĸrc/cm2
```

Далее, в скрипте, учитываем новый расход:

X[i]=G[i-1]-Gduu[i-1]-G1otb[i-1]-G2otb[i-1];

Остальное без изменений. Пересчитайте таблицу, результат сравните с рис. 2.5.6:

М	Х	1	2	3
Y		0	135	148.5
1	0	54147.544	18049.181	16244.263
2	0.2	54147.544	18049.181	16244.263
3	0.4	54147.544	18049.181	16244.263
4	0.6	54147.544	18049.181	16244.263
5	0.8	54147.544	18049.181	16244.263
6	1	54147.544	18049.181	16244.263
7	1.2	54147.544	18049.181	16244.263

Рисунок 2.5.6 Таблица KSI 3-й ступени турбины

#### 2.5.7 Задание таблицы КПД для 3-й ступени

В таблице для КПД внесите следующие добавления: расход второго отбора и энтальпии на выходе и выходе ступени.

```
const G = [221.0];
const Gduu = [1];
const G1otb = [18.4];
const G2otb = [66.6];
const Hin = [2509];
const Hou = [2305];
```

Величины энтальпии взяты так же, для идеального изоэнтропийного процесса (см. подраздел 2.3, точки 2 и 3). Приведем здесь еще раз цитату из подраздела 2.3: «по рисункам видно, что энтальпия пара (в идеальном варианте) будет равна от входа к выходу из проточной части, по точкам 0, 1, 2, 3, 4 соответственно: 2940, 2669, 2509, 2305 и 1946 кДж/кг». Именно эти числа мы и вводим в файлы с характеристиками турбин как константы **Hin**, **Hou**.

Далее в скрипте скорректируйте одну строку:

X[i]=G[i-1]-Gduu[i-1]-G1otb[i-1]-G2otb[i-1];

Пересчитайте таблицу КПД, результат сравните с рис. 2.5.7:

М	Х	1	2
Y		0	135
1	0	0.060370666	0.06098047
2	0.2	0.060370666	0.06098047
3	0.4	0.060370666	0.06098047
4	0.6	0.060370666	0.06098047
5	0.8	0.060370666	0.06098047
6	1	0.060370666	0.06098047
7	1.2	0.060370666	0.06098047

Рисунок 2.5.7 Таблица КПД характеристики 3-й ступени турбины

### 2.5.8 Задание таблицы KSI для 4-й ступени

Файл с характеристикой 4-й ступени сделаем на основе характеристики для 3-й ступени. Сохраните сначала предыдущие изменения в файл **tk35\_38\_st3.tbl**.

Затем пересохраните файл в tk35\_38\_st4.tbl.

Для таблицы KSI дописываем величину расхода пара в третьем отборе и давления на входе и выходе ступени:

```
const G = [221.0];
const Gduu = [1];
const G1otb = [18.4];
const G2otb = [66.6];
const G3otb = [10.0];
const Pin = [0.96]; //ĸrc/cm2
const Pou = [0.05]; //ĸrc/cm2
```

Далее в скрипте учитываем новый расход в третий отбор:

```
X[i]=G[i-1]-Gduu[i-1]-G1otb[i-1]-G2otb[i-1]-G3otb[i-1];
```

Остальное без изменений. Пересчитайте таблицу, результат сравните с рис. 2.5.8:

М	X	1	2	3
Y		0	125	137.5
1	0	21445.337	7148.4457	6433.6011
2	0.2	21445.337	7148.4457	6433.6011
3	0.4	21445.337	7148.4457	6433.6011
4	0.6	21445.337	7148.4457	6433.6011
5	0.8	21445.337	7148.4457	6433.6011
6	1	21445.337	7148.4457	6433.6011
7	1.2	21445.337	7148.4457	6433.6011

Рисунок 2.5.8 Таблица KSI 4-й ступени турбины

#### 2.5.9 Задание таблицы КПД для 4-й ступени

В таблице для КПД внесите следующие добавления: расход второго отбора и энтальпии на выходе и выходе ступени.

```
const G = [221.0];
const Gduu = [1];
const G1otb = [18.4];
const G2otb = [66.6];
const G3otb = [10.0];
const Hin = [2305];
const Hou = [1946];
```

Величины энтальпии взяты так же, для идеального изоэнтропийного процесса (см. подраздел 2.3, точки 3 и 4).

Далее в скрипте скорректируйте одну строку:

```
X[i]=G[i-1]-Gduu[i-1]-G1otb[i-1]-G2otb[i-1]-G3otb[i-1];
```

Пересчитайте таблицу КПД, результат сравните с рис. 2.5.9:

М	X	1	2
Y		0	125
1	0	0.11564317	0.11681128
2	0.2	0.11564317	0.11681128
3	0.4	0.11564317	0.11681128
4	0.6	0.11564317	0.11681128
5	0.8	0.11564317	0.11681128
6	1	0.11564317	0.11681128
7	1.2	0.11564317	0.11681128

Рисунок 2.5.9 Таблица КПД характеристики 4-й ступени турбины

Таким образом, мы задали для ступеней «идеальный» процесс по энергии, но с поправочным множителем 0.75 у каждой ступени. От частоты вращения характеристики ступеней не зависят (хотя вектор по частоте в характеристиках задан). Гидравлическое сопротивление сделано условно зависящим от расхода, КПД – почти не зависит. При передаче этих характеристик в код HS мы, по сути, указали коду, как именно будут работать наши ступени турбины при номинальном расходе – они будут создавать такое-то гидравлическое сопротивление и такую-то энергию отбирать от теплоносителя и передавать в виде крутящего момента на ротор.

В дальнейшем, если настраивать модель на какой-то другой режим работы (например, для 75 % по паропроизводительности установки, для 50 % паропроизводительности и т. п.), надо аналогично построить процесс расширения пара в турбине, посчитать, какие расходы будут в отборах в этих режимах, какие расходы будут через ступени турбины, и дополнить набранные характеристики еще одной или несколькими колонками, задав дополнительные точки по расходу, между 0 и 100 %. Если по каким-либо исходным данным будет понятно, как именно ведет себя турбина и ее ступени на других частотах вращения, то можно и по строкам задавать разные значения. Пример такой характеристики можете посмотреть в файле C:\SimInTech\bin\DataBase\HS\ENGINES\TUR-BINES\b300\_ПГТН.tbl.

Также набранные нами характеристики можно «оптимизировать», воспользовавшись глобальными параметрами редактора таблиц (кнопка с глобусом в редакторе таблиц). Там можно было бы задавать все константы в одном месте, а не дублировать расходы из таблицы в таблицу. В следующих подразделах мы еще вернемся к редактору таблиц для задания характеристик насосов, в которых как раз механизм глобальных параметров будет задействован.

#### 2.6 Настройка свойств блоков на номинальные параметры

### 2.6.1 Характеристики ступеней турбины

Итак, мы подготовили 4 файла с именами:

tk35\_38\_st1.tbl, tk35\_38\_st2.tbl, tk35\_38\_st3.tbl, tk35\_38\_st4.tbl.

Все файлы должны находиться в папке

 $C:\SimInTech\bin\DataBase\HS\ENGINES\TURBINES.$ 

Задайте теперь каждому блоку типа **HS** – **ступень турбины** в расчетной схеме характеристику соответствующего файла вместо проставленной там по умолчанию характеристики **Тест турбины**, как показано на рис. 2.6.1

🦃 Свойсте	sa : Turbine_1					
Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои		
Название			Имя	Формула	Значение	
номер	элемента			Element		
Наличі	ие механичесь	юго порт	ra	MPort		⊠Да
Номин	— Номинальная частота вращения, Гц			wn		50
— Характ	геристика			FileName		tk35_38_st1 🗸 🖌 📄
Внешн	ий расчет арг	емента )	<для ха.	isG		tk35_38_st1 ^
Гидрот	Гидротурбина			IsHydro		tk35_38_st3
🗄 Оформ	пление					tk35_38_st4 Turbina_MS21
						Тест турбины Турбина_стенд С Y

Рисунок 2.6.1 Задание характеристики для 1-й ступени турбины в свойствах блока

Если бы мы разместили файл характеристики в другом месте на жестком диске, то здесь в выпадающем списке эта характеристика не появилась бы,

и пришлось бы ее выбирать поиском в диалоге открытия файла. При переносе модели на другой компьютер пути могут сбиться, поэтому лучше сохранять файлы с характеристиками в указанной директории. И не забывать при переносе модели копировать также и характеристики вновь разработанных элементов модели.

При пуске модели на расчет вы увидите, что равновесная частота вращения ротора турбины стала сильно выше 45 Гц – турбина раскручивается в область частот выше 300 Гц, что, конечно, недопустимо для паровой турбины в действительности, но вы должны помнить: пока через ступени протекает вода, подаваемая под «давлением» с заданным расходом.

#### 2.6.2 Свойства каналов для проточной части

Перейдем к следующей довольно трудоемкой части задания – корректировке гидравлического тракта и начальных условий теплоносителя в нем для приведения в соответствие с номинальным состоянием проточной части турбины.

Нам придется (по шагам) увеличивать проходное сечение проточной части и параметры подаваемого пара в граничном условии типа «подпитка» в начале проточной части, чтобы не терять устойчивость расчета, с одной стороны, и приближаться к номинальным параметрам – с другой. Из исходных данных (тепловой принципиальной схемы) мы видим Ду трубопроводов для отборов пара. Это 250 мм для первого отбора, два трубопровода по 500 мм для второго и один трубопровод с Ду = 350 мм для третьего отбора.



Рисунок 2.6.2 Диаметры трубопроводов отборов

Для подвода свежего пара к турбине используем Ду300, указанный на этой же схеме. Для отвода в конденсатор диаметр неизвестен, равно как и диаметры для проточной части турбины. Задаем их, исходя из опыта моделирования и здравого смысла: проточная часть должна расширяться от входа к выходу, так как давление пара падает, его плотность уменьшается (пар становится более «рыхлым»), и при сохранении примерно одного порядка массового расхода пара объемный расход увеличивается. Особенно это заметно на выходе из турбины, где при низком давлении, близком к давлению в конденсаторе, объемный расход пара заметно возрастает.

Таким образом, зададим следующие диаметры по проточной части: 0.3 м для трубопроводов до I отбора, 0.5 м для канала между I и II отбором, 0.6 м между II и III, 1.0 м после III отбора и 2.0 м на выходе из проточной части (вход в конденсатор). Позже вход в конденсатор расширим до 4 м. По отборам примем следующие значения для диаметров: 0.25, 0.7 и 0.35 м. Ду700 для второго отбора принимаем как примерный эквивалент двух трубопроводов Ду500 (по-казанных на рис. 2.6.2).

Задайте для 9 блоков каналов, размещенных на схеме, указанные величины диаметров. Для этого надо последовательно зайти в свойства каждого канала и вместо указанного там по умолчанию диаметра 0.01 поставить нужное число. При этом при следующей инициализации у каждого канала пересчитается еще и проходное сечение, т. к. там проставлена формула, зависящая от диаметра.

Сделайте следующие модификации:

- для двух каналов до І отбора (канал до 1-й ступени и канал, на котором стоит 1-я ступень) укажите гидравлический диаметр, равный Self.N#0.3;
- 2) для канала, на котором находится 2-я ступень, задайте диаметр Self.N#0.5;
- 3) для канала с 3-й ступенью укажите диаметр Self.N#0.6;
- 4) для канала с 4-й ступенью укажите диаметр Self.N#1.0;
- 5) для канала, уходящего в граничное условие, моделирующее конденсатор, укажите диаметр **Self.N#2.0**;
- 6) для каналов I, II, III отборов укажите соответственно Self.N#0.25, Self.N#0.7 и Self.N#0.35.

Помним, что пока что у нас заданы начальные условия для жидкой воды в узлах, каналах и подпитке проточной части – поэтому столь радикальное увеличение диаметров, при длинах каналов 1 м, даст существенное увеличение массы теплоносителя в нашем «водяном» пока еще контуре.

Поэтому, скорее всего, запуск такой модели на счет ничего хорошего не даст. Можете попробовать запустить на расчет схему с измененными диаметрами, увидите «разгон» ротора до 300+ Гц и устойчивый расчет поля давлений по узлам и расходов. Модель при указанных геометрических параметрах, начальных и граничных условиях что-то, конечно, считает. И пока что нам важно видеть, что модель не теряет устойчивости.

Следующим шагом приведем расходы по трубопроводам в соответствие с исходными данными. Нашими исходными данными предусмотрены вполне определенные расходы на входе и на отборах. Расход в конденсаторе должен получиться «автоматически». Чтобы не вычислять каждый раз расходы, зададим их как константы в скрипте проекта. Для этого перейдите в скрипт проекта (пункт главного меню **Сервис** → **Скрипт...**) и напишите там следующие строки:

```
const Pptu = 35; // кгс/см<sup>2</sup>
const Gptu = 220; // т/ч
const Tptu = 285; // град.С
//Отборы пара
const P_in = Pptu * 98066.5; // 1 кгс/см<sup>2</sup> = 98066.5 × Па, а у нас 35 кгс/см2
const P o1 = 9.2 * 98066.5; //
                                     кгс/см<sup>2</sup> --> Па
const P o2 = 3.64 * 98066.5; //
                                     кгс/см<sup>2</sup> --> Па
const P o3 = 0.96 * 98066.5; //
                                     кгс/см<sup>2</sup> --> Па
const P ou = 0.05 * 98066.5;
const G in = Gptu/3.6; //перевод из т/ч в кг/с
const G o1 = 18.4/3.6;
const G o2 = 66.6/3.6;
const G o3 = 10.0/3.6;
const G_ou = G_in - G_o1 - G_o2 - G_o3;
//Расход через ступени
const G st1= G in;
const G st2= G_in - G_o1;
const G_st3= G_in - G_o1 - G_o2;
const G st4= G ou;
```

Значения давлений в паскалях и расходов в кг/с вдоль проточной части и по отборам должны получиться равными значениям, указанным на рис. 2.6.3. Скрипт очевиден и не требует каких-либо пояснений. Отметим, что для лаконичности и красоты скрипта можно было бы константы перевода из кгс/см<sup>2</sup> в Па и из т/ч в кг/с оформить как отдельные константы. Также можно было бы сделать отдельный файл с константами проекта и его подключать как в проекте, так и в файлах расчета характеристик степеней турбины через ключевое слово **include**... . Однако это уже дополнительный сервис и «навороты», которые используются в действительно больших проектах, чтобы одна и та же величина задавалась (определялась) всегда в одном месте проекта, а не в нескольких. Для целей учебной турбины достаточно таких скриптов, написанных «по месту». Тем не менее мы задаем основные константы проекта через скрипт, чтобы хотя бы в пределах файла проекта расходы и давления по отборам были заданы в одном месте. Использовать далее их мы будем в разных блоках во многих местах схемы.

Для следующего шага давайте зададим верные расходы по блокам подпитки. Для этого зайдите в каждый блок подпитки и вместо численных значений +0.4, -0.05, -0.1 и -0.2 кг/с, заданных ранее в подразделе 2.2, в колонке **Формула** задайте следующие константные значения: +G\_in, -G\_01, -G\_02, -G\_03. Обратите внимание, что в колонке **Значение** при этом будут появляться рассчитанные в скрипте значения этих констант, а именно: +61.111, -5.111, -18.5, -2.777 (с точностью до последних значащих цифр).

焥 Скрип	т страницы : Главная страница: C:\turbine\Проточная часть\TK-35-38.p	rt		- 1	
Файл Пр	авка Поиск Расчёт Справка				
} 🗐 (	6 h h X   1   5 c   A 😘 🔳 P D 💹 🗉   8   5	🔊 🗸			
1	const Pptu = 35; // кгс/ Посмотреть все (F10)	Просмотр значени	ій перем	енных	×
	const Gptu = 220; // T/4	Имя переменной	Тип	Значение	Рлаги
-	const Iptu = 285; // град.C				
-	110.5	pptu	Вещ	35	const;
-	//Отборы пара	gptu	Вещ	220	const;
	<b>const</b> P_in = Pptu * 98066.5; // 1 κrc/cm <sup>2</sup>	tptu	Вещ	285	const;
-	const P_o1 = 9.2 * 98066.5; // κrc/cm <sup>2</sup>	p_in	Вещ	3432327.5	const;
	const P_o2 = 3.64 * 98066.5; // κrc/cm <sup>2</sup>	p_o1	Вещ	902211.8	const;
-	const P_o3 = 0.96 * 98066.5; // кгс/см <sup>2</sup>	po2	Вещ	356962.06	const;
10	<pre>const P_ou = 0.05 * 98066.5;</pre>	p_o3	Вещ	94143.84	const;
-		p_ou	Вещ	4903.325	const;
-	const G_in = Gptu/3.6; //перевод из тонн в	g_in	Вещ	61.111111	const;
	<b>const</b> G_o1 = 18.4/3.6;		Вещ	5.1111111	const;
-	const G o2 = 66.6/3.6;		Вещ	18.5	const;
-	const G o3 = 10.0/3.6;		Вещ	2.7777778	const;
-	<b>const</b> G ou = G in - G o1 - G o2 - G o3;	g_ou	Вещ	34.722222	const;
	/	g_st1	Вещ	61.111111	const;
	//Расход через ступени		Вещ	56	const;
	//······	g_st3	Вещ	37.5	const;
20	const G st1= G in:	g_st4	Вещ	34.722222	const;
	const $G_{st2} = G_{in}$ ,	Основная с			
	const $G_{1}$ = $G_{1}$ = $G_{1}$ = $G_{1}$ = $G_{2}$	🗄 Секция ини			
	const G_st3= G_111 = G_01 = G_02;	Секция фин			
-	const u_st4= u_ou;	Интерпрети			
		Функции			
_					
	/				

Рисунок 2.6.3 Опорные свойства для проточной части (исходные данные)

Итак, мы задали более-менее верно проходные сечения по каналам, задали верно расходы, и, насколько позволяли исходные данные, характеристики ступеней турбины также определены правильно. Давайте запустим схему на расчет и посчитаем первые 5 секунд модельного времени (процесс должен быть устойчив, т. к. на холодной воде должно быть все без процессов кипения-конденсации, и модель считает устойчиво даже на таких больших диаметрах).

Для этого выставим конечное время расчета равным 5 секундам и выведем на график давления по узлам проточной части (можно воспользоваться графиком, созданным ранее в подразделе 2.2, или создать новый аналогичный).

При этом вы можете увидеть первые результаты затраченных усилий и даже некоторое «чудо»: давления по узлам проточной части придут в примерное соответствие с давлениями исходных данных! Примерно 35 атмосфер на входе в турбину, примерно 10 атмосфер в узле первого отбора, 4.5 атмосферы во втором отборе и т. д. Только давление в «конденсаторе» пока не то – но это из-за неверного давления в граничном условии. В такой системе и не может появиться вакуум, если вода у нас на выхлопе турбины «выливается» на улицу с атмосферным давлением. Результат у вас должен получиться примерно как рис. 2.6.4.

График давлений по узлам должен быть аналогичен рис. 2.6.5. Обратите внимание, что процесс расчета устойчив; если у вас график носит какой-то другой характер, значит, где-то была допущена ошибка и ее надо устранить, перепроверив все шаги, описанные выше. Устойчивость расчета необходимо сохранять на протяжении всей работы с моделью, иначе ее отладка невозможна.

Вернемся к давлениям – обратите внимание, что начальные давления мы сейчас не задавали нигде в узлах, и они получились как бы сами собой, в результате расчета! Это произошло из-за корректного задания характеристики KSI для ступеней турбины и из-за того также, что мы верно установили (задали в подпитках) расходы через все каналы – рис. 2.6.4 показывает все расходы (правда, в кг/с), – они совпадают с теми, которые заданы в скрипте как константы (рис. 2.6.3), и совпадают с теми, которые мы использовали в файлах характеристик ступеней турбины.



Рисунок 2.6.4 Результат тестового расчета с верными расходами и диаметрами каналов проточной части



Рисунок 2.6.5 Давления по узлам в тестовом расчете с верными расходами и диаметрами каналов проточной части

Чтобы еще точнее приблизиться к давлениям номинального режима, задайте в граничном условии на выхлопе турбины давление вместо 1e5 равным **P\_ou**. И запустите схему еще раз на 5 секунд расчета, для выхода на стационарное состояние. Результат сравните с рис. 2.6.6, а давления по узлам сравните с давлениями точек 0–1–2–3–4 процесса расширения пара, на рисунках подраздела 2.3.

Конечно, некоторые отклонения между тем, что должно быть, и тем, что мы получили, есть. Но «попадание» в нужные давления хорошее, и это верный признак того, что мы все делаем правильно. Отметим, что сейчас у нас в контуре протекает 20-градусная вода, а ротор раскручивается до невозможных оборотов – такую частоту вращения не выдержат лопатки и конструкционный материал.

Это происходит как из-за воды в контуре вместо пара, так и из-за того, что модель электрогенератора, используемая нами в данной учебной модели, довольно примитивна, она позволяет подключать к турбине уже синхронизированный с сетью электрогенератор (либо не подключать его), таким образом, у нас сейчас раскручивается ротор под действием только ступеней турбины и не несет никакой нагрузки в виде генератора, т. к. последний сейчас рассинхронизирован с сетью и не создает нагрузку на роторе.



Рисунок 2.6.6 Результат второго тестового расчета с верными расходами, диаметрами каналов проточной части и давлением на выходе проточной части

В который раз укажем еще на то обстоятельство, что каждый малый шаг, приближающий нас к номинальному состоянию модели, не должен приводить к неустойчивому расчету. Если из-за каких-то изменений появляется неустойчивость, значит, надо ее проанализировать и устранить причину. Иначе если сделать несколько шагов по изменению настроек блоков, а потом получить неустойчивый расчет, то будет трудно разобраться, что именно приводит к неустойчивому счету.

#### 2.6.3 Отладочные параметры на схеме

Прежде чем переходить к верным параметрам пара, давайте скорректируем блоки, которые отображают параметры теплоносителя на схеме. Потому что схема получилась несколько запутанной отладочными блоками. Мы сделаем три изменения:

- расход будем выводить в т/ч, поскольку именно такая единица измерения представлена в исходных данных. И расход выведем одним числом, а не вектором из двух расходов для каждого канала;
- 2) давление выведем в кгс/см<sup>2</sup>, в соответствии с исходными данными;
- величину энтальпии оставим только в тех узлах, в которых нам она важна (это узлы около ступеней турбины, то есть у пяти узлов вдоль проточной части).

Все эти изменения можно настроить в соответствующих блоках, через изменение общих свойств **Текст** и **Имена выводимых параметров**, см. рис. 2.6.7. Блоки вывода параметров в виде текста на схеме – по сути, один и тот же блок (тип блока), просто преднастроенный по-разному.

🦃 Свойства : ControlU_PHT5 — 🗆 🗙						
Общие Визуальные слои						
Название список имен своиств для чтения	Имя кеааопіун	Формула	Значение	^		
Показывать стрелки портов	ShowArrows		⊿да			
Текст	Text		Р[Па]=t[°C]=h[Дж/кг]=			
Имена выводимых параметров	Names		_p_t_h			
Способ показа цифр	ShowValue		Показывать справа			
Поворачивать текст	Rotated		Пнет			
Прозрачный фон	Transparent		⊿да			
Шрифт	Font	nsparent	Cambria			
Формат числа	FloatFormat	isparent	Основной			
Кол-во знаков после запятой	Digits	6	6			
Кол-во значащих цифр	Precition	3	3			
Анимированный	Animated		⊠да			
Положение точки вставки	Align		Слева			
	Anale		0			

Рисунок 2.6.7

Как и многие задачи, эту можно решить в SimInTech несколькими способами:

- 1) вручную по очереди поменять свойства в каждом блоке;
- выделить один блок, поменять его свойства. Остальные со схемы удалить, потом при помощи буфера обмена и сочетаний клавиш Ctrl+C, Ctrl+V вставить нужное количество измененных блоков;
- выделить при помощи клавиши Shift все блоки одного типа, зайти в свойства, поменять их. Изменения применятся сразу ко всем выделенным блокам.

Предпочтительнее последний способ, потому что он быстрее всего. Итак:

- 1) выделяем все блоки, которые выводят расход на каналах, это 7 блоков;
- 2) правой кнопкой мыши заходим в их свойства;
- 3) меняем там свойство **Текст** с «g[кг/c]=» на « т/ч» (пробел перед буквой т);
- 4) меняем свойство Имена выводимых параметров с «\_g» на «\_g[1]\*3.6»;
- 5) меняем свойство Способ показа цифр с «показывать справа» на «показывать слева».

Что мы при этом сделали? Вместо вектора \_g мы стали выводить только один его первый элемент \_g[1], умноженный на 3.6 [= (3600 с/ч) / (1000 кг/т)] для перевода из единиц кг/с в т/ч. Вывод значащих цифр сделали слева от текста и изменили сам текст. Блоки вывода параметров в узлах сделаны аналогично, только они многострочные, и для корректного их изменения надо редактировать свойства построчно. Можете убрать там вывод энтальпии в узлах под отборами (в тех узлах, где стоят блоки подпитки с отрицательными расходами) – там значение энтальпии нас не будет интересовать с точки зрения отладки схемы. Блоки вывода расхода по каналам подвиньте ближе к каналам. В итоге у вас должен получиться результат, близкий к рис. 2.6.8.

Вместо Дж/кг мы вывели энтальпию в кДж/кг, для того чтобы уйти от экспоненциального вывода значения энтальпии.

Количество значащих цифр и количество цифр после запятой мы поставили равными 6 и 5 соответственно.



Рисунок 2.6.8 Изменения в блоках вывода отладочной информации по узлам и каналам

По рисунку видно, что по расходам модель совпадает с исходными данными – в этом ничего удивительного нет, т. к. расход «зажат» граничными условиями типа подпитки. Давления по узлам тоже примерно соответствуют нужным. Это произошло автоматически из-за верно заданных характеристик ступеней турбины – при номинальном расходе через ступени они создают именно такое местное гидравлическое сопротивление, которое требуется, и, идя от граничного условия по давлению в конденсаторе (где оно сейчас не меняется), давление ступеньками увеличивается на перепад давления на четвертой ступени, потом на третьей, второй и первой, достигая 35 кгс/см<sup>2</sup> перед первой ступенью.

#### 2.6.4 Номинальные параметры пара

Следующим шагом, приближающим параметры схемы к номинальному состоянию, является задание начальных условий в контрольных объемах и граничных условий в модели в соответствии с параметрами пара – на входе в турбину, в отборах и в конденсаторе.

В принципе, достаточно было бы задать только лишь верные параметры свежего пара, который поступает в систему (в подпитке слева от первой ступени), например задать там верную температуру **285** °C, запустить на расчет, и через некоторое время модель выйдет на равновесное состояние, когда по всем узлам будет пар (или пароводяная смесь). Можете попробовать это сделать. После этого можно было бы записать в файл стационарный рестарт (исходное состояние) и далее начинать следующие расчеты и моделирования уже с него, а не с начальных свойств, заданных в блоках схемы. Но такой простой способ имеет ряд недостатков.

- При объединении модели проточной части с другой моделью (например, дальше нам нужно будет эту модель соединить с моделью главного конденсатора) рестарт уже будет не вполне годен для той версии модели, которая получится, придется заново выставлять номинальное состояние. То есть тратить снова время на расчет и выход системы на стационарное состояние. Таких этапов объединения будет много, придется многократно их проделывать и перезаписывать файл рестарта.
- При доработке схемы может так случиться, что с неверно выставленных начальных условий модель будет считать неустойчиво – может так быть, что она не сможет самостоятельно выйти на устойчивый счет в окрестности номинальных параметров.
- 3. Без рестарта такая модель уже не может быть запущена на расчет. Если работать всегда через исходное состояние, тогда оно уже является как бы частью модели. Чем сложнее будет модель, тем дольше придется ждать и отлаживать, когда же именно она выйдет на нужные параметры из неверно заданных начальных условий.

Кроме перечисленных общих недостатков, в нашем случае, когда вместо пара сейчас заданы параметры для воды, переходной процесс будет сопровождаться еще следующим нехорошим явлением: проточная часть имеет какой-то заданный объем по теплоносителю. И в начальный момент времени весь этот объем занят водой с большой плотностью (близкой к 1000 кг/м<sup>3</sup>). При подаче перегретого пара с температурой 285 °С и существенно меньшей плотностью (плотность пара будет меньше более чем в 100 раз) он начнет выдавливать воду из системы, давление будет сильно расти, а массовый расход воды вдоль и на выходе из проточной части в первый период моделирования будет существенно выше номинального. Так как в одном и том же объеме проточной части пара может уместиться в 100–200 раз меньше по массе, чем воды. Это приведет к сильно неравновесному переходному процессу, очень далекому от номинального состояния.

Поэтому лучше потратить некоторое время и верно проставить по всем блокам нужные начальные свойства теплоносителя. К таким свойствам относятся начальные давления и температуры теплоносителя по контрольным объемам (по узлам, а также еще и по расчетным элементам всех каналов!); начальные расходы в гидравлических линиях связи между контрольными объемами – расходы задаются в каналах, размерность этих векторов на 1 больше, чем количество расчетных элементов в канале. В нашей модели количество элементов по всем каналам пока что задано равным 1, поэтому количество расходов будет 2 (на входе и на выходе из канала).

Если внимательно посмотреть на расчетную схему, легко видеть, что начальные (они же и номинальные) параметры теплоносителя, к которым мы стремимся, в схеме можно разделить по ступеням турбины на 5 областей:

- 1) вход (параметры свежего пара);
- 2) І отбор;
- 3) II отбор;
- 4) III отбор;
- 5) выход (параметры конденсатора).

Расходов (разных численно) будет несколько больше:

- 1) вход, этот же расход через 1-ю ступень;
- 2) расход через 2-ю ступень;
- 3) через 3-ю ступень;
- 4) через 4-ю;
- 5) расход в I отбор;
- 6) расход во II отбор;
- 7) расход в III отбор.

На рис. 2.6.3 константы для пяти областей давления в модели и семи расходов мы уже задали для модели, то есть они у нас уже есть. Не хватает только значений начальной температуры или энтальпии для узлов. Но при подготовке характеристик ступеней турбины мы задавались «идеальными» значениями энтальпии – можно взять их. Или по исходным данным можно понять, какие должны быть температуры пара в отборах – в исходных данных они могут быть указаны в параметрах греющего пара для ПВД и ПНД.

Строго говоря, в равновесном состоянии, к которому придет модель, параметры теплоносителя в соседних контрольных объемах будут все же отличаться – по ходу движения теплоносителя будет немного падать давление и, возможно, температура, в начальный момент будет прогреваться стенка в контрольных объемах, поэтому в двух соседних узлах, например до первой ступени, надо бы задать разные начальные свойства. Мы этого никогда точно сделать не сможем, только если «снять» эти параметры после 1000 или 10 000 секунд очередного моделирования и полученные результаты расчета задать в блоках.

Задавая начальные параметры в блоках, мы укрупненно – на качественном уровне – задаем верные параметры. При запуске на расчет все равно при этом будет некоторый переходной процесс. Задача в том, чтобы свести его к минимуму, для этого задаваемые начальные свойства теплоносителя надо максимально приблизить к номинальным параметрам.

В первом приближении температуру пара давайте зададим следующей. Впишите в скрипт проекта в дополнение к номинальному давлению вдоль проточной части еще следующие строки:

```
const T_in = 285;
const T_o1 = 170;
const T_o2 = 140;
const T_o3 = 91;
const T_ou = 32;
```

Температуры 170, 140 и 91 градусов мы взяли из исходных данных: из характеристик подогревателей, см. рис. 2.6.17. Итак, давайте теперь зададим верно начальные условия в блоках схемы.

#### 2.6.5 Начальные параметры теплоносителя в схеме

Зайдите в каждый внутренний узел схемы и задайте там для свойства **Начальное давление, Па** и **Начальная температура, °С** следующие значения – в колонке **Формула** впишите:

- для узла с подпиткой свежего пара и узла перед первой ступенью турбины впишите P\_in и T\_in, как представлено на рис. 2.6.9;
- 2) для узла после 1-й ступени и узла под ним (с выходом расхода I отбора, смоделированного подпиткой): **P\_o1** и **T\_o1**, см. рис. 2.6.10;
- 3) для узла после 2-й ступени и узла под ним (с выходом расхода II отбора): **P\_o2** и **T\_o2**, см. рис. 2.6.11;
- для узла после 3-й ступени и узла под ним (с выходом расхода III отбора): P\_03 и T\_03, см. рис. 2.6.12;
- 5) для узла после 4-й ступени: **P\_ou** и **T\_ou**, см. рис. 2.6.13;
- 6) в узле граничного условия проставьте также температуру T\_ou, хотя это не принципиально, т. к. расход будет в этот узел утекать, оттуда ничего в модель приходить не будет. Давление в граничном условии мы уже поставили ранее.

Примечание: определяющее свойство, по которому вычислять начальную энтальпию, должно оставаться в значении Температура.

🧔 Свойст	🖗 Свойства: Node_1 Node_2							×
Свойства	Параметры	Общие	Визуал	льные слои				
Название Начальное давление, Па		Имя Р0	Формула <b>Р_in</b>	Значен 343232	ие 27.5	^		
— Начал	Начальная температура, °C		то	T_in	285			
— Определяющее свойство, по кот		DefineParam		Темпе	ратура			
Объём	— Объём узла, м³		V		0.1			

Рисунок 2.6.9 Начальные значения давления и температуры на входе в проточную часть

🦃 Свойства: Node_3 Node_7			- 🗆	×
Свойства Параметры Общие Визуал				
Название Начальное давление, Па	Имя Р0	Формула <b>Р_о1</b>	Значение 902211.8	^
Начальная температура, °C	то	T_01	170	
Определяющее свойство, по кот	DefineParam		Температура	

Рисунок 2.6.10 Начальные значения давления и температуры в узлах І отбора

🐲 Свойства: Node_4 Node_8						_		×
Свойства Параметры Общие Визуальные слои								
Название — Начальное давление, Па			Имя Р0	Формула <b>Р_о2</b>	Значе 35690	ние 52.06	^	
Начальная температура, °C			т0	T_02	140			
Определяющее свойство, по кот			DefineParam		Темп	ература		

Рисунок 2.6.11 Начальные значения давления и температуры в узлах II отбора

🦃 Свойства: Node_5 Node_9							×
Свойства Параметры Общие Визуальные слои							
Название — Начальное давление, Па			Имя Р0	Формула <b>Р_оЗ</b>	Значе 94143	ние 3.84	^
Начальная температура, °C			Т0	T_03	91		
Определяющее свойство, по кот			DefineParam		Темпе	ература	

Рисунок 2.6.12 Начальные значения давления и температуры в узлах III отбора

Свойства: Node_6						_		Х
Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои				
Название				Имя	Формула Значение		ние	
Начал	Начальное давление, Па			P0	P_ou	4903.325		^
— Начальная температура, °C			то	T_ou	32			
Определяющее свойство, по кот			DefineParam		Темпе	ература		

Рисунок 2.6.13 Начальные значения давления и температуры в узле на выходе проточной части

Теперь давайте разберемся с каналами. По умолчанию в коде HS начальные параметры теплоносителя в каналах не задаются в свойствах каналов, они линейно интерполируются между свойствами, заданными для узлов, а скорость (расход) теплоносителя принимается нулевой. Нас это могло бы устроить, если бы не ступени турбины...

Дело вот в чем: модель ступени турбины скачкообразно (или ступенчато, что отражено в названии блока) изменяет параметры теплоносителя на той гидравлической связи, где она стоит. В свойствах блока **HS** – **ступень турбины** есть свойство **Номер элемента**. По умолчанию у нас сейчас ступени турбины стоят на первом элементе каждого канала, что означает следующее: модель ступени турбины работает для потока теплоносителя с первым расходом в канале, то есть с входным расходом в канал. И параметры теплоносителя скачкообразно изменяются между узлом и первой ячейкой канала. Таким образом, мы имеем ситуацию, при которой параметры I отбора надо ставить в узле этого отбора и в контрольном объеме канала, на котором установлена 1-я ступень турбины. Аналогично для 2-й ступени и т. д.

Если бы у нас было по 2 ячейки в каналах, где стоят ступени турбины, а ступени турбины были бы установлены на двух элементах каналов, тогда ступенчатое изменение параметров пара происходило бы между 1-м и 2-м элементами канала.

Наша ситуация немного проще, но следует иметь в виду этот нюанс. Поэтому если оставить сейчас линейную интерполяцию свойств в каналах и нулевой расход, то начальные параметры схемы уже ближе к номинальным, но еще недостаточно, и переходной процесс будет идти быстрее и более гладко, однако далеко от идеала. Для сравнения приведем два рисунка – результат расчетов поля давлений по узлам проточной части в первые 30 секунд расчета. Один вариант – когда мы задали верно только входную температуру и свежему пару пришлось «протолкнуть» весь объем воды вдоль проточной части (рис. 2.6.14). Другой вариант – когда параметры пара по узлам заданы так же верно и свежему пару пришлось уже проталкивать пар и пароводяную смесь вдоль проточной части. Видно, что скачки давления в системе несколько снизили свою амплитуду, и количество сильных скачков стало уже не 3, а 2. Начальный расход в системе все еще нулевой, и есть еще нюанс про задание начальной температуры в коде HS, о котором расскажем чуть ниже.







Рисунок 2.6.15 Выход на стационарное состояние при входной температуре 285 °С и заданных начальных параметрах пара по узлам схемы

Зайдите в свойства первого канала на схеме, на участке до первой ступени турбины, и выставьте в **Да** свойство **Задать нач. распределение параметров?**. При этом появится еще несколько свойств. Определяющее свойство проставьте в **Температура**, т. к. мы будем задавать температуру, как и в узлах.

Для этого первого канала поставьте начальные параметры такие же, как и для первых двух узлов, а именно **P\_in**, **T\_in** в соответствующих строках свойств.

Лучше сохранять тот синтаксис, который там записан по умолчанию, и написать **Self.N#P\_in** и **Self.N#T\_in**. При дальнейшей работе со схемой, возможно, придется увеличивать количество элементов канала, тогда и эти векторы будут сразу заданы с новой размерностью N. Символ # в SimInTech означает предлог «по» или краткую форму записи векторов с одинаковыми значениями элементов векторов. **Self.N#P\_in** означает «N раз по P in».

Начальный расход в канале задается скалярно, задайте его равным **G\_in**. Пример см. на рис. 2.6.16.

🏟 Свойсті	ва : Channel_1						- 🗆	$\times$
Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные	слои			
Название Коэфф	оициент интен	сификац	ии сопро	тивления	Имя kKsi	Формула (Self.N+1)#1.0	Значение [1,1]	^
Абсоли	ютная шерохо	ватость,	, М		Sh	Self.N#1e-5	[1E-5]	
Объём	ное энерговы,	деление,	, Вт/мз		qv	Self.N#0.0	[0]	
Расчет	г критического	течени	я		is_Kr		Пнет	
Расчет	г потерь на ус	корение			is_Conv		⊿да	
— Тип ге	Тип геометрии				geom_type		0 Круглая	
🖃 Началі	ьное состояни	ie						
Зад	ать нач. расп	ределен	ие парам	етров?	SetInitDistrib		⊿да	
Нач	альное давле	ние, Па			P0	Self.N#P_in	[3432327.5]	
— Нач	альная темпе	ература,	°C		T0 Self.N#T_in		[285]	
Опр	ределяющее с	войство	, по кото	рому вычи	DefineParam		Температура	
L Hau	альный расхо	од в кана	ле, кг/с		G0	G_in	61.111111	
🗉 Экспер	оиментальные							
🗄 Визуал	изация 3D							~
🕽 ta 🛍	🔍 🛜 🗛 🛛	🐹 🛄 🔛	6					

Рисунок 2.6.16 Начальные свойства теплоносителя в первом канале

Для следующего канала, где установлена 1-я ступень турбины, задаваемые начальные условия будут равны **Self.N#P\_in**, **Self.N#T\_in** и **G\_st1**. Задайте их.

Для канала со 2-й ступенью задайте Self.N#P\_o1, Self.N#T\_o1 и G\_st2. Для канала с 3-й ступенью задайте Self.N#P\_o2, Self.N#T\_o2 и G\_st3. Для канала с 4-й ступенью задайте Self.N#P\_o3, Self.N#T\_o3 и G\_st4. Для канала после 4-й ступени задайте Self.N#P\_ou, Self.N#T\_ou и G\_ou. Для каналов отборов соответственно задайте:

Self.N#P\_01, Self.N#T\_01, G\_01 Self.N#P\_02, Self.N#T\_02, G\_02 Self.N#P 03, Self.N#T 03, G 03

На этом задание начальных параметров теплоносителя в схеме завершено – для каждого контрольного объема мы определили его давление и температуру при инициализации схемы. Для каждой гидравлической связи – начальный расход.

Теперь, запустив схему на расчет, можно ожидать улучшений переходного процесса, но если вы попробуете это сделать, особых улучшений не увидите – будут те же скачки давления до 90 атмосфер в узлах на входе в проточную часть. В чем-то есть еще «подвох». Мы специально оставляем в методике такие вещи, где правильные на первый взгляд места приводят к не очень верному результату. Умение отыскать причину «неуспеха» и ее устранить крайне полезно при создании моделей.

## 2.6.6 Исправление начальной температуры в схеме

При определении начальной температуры пара в п. 2.6.4 и для записи этих чисел в скрипт мы воспользовались исходными данными (рис. 2.6.17), честно взяв указанные параметры пара в отборах.

Наименование, размерность	Подогреватель низкого давления №1	Подогреватель высокого давления №2	Подогреватель высокого давления №3
1 Тип подогревателя	ПН-100	ПВ-280-1	ПВ-280
2 Количество подогревате- лей в ПТУ	1	1	1
3 Поверхность нагрева, м <sup>2</sup>	100	280	280
4 Параметры греющего па- ра: - абсолютное лавление.			•
МПа (кгс/см <sup>2</sup> ); - температура, °С	0,094 (0,96) +91	0,35 (3,6) +140	0,913 (9,2) +170

Рисунок 2.6.17 Параметры греющего пара для подогревателей

Но мы не проверили эту температуру, что с точки зрения кода HS она соответствует именно пару, а не воде. Как оказалось, код HS считает, что 91 °C и 170 °C, да и 32 °C на выходе из турбины – это вода, а не пар. То есть данные точки (p,t) лежат ниже линии насыщения, в области жидкой фазы. См. рис. 2.6.18:



Рисунок 2.6.18 Параметры теплоносителя при инициализации схемы

По рисунку видно, что только на входе в турбину (где перегретый пар) и между 2-й и 3-й ступенями турбины код посчитал, что в наличии пар. В других узлах по энтальпии теплоносителя видно, что это вода или пароводяная смесь с большим количеством жидкой фазы.

Как это исправить? Есть несколько способов, сначала опишем неправильный, но тоже имеющий место. Можно попробовать увеличить температуры 170, 91 и 32 на несколько градусов, дойдя до линии насыщения при тех давлениях, которые есть в системе. Например, можно двигаться с шагом в +1°, инициализировать схему, проверять, получили ли мы пар, и дойти до варианта, представленного на рис. 2.6.19. const T\_in = 285; const T\_o1 = 170+6; const T\_o2 = 140; const T\_o3 = 91+7; const T\_ou = 32+1;



Можно пойти более верным путем, воспользовавшись функциями SimIn-Tech, типа waterps/steamps, и посчитать температуру насыщения для пара при нужных давлениях. Вариант решения представлен на рис. 2.6.20.

		p_ou	Вещественное	4903.325
12	<b>const</b> T_in = 285;	t_in	Вещественное	285
	<pre>const T_o1 = 170+6; T_o1 = steamps(P_o1,2);</pre>	t_o1	Вещественное	175.46214
	<pre>const T_o2 = 140; T_o2 = steamps(P_o2,2);</pre>	t_o2	Вещественное	139.55381
-	<pre>const T_o3 = 91+7; T_o3 = steamps(P_o3,2);</pre>	t_o3	Вещественное	97.926621
	<pre>const T_ou = 32+1; T_ou = steamps(P_ou,2);</pre>	t_ou	Вещественное	32.193085
1 .			-	~

Рисунок 2.6.20 Температура по узлам, равная температуре насыщения (кроме входа в турбину)

Самый правильный способ – это пройтись еще раз по всем контрольным объемам и вместо температуры проставить там соответствующие значения энтальпии, которые мы получали при построении характеристик турбины. Предоставляем читателю проделать это самостоятельно, в качестве упражнения.

В итоге, воспользовавшись любым из этих способов, переходным процессом от начальных параметров к номинальному состоянию будет похож (по давлениям в узлах) на рис. 2.6.21, а по температурам в узлах – на рис. 2.6.22.

При сравнительном анализе этих результатов с тем, что было ранее, мы видим значительное улучшение переходного процесса. Видно, что по давлению, температурам и расходам модель стартует из значений, близких к равновесным, и требуется менее 1 секунды расчетного (модельного) времени, для того чтобы система пришла к равновесию – все колебания прекращаются за первую секунду расчета. Это более чем приемлемый результат, и он близок к тому, как если бы мы начинали расчет из рестарта (из исходного состояния). В этом варианте никаких начальных колебаний не было бы вообще.



Рисунок 2.6.21

Фактически мы подготовили такой рестарт, записав его в саму расчетную схему. К такому стилю, или способу, работы надо всегда стремиться при подготовке моделей, как простых, так и сложных. Расчетная схема (файл проекта) должна быть самодостаточной для инициализации и запуска расчета. При этом результат расчета должен быть близок к номинальному 100%-му состоянию, или какому-либо другому, в зависимости от задачи моделирования.



Рисунок 2.6.22 Температуры по узлам



Рисунок 2.6.23 Расходы на входах в каналы модели

## 2.6.7 О задании начальной температуры или энтальпии в контрольных объемах

Код HS сделан так, что внутри теплоноситель и меру его внутренней энергии код считает на основе энтальпии, и именно она является важным параметром, характеризующим состояния теплоносителя. Для теплоносителя типа вода и водяной пар это особенно актуально в области линии насыщения, где одной и той же температуре может соответствовать как вода, так и пар и пароводяная смесь. Поэтому предпочтительнее задавать все же пары давление–энтальпия, а не давление–температура.

Но с температурой работать привычнее, и для однофазных задач (вода или перегретый пар) можно задаваться и температурой.

Еще одна особенность, которую можно проследить на данной задаче, – для блока типа **HS** – **Подпитка** задается только температура или только энтальпия теплоносителя, а давление берется – начальное – из узла, к которому подпитка подсоединена. Поэтому в начальных итерациях когда вы задавали +285 °C в подпитке, а в узле стояло атмосферное давление, то внутри (в коде) для этой пары температура–давление вычислялась энтальпия, немного превышающая нужную (для 285°-градусного пара при 35 атмосферах), и, если вы заметили, входная температура там устанавливалась на уровне +315 °C, а не +285, как в блоке подпитки. Можно считать это и недоработкой в коде HS, однако таких нюансов в разных блоках, скорее всего, есть еще много, в любом сложном математическом программном обеспечении они присутствуют. И умение их находить, обходить или использовать в своих целях тоже является частью умения набирать и отлаживать сложные теплогидравлические схемы.

#### 2.7 Корректировка характеристик ступеней турбины

Еще один штрих, который нам надо сделать, – привести в соответствие перепады давления на ступенях к номинальным значениям. Мы «случайно» уже получили перепады давления, очень близкие при задании характеристик ступеней, но все же не совсем те, которые нужны.

Одно из действий, которые надо сделать, – убрать заданные по умолчанию местные гидравлические сопротивления на всех каналах схемы, для чего задать в свойствах **Прямое местное сопротивление** и **Обратное местное сопротивление** вместо (Self.N+1)#1/(Self.N+1) значение (Self.N+1)#0/(Self.N+1).

После этого перепад давления на каналах немного снизится, и давление по узлам схемы придет немного ближе к нужным нам давлениям. У автора данной методики значения давления получились как на рис. 2.7.1 или 2.6.21.



Рисунок 2.7.1 Давления по узлам проточной части после зануления местных сопротивлений в каналах

Дело в том, что требуемое местное сопротивление формирует сам блок ступени турбины, и дополнительного сопротивления создавать там не надо.

Рассмотрим еще один аспект – диаметры каналов. Напомним, что вдоль проточной части мы проставили диаметры 6 каналов, равные 0.3, 0.3, 0.5, 0.6, 1.0 и 2.0 м, исходя из наших представлений об увеличении удельного объема пара при его расширении в турбине. Увеличьте диаметры двух последних каналов ещё, с 1.0 до 2.0 и с 2.0 до 3.0 м, соответственно. Посмотрим, к чему это привело по скоростям: если вы выведете скорости теплоносителя на каналах, то увидите рисунок, аналогичный 2.7.2. По нему видно, что основная масса каналов имеет скорость теплоносителя в районе 60 м/с, в 5-м канале существенно ниже, а в 6-м канале – выше.



Рисунок 2.7.2 Скорость в каналах проточной части

Путем изменения двух последних диаметров (можете сами итерационно подобрать) выставьте их равными 1.2 м и 4 м соответственно, у 5-го и 6-го каналов. Это каналы с 4-й ступенью и канал, который уходит в граничное условие типа «давление», моделирующее конденсатор.

Тогда скорость теплоносителя в 5-м канале станет повыше, а в 6-м пониже. Строго говоря, тут следовало бы еще посмотреть на скорости на выходах из каналов – предоставляем это исследование сделать читателям самостоятельно.

Обратите внимание, что при этом немного увеличится давление в III отборе (т. к. мы сделали меньше гидравлический диаметр на 4-й ступени). По рис. 2.7.1 видно, что основное падение давления происходит именно на тех каналах, где стоят ступени турбины. Для того чтобы прийти к давлениям, требуемым по исходным данным, надо еще немного скорректировать первые таблицы KSI в характеристиках ступеней турбины. Поскольку расходы по ступеням и параметры пара уже приведены в хорошее приближение к исходным данным, можно сделать еще одну итерацию по ступеням турбины, чтобы они в итоге в модели давали те перепады давления, которые требуются.

Идти будем от конца проточной части (от граничного условия по давлению в конденсаторе) к началу. Потому что, меняя характеристику 4-й ступени, мы четко сможем отстроить давление в III отборе. Выставив его, далее перейдем к 3-й ступени, и она уже не будет влиять на давление III отбора, и т. д.

## 2.7.1 Четвертая ступень

Когда мы изменили диаметры у последних двух каналов, в модели давление III отбора увеличилось и стало выше примерно на 0.05 кгс/см<sup>2</sup>, чем должно быть. Вместо 0.96 кгс/см<sup>2</sup> мы получили в модели 0.965 кгс/см<sup>2</sup>. Параметры каналов и расходов, а также параметры пара на входе мы менять уже не будем – считаем, что в этом вопросе пришли к номинальным параметрам. Поэтому осталось только скорректировать гидравлическую характеристику ступени. Получается, что в нашей конкретной схеме 4-я ступень дает такое гидравлическое сопротивление, которое на 0.05 кгс/см<sup>2</sup> выше, чем нам хотелось бы. Скорректируем характеристику ступени, внеся эту поправку в ее Pin и Pou, а именно зайдите редактором таблиц в созданный нами ранее файл C:\SimInTech\bin\DataBase\ HS\ENGINES\TURBINES\tk35\_38\_st4.tbl и задайте там в скрипте к первой таблице:

```
const Pin = [0.96-0.005]; //кгс/см2
const Pou = [0.05]; //кгс/см
```

После чего пересчитайте характеристику (в первой таблице сопротивление турбины немного уменьшится и станет равным 7109.1685 при номинальном расходе 125 т/ч), сохраните файл характеристики. Запустите модель на счет, и увидите, что теперь давление в III отборе стало равным почти точно 0.96 кгс/см<sup>2</sup>.

Для сравнения см. рис. 2.7.3. Видно практически идеальное попадание в исходные данные – расход 125 т/ч, давления в III отборе и на выходе из турбины совпадают с заданными. Смотрим на II отбор – видим, что вместо 3.64 кгс/см<sup>2</sup> имеем 3.66 кгс/см<sup>2</sup>.



Рисунок 2.7.3 Параметры пара в отборах после корректировки характеристики 4-й ступени

## 2.7.2 Третья ступень

Исходя из полученной разницы, делаем вывод, что в характеристике 3-й ступени надо по аналогии с 4-й ступенью подснизить перепад на 0.02 кгс/см<sup>2</sup>. Зайдите в файл для 3-й ступени и там задайте:

```
const Pin =[3.64-0.02]; //ĸrc/cm2
const Pou =[0.96];//ĸrc/cm2
```

После этого пересчитайте таблицу, сохраните файл с характеристикой и перезапустите модель на расчет.

В результате давление во II отборе в стационарном состоянии станет равным точно 3.64 кгс/см<sup>2</sup>.

Примечание: используемый прием является, конечно, подгоночным и не совсем честным. Таким способом не следует злоупотреблять. Если бы мы получили отклонения по давлениям более существенные, чем 4–5 %, то надо было бы тогда разбираться с характеристиками ступеней более тщательно и проверять все формулы, по которым они считаются.

## 2.7.3 Вторая ступень

После корректировки 3-й ступени давление в I отборе в модели стало равным 9.2313 кгс/см<sup>2</sup>. Должно быть 9.2 кгс/см<sup>2</sup>. В принципе, для модели подобного рода это не такая уж и сильная разница: 9.2313 / 9.2 = 1.0034, то есть разница составляет 0.34 %. Но раз уж мы взялись приводить модель к номиналу, давайте, насколько возможно, это сделаем. Вычесть 0.0313 в заданном Pin для 2-й ступе-
ни не так трудно. После того как вы это сделаете, пересчитаете таблицу и перезапустите модель, давление в I отборе приблизится к равному 9.2 кгс/см<sup>2</sup>.

# 2.7.4 Первая ступень

По аналогии скорректируйте характеристику для 1-й ступени. У нас при подготовке методического описания Pin там пришлось снизить всего на 0.088 кгс/см<sup>2</sup>. Итоговое распределение давлений по ступеням, после корректировки всех ступеней, представлено на рис. 2.7.4. Видно, что расходы и давления во всех частях модели совпадают с исходными данными.



Рисунок 2.7.4 Совпадение расходов и давлений с исходными данными

Примечание: корректировки подразделов 2.7.1, 2.7.2, 2.7.3 и 2.7.4 можно было бы и не делать. Достаточно задать в каналах проточной части нулевые местные сопротивления и выключить там же свойство «Расчет потерь на ускорение». Тогда параметры по давлениям пара в отборах совпали бы с исходными данными с первого раза.

# 2.8 Ротор и турбогенератор

Обратим некоторое внимание на ротор и электрогенератор. Модель ротора простая – на него действуют крутящие моменты от ступеней турбины, в качестве сопротивляющихся моментов – момент от электрогенератора и момент сил трения.

Задайте в блоках турбины и генератора свойства, как представлено на рис. 2.8.1 и 2.8.2 соответственно.

🧐 Свойства : Rotor_2			- 0
Свойства Параметры Общие Порты Визуальные слои			
Название	Имя	Формула	Значение
Количество механических портов	NMech		5
Внешний расчет частоты	IsRemote		Нет
Начальная частота вращения (относительная)	w0	1	1
Номинальная частота вращения, Гц	wn	50	50
Минимально возможная относительно частота вращения ротора	w_min	-100	-100
Максимально возможная относительно частота вращения ротора	w_max	100	100
Момент инерции ротора, кг <sup>.</sup> м <sup>2</sup>	J	50000	50000
Коэффициент усиления полинома для вычисления момента трения, Н м	Mtr_K	100	100
Безразмерные коэффициенты полинома для вычисления момента трения	Mtr_Ai	[0 1]	[0,1]
Момент страгивания, Н.м	Mstr		2
Порог частоты страгивания (относительной)	wstr		0.05

Рисунок 2.8.1 Свойства ротора

🦃 Свойст	ва : Gen_1						
Свойства Параметры Общие Порты Визуальные слои							
Название				Имя	Формула	Значение	
Номинальная частота, Гц				wn		50	
Коэффициент приведения момента генератора			ратора	k_rot	0.1	0.1	
КПД генератора				kpd		0.98	
Генератор синхронизирован			synch		⊿да		

#### Рисунок 2.8.2 Свойства генератора

Обратите внимание: мы задаем начальную частоту (отн.) в 1.0, а номинальную частоту вращения равной 50 Гц. Минимальную и максимальную частоты вращения снизьте до −100 и +100 или даже до −10 и +10. Это сейчас не принципиально, т. к. режим пока что у нас будет один – мы настраиваем модель на номинальные параметры. Момент инерции ротора точно нам неизвестен, величина 50000 кг·м<sup>2</sup> выбрана приблизительно, чтобы характерное время переходных процессов было не слишком маленьким, но и не чрезмерным, с точки зрения удобства работы с моделью. Аналогичные соображения стояли при выборе величин для расчета момента трения. Все эти конкретные числа требуют корректировки на дальнейших этапах работы с моделью – при расчете выбега турбины или при расчетах перехода с одной частоты на другую, синхронизации с генератором и т. п. режимах.

В конечном счете, задав эти свойства, вы получите частоту вращения системы ротор–генератор–ступени турбины на уровне 50 Гц, а электрическую мощность – равной 34,66 МВт. В чем причина несовпадения электрической мощности с исходными данными? Причина в том, что энергетическую составляющую (вторая таблица КПД) для ступеней турбины мы задали приближенно, задав там поправочный множитель 0.75 при расчете таблиц. Перейдите в файлы характеристик турбины и задайте там 0.76 в каждом файле, пересчитайте вторые таблицы и перезапустите расчет модели заново.

На выходе вы получите 34,925 МВт электрических, что с точностью до 0.2 % совпадает с исходными данными. Можете задать 0.762, например, в файлах характеристик, чтобы еще точнее приблизиться к требуемым 35 МВт.

Примечание: в принципе, для начальной настройки в подобного рода моделях не требуется достигать подобной высокой точности (доли процента), т. к. точность самой модели составляет около 1–5 % для стационарных режимов и до 15–25 % для переходных процессов в среднем. Но мы специально делаем сейчас для проточной части как бы тарировку, потому что в дальнейшем, при подключении других составных частей, будем получать в том или ином месте модели «перекосы», и по отклонению проточной части от исходных данных нам будет легко видеть, насколько далеко по параметрам мы «ушли» из номинальной точки. Подчеркнем, что при включенной синхронизации (рис. 2.8.2, свойство **Генератор синхронизирован**) модель генератора добавляет тормозящий или разгоняющий момент к ротору, при отклонении частоты вращения от номинальной. И момент этот тем сильнее, чем сильнее отклонение частоты. Таким образом, для частоты использованная модель генератора является как бы регулирующим органом, что позволяет выйти на номинальные обороты и «измерить» генератором электрическую мощность, генерируемую турбиной при номинальных оборотах.

### 2.9 Оценка полученных результатов, визуализация

При отладке модели, даже такой небольшой, как проточная часть четырехступенчатой турбины, приходится следить сразу за многими параметрами. Это удобно делать как по схеме, так и по графикам тех или иных параметров (будет хорошо, если вы научитесь выводить на графики основные параметры и видеть по 3...5...10 и более графикам одновременно, в каком состоянии у вас находится система). Но зачастую сразу за всеми параметрами следить трудно, а тем более помнить и сравнивать текущие параметры с заданными номинальными значениями.

# 2.9.1 Вывод давлений и погрешностей их вычисления

В таких случаях можно воспользоваться интерактивными средствами SimIn-Tech и специально разработать (довольно быстро, если знать, как именно и что выводить) для своей модели некоторую отладочную информацию. Например, давайте подготовим и сделаем такую вещь: выведем ключевые давления и расходы по проточной части в сводную табличку, где запишем в столбцах заданные и расчетные значения давлений и расходов, а затем абсолютные и относительные в % отклонения расчетных величин от заданных. Примерно в такой последовательности (в скобках указаны имена переменных и констант; напомним, что узлы с именами Node\_... и каналы Channel\_... у нас пронумерованы последовательно от входа к выходу), как представлено в табл. 2.9.1.

Заданное давление (по исходным данным)							
Р пара (P_in)	Р в I отборе (P_o1)	Р во II отборе (P_o2)	Р в III отборе (Р_о3)	Р выхлопа (P_ou)			
	Расч	етные значения в мо	дели				
Р пара перед 1-й ступенью	Р в I отборе	Р во II отборе	Р в III отборе	Р после 4-й ступени			
(Node_2p)	(Node_3p)	(Node_4p)	(Node_5p)	(Node_6p)			
	A	бсолютные отклонен	ия				
Node_2p-P_in	Node_3p-P_o1	Node_4p-P_o2	Node_5p-P_o3	Node_6p-P_ou			
Относительные отклонения, %							
100*(Node_2p- P_in)/P_in	100*(Node_3p- P_o1)/P_o1	100*(Node_4p- P_o2)/P_o2	100*(Node_5p- P_o3)/P_o3	100*(Node_6p- P_ou)/P_o4			

Таблица 2.9.1 Порядок вывода на экран отладочной информации по давлениям

Для вывода этих 20 чисел можно воспользоваться графическим примитивом типа **Текст** или **Повернутый текст** (см. рис. 2.9.1). Сделать это можно минимум двумя способами – без написания скриптов и с написанием небольшого скрипта.

Рассмотрим кратко первый способ, а воспользуемся вторым для системности. Если делать без скрипта, то после простановки примитива, например, **Повер**-

нутый текст на схему следует зайти в его свойства и изменить там 5 свойств, как показано на рис. 2.9.2.

Simulation In Technic	🀲 Simulation In Technic
Файл Правка Вид Масштаб Вставка Поиск	Файл Правка Вид Масштаб Вставка Поиск
🔄 🖻 👌 • 🗐 🚰 🕺 🖓 😭 🗳 🖌 🖢 🖬 🚺	🗋 🚵 - 🗐 🚰 🛛 🗙 🖬 🗳 🔨 🚺
Субструктуры Теплогидравлика Просмотр параметро	Субструктуры Теплогидравлика Просмотр парамет
	↓ + / ヘ 産  つ 2   本 8   □ 1
	🥃 🗧 🖗 🗊 🖬 A 🤜 🐕 🗊 🐨 💷

Рисунок 2.9.1 Панель примитивов и примитивы «Текст», «Повернутый текст»

# 34.999 кгс/см^2

🥠 Свойства: Text							
Общие Визуальные слои							
Название	Имя	Формула	Значение				
Текст	Text	" кгс/см^2"	кгс/см^2				
Способ показа цифр	ShowValue		Показывать слева				
Отображаемое значение	Values	Node_2p/98066.5	[34.999381]				
Прозрачный фон	Transparent		⊠да				
Шрифт	Font		Cambria				
Формат числа	FloatFormat		Основной				
Кол-во знаков после запятой	Digits	5	5				
Кол-во значащих цифр	Precition	5	5				
Положение точки вставки	Align		Слева				

Рисунок 2.9.2 Свойства примитива «Повернутый текст» для вывода текущего давления в кгс/см<sup>2</sup>

Изменения очевидны и аналогичны тем, которые мы делали при выводе текущих давлений по узлам и расходов по каналам при выводе отладочной информации. Удобство такого способа в том, что вы можете быстро и «по месту» вывести ту или иную расчетную величину на схеме. Недостаток заключается в том, что число и текст можно вывести только в единственном экземпляре, нельзя набрать строку, в которой есть предваряющий текст, потом число (или несколько чисел с разделителями) и затем какой-то еще текст.

Давайте воспользуемся вторым способом и в скрипте проекта наберем написанные ниже строки. Давления будем выводить в единицах измерения кгс/см<sup>2</sup>, поэтому будем делить на 98066.5 там, где требуется. Перед этим скриптом разместите на схеме 20 штук блоков типа «Повернутый текст» и дайте им имена **Text1, Text2... Text20.** Имена должны получиться автоматически, кроме, быть может, первого блока, у которого будет имя **Text**. Тогда разместите 21 такой блок, а первый потом удалите. Не обязательно для этого 21 раз заходить в панель примитивов – можно разместить 5 блоков, потом их все выделить охватывающей рамкой или Shift'ом, скопировать в буфер обмена и 3 раза вставить на схему, получится 20.

После размещения 20 блоков выделите их все и задайте массово у всех блоков свойства:

- 1) Способ показа цифр = Показывать слева;
- 2) Кол-во знаков после запятой = 5;
- 3) Кол-во значащих цифр = 5.

В итоге получится что-то, похожее на рис. 2.9.3.

0Текст	0Текст	0Текст	0Текст	0Текст
0Текст	0Текст	0Текст	0Текст	0Текст
0Текст	0Текст	0Текст	0Текст	0Текст
0Текст	0Текст	0Текст	0Текст	0Текст

Рисунок 2.9.3 Двадцать блоков типа «Повернутый текст»

Другие два свойства зададим из скрипта в соответствии с вышепредставленной таблицей. Скрипт будет следующим:

```
Text1.Values = P_in/98066.5; Text1.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text2.Values = P_o1/98066.5; Text2.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text3.Values = P_o3/98066.5; Text3.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text4.Values = P_o3/98066.5; Text4.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text5.Values = P_ou/98066.5; Text5.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text6.Values = Node_2._p/98066.5; Text6.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text7.Values = Node_3._p/98066.5; Text7.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text8.Values = Node_4._p/98066.5; Text8.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text9.Values = Node_5._p/98066.5; Text9.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text10.Values = Node_6._p/98066.5; Text10.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text11.Values = (Node_6._p/98066.5; Text10.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text11.Values = (Node_7._p-P_in)/98066.5; Text11.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text12.Values = (Node_7._p-P_01)/98066.5; Text13.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
```

```
Text14.Values = (Node_5._p-P_o3)/98066.5; Text14.Text = " κrc/cM<sup>2</sup>";
Text15.Values = (Node_6._p-P_ou)/98066.5; Text15.Text = " κrc/cM<sup>2</sup>";
Text16.Values = (Node_2._p-P_in)/P_in * 100; Text16.Text = " %";
Text17.Values = (Node_3._p-P_o1)/P_o1 * 100; Text17.Text = " %";
Text18.Values = (Node_4._p-P_o2)/P_o2 * 100; Text18.Text = " %";
Text19.Values = (Node_5._p-P_o3)/P_o3 * 100; Text19.Text = " %";
Text20.Values = (Node 6. p-P ou)/P ou * 100; Text20.Text = " %";
```

Это не самый оптимальный способ, зато он позволяет в одном месте все посчитать. И увидеть, не сделана ли где-то опечатка или ошибка. Если следовать первому способу, то все эти вычисления оказались бы разбросаны по разным блокам, и потом искать их и выявлять ошибки было бы немного труднее. Хотя первый способ имеет право на жизнь, с другой точки зрения, в первом способе сразу видно, что и откуда выводится в блок, непосредственно по его свойствам.

После набора скрипта и запуска модели на расчет у вас должна получиться картина, сходная с рис. 2.9.4. Если добавить еще некоторые оформительские усилия, то можно прийти к варианту рис. 2.9.5.

35 кгс/см <sup>2</sup>	9.2 кгс/см <sup>2</sup>	3.64 кгс/см <sup>2</sup>	0.96 кгс/см <sup>2</sup>	0.05 кгс/см <sup>2</sup>
35 кгс/см <sup>2</sup>	9.1998 кгс/см <sup>2</sup>	3.6402 кгс/см <sup>2</sup>	0.95997 кгс/см <sup>2</sup>	$0.050007 \ { m krc/cm^2}$
-3.5739Е-5 кгс/см <sup>2</sup>	<sup>2</sup> -0.00018663 кгс/см <sup>2</sup>	0.00018382 кгс/см <sup>2</sup>	-2.5183Е-5 кгс/см <sup>2</sup>	7.2765Е-6 кгс/см <sup>2</sup>
-0.00010211 %	-0.0020286 %	0.00505 %	-0.0026232 %	0.014553 %

Рисунок 2.9.4 Неоформленная отладочная информация

Заланное		Абс. давление пара перед турбиной	Абс. давление пара в I отборе	Абс. давление пара в камере регулируемого теплофикацион- ного (II) отбора	Абс. давление пара в III отборе	Давление после турбины	
	(номинальное)	35 кгс/см <sup>2</sup>	9.2 кгс/см <sup>2</sup>	3.64 кгс/см <sup>2</sup>	0.96 кгс/см <sup>2</sup>	0.05 кгс/см <sup>2</sup>	
	В модели	35 кгс/см <sup>2</sup>	9.1998 кгс/см <sup>2</sup>	3.6402 кгс/см <sup>2</sup>	0.95997 кгс/см <sup>2</sup>	0.050007 кгс/см <sup>2</sup>	
	0	-3.5739Е-5 кгс/см <sup>2</sup>	-0.00018663 кгс/см <sup>2</sup>	0.00018382 кгс/см <sup>2</sup>	-2.5183Е-5 кгс/см <sup>2</sup>	7.2765E-6 кгс/см <sup>2</sup>	
Отклонения	-0.00010211 %	-0.0020286 %	0.00505 %	-0.0026232 %	0.014553 %		

Рисунок 2.9.5 Некоторое оформление отладочной информации по давлениям

Сейчас, пока у нас все параметры модели практически откалиброваны, мы получили даже чрезмерную точность модели. В дальнейшем, по мере добавления в модель конденсатора, насосов, ПВД и ПНД и дальнейшей наладки модели, вы увидите, что номинал будет несколько «съезжать» из заданного равновесия. И задача дальнейшей разработки – не сильно отклоняться от полученного результата. В этом смысле подобного рода табличка является очень хорошим инструментом, помогающим и ускоряющим разработку – будет достаточно 2–5-секундного взгляда на нее, чтобы понять, в каком именно месте модели мы получили самое сильное отклонение, и предпринять меры по компенсации этого отклонения. Потратив на такой вывод отладочной информации (и на подготовку графиков еще) минут 10–20, вы сэкономите часы при дальнейшей разработке модели.

В дальнейшем мы еще вернемся к этой таблице и будем дополнять ее некоторыми опорными параметрами модели, за которыми нужно будет следить в ходе отладки.

#### 2.9.2 Вывод расходов и погрешностей их вычисления

Сделайте еще одну таблицу, давайте выведем расходы так же – на входе, выходе турбины, и расходы в каждом из трех отборов, как представлено в табл. 2.9.2. Последовательность действий полностью аналогична предыдущему подразделу 2.9.1. Поскольку сейчас расходы «зажаты» граничными условиями, то какихлибо существенных отклонений мы получить не должны. Но в дальнейшем при объединении и наращивании модели отклонения могут быть существенными. Их надо будет сводить к минимуму.

Заданный расход (по исходным данным)							
G пара (G_in)	G в I отбор (G_01)	G во II отбор (G_о2)	G в III отбор (G_03)	G выхлопа (G_ou)			
	Pac	четные значения в м	одели				
G перед 1-й ступенью	G в I отборе	G во II отборе	G в III отборе	G после 4-й ступени			
Channel_1g[1]	Channel_7g[1]	Channel_8g[1]	Channel_9g[1]	Channel_6g[1]			
	ŀ	бсолютные отклонен	ния				
Channel_1g[1]- G_in	Channel_7g[1]- G_o1	Channel_8g[1]- G_o2	Channel_9g[1]- G_03	Channel_6g[1]- G_ou			
Относительные отклонения, %							
100*(Channel_1. _g[1]-G_in)/G_in	100*(Channel_7. _g[1]- G_o1)/G_o1	100*(Channel_8. _g[1]- G_o2)/G_o2	100*(Channel_9. _g[1]- G_o3)/G_o3	100*(Channel_6. _g[1]- G_ou)/G_ou			

**Таблица 2.9.2.** Порядок вывода на экран отладочной информации по расходам проточной части

Скрипт, позволяющий вывести еще 20 чисел, в предположении, что имена примитивов будут Text21, Text22... Text40, приведем ниже:

```
Text21.Values = G_in*3.6; Text21.Text = " T/4";
Text22.Values = G_o1*3.6; Text22.Text = " T/4";
Text23.Values = G_o2*3.6; Text23.Text = " T/4";
Text24.Values = G_o3*3.6; Text24.Text = " T/4";
Text25.Values = G_ou*3.6; Text25.Text = " T/4";
Text26.Values = Channel_1._g[1]*3.6; Text26.Text = " T/4";
Text28.Values = Channel_7._g[1]*3.6; Text27.Text = " T/4";
Text28.Values = Channel_8._g[1]*3.6; Text28.Text = " T/4";
Text29.Values = Channel_8._g[1]*3.6; Text28.Text = " T/4";
Text29.Values = Channel_9._g[1]*3.6; Text28.Text = " T/4";
Text29.Values = Channel_9._g[1]*3.6; Text29.Text = " T/4";
```

```
Text31.Values = (Channel_1._g[1]-G_in)*3.6; Text31.Text = " T/4";
Text32.Values = (Channel_7._g[1]-G_o1)*3.6; Text32.Text = " T/4";
Text33.Values = (Channel_8._g[1]-G_o2)*3.6; Text33.Text = " T/4";
Text34.Values = (Channel_9._g[1]-G_o3)*3.6; Text34.Text = " T/4";
Text35.Values = (Channel_6._g[1]-G_ou)*3.6; Text35.Text = " T/4";
Text36.Values = (Channel_1._g[1]-G_in)/G_in * 100; Text36.Text = " %";
Text37.Values = (Channel_7._g[1]-G_o1)/G_o1 * 100; Text37.Text = " %";
Text38.Values = (Channel_8._g[1]-G_o2)/G_o2 * 100; Text38.Text = " %";
Text39.Values = (Channel_9._g[1]-G_o3)/G_o3 * 100; Text39.Text = " %";
Text40.Values = (Channel_6._g[1]-G_o0)/G_o0 * 100; Text39.Text = " %";
```

Заланный	Расход пара перед турбиной	Расход пара в I отборе	Расход во II отборе	Расход в III отборе	Расход после турбины	
(номинальный)	220 т/ч	18.4 т/ч	66.6 т/ч	10 т/ч	125 т/ч	
В модели	220.01 т/ч	18.401 т/ч	66.6 т/ч	10 т/ч	125 т/ч	
0	0.013042 т/ч	0.00075929 т/ч	0.00038691 т/ч	0.00011364 т/ч	0.0029837 т/ч	
отклонения	0.0059283 %	0.0041266 %	0.00058095 %	0.0011364 %	0.0023869 %	

Рисунок 2.9.6 Результат расчета модели по расходам

Рисунок 2.9.6 демонстрирует промежуточный результат по расходам – в нем ничего удивительного нет, поскольку расходы по каналам пока что довольно жестко и однозначно определяются граничными условиями типа «подпитка». На данном этапе разработки модели тут и должна была получиться почти абсолютная точность. Единственный вариант, когда здесь будут заметные отклонения, – либо начальный период расчета, когда в схеме происходят некоторые колебания, либо неверно заданные начальные или иные свойства теплоносителя и блоков, при которых схема и теплогидравлический решатель не могут сойтись к равновесным значениям, – тогда в таблице при расчете могут наблюдаться колебания произвольной амплитуды. В нашем случае мы от такого варианта заблаговременно избавились, максимально верно (насколько было возможно) выставив начальные значения.

Таким образом, совокупностью нодализационной схемы, характеристик ступеней турбины, заданными свойствами по блокам и вместе с теплогидравлическим решателем HS мы набрали некую модель проточной части турбины, в стационарном состоянии совпадающую с номинальными параметрами, взятыми из исходных данных.

Дальнейшая идея разработки модели заключается в следующем: если в соседнем проекте, рядом с моделью проточной части, мы наберем модель конденсатора или, например, подогревателя низкого давления (ПНД) или ПВД, которые будут на входе иметь аналогичные параметры пара (давление, расход, энтальпия), как и модель проточной части, и работать при этом так же <u>стационарно</u>, не отклоняясь от равновесия никуда, то мы можем такую модель подсоединить к модели проточной части, объединив их в одну модель, ожидая при этом, что параметры модели проточной части и параметры набранной автономно модели конденсатора (или ПНД, или ПВД) не «поплывут» и не уйдут из точки равновесия. В идеальном случае именно так и будет происходить. Но на практике, как правило, огрехи набора схемы и задания начальных свойств блоков, или неполные исходные данные, или не полностью согласованные граничные параметры теплоносителя в местах объединения моделей, или различия в расчете в коле HS, когда считается модель с граничным условием и когда такая же модель считается совместно с другими узлами и каналами, пусть даже и идентичными граничному условию, приводят к тому или иному (значительному или нет) отклонению от равновесной номинальной точки. Поэтому при объединении двух и более моделей в одну, как правило, требуется дальнейший анализ взаимного влияния моделей друг на друга и увязка разных моделей и приведение итогового стационарного состояния к номинальным параметрам некоторыми поправочными коэффициентами, или дополнительными настройками геометрии, изменением местных сопротивлений, длин элементов каналов, высотных отметок контрольных объемов, добавлением теплообмена с окружающей средой и других вспомогательных приемов.



Следующим элементом моделируемой ПТУ является главный конденсатор (ГК). В принятых допущениях, что у нас в коде НS моделируется только водяной пар и вода (неконденсирующиеся газы не моделируются), модель конденсатора представляет собой бак (контрольный объем) типа «пароводяной компенсатор давления».

В баке будет происходить процесс конденсации пара, поступающего с выхлопа турбины. Охлаждение пара происходит за счет теплообменника (в данном случае – двух теплообменников, конденсатор двухсекционный, как представлено на рис. 3.1.1). Значит, в модели нужно создать модель теплообмена. Охлаждающая вода не претерпевает фазового перехода, для нее достаточно будет модели из узлов и каналов.

Если бы нам не важны были уровень в конденсаторе и зависимость процесса охлаждения пара от уровня конденсата, можно было бы попробовать обойтись моделью без бака, сделать теплообменник типа канал–канал. Но т. к. от уровня конденсата многое зависит, то, как правило, модели конденсаторов, подогревателей, деаэраторов, выпарных установок и подобных устройств делают при помощи блоков, где есть явное геометрическое разделение на паровую и жидкую фазы.

В коде HS таким блоком является блок типа **HS** – **пароводяной компенсатор давления**. Мы создадим модель конденсатора при помощи этого блока. В верхний объем компенсатора будет поступать отработанный пар из ЦНД турбины и конденсироваться в баке. К баку будут подключены 2 теплообменника, отводящих тепло от конденсатора. Из нижней части бака конденсат будет отводиться в граничное условие, которое мы далее продолжим конденсатной группой насосов.

Параллельно с созданием конденсатора научимся использовать субмодель SimInTech для создания новых блоков (элементов схемы) с заданием своих свойств в них. Мы создадим конденсатор с возможностью изменения таких свойств, как объем парового пространства, поверхности теплопередачи, количества охлаждающих трубок и т. д. В дальнейшем отлаженную и проверенную субструктуру можно легко (простым копированием) переносить в другие проекты, внося требуемые и, как правило, небольшие изменения. Это существенно сокращает время на разработку и отладку новых схем.



Рисунок 3.1.1 Конденсатор на тепловой схеме ПТУ

Граничных условий будет два, оба типа **HS** – **Подпитка** (в номинальном стационарном состоянии – сколько пара поступает в конденсатор из турбины, столько же конденсата и сливается из него).

Линии для охлаждающей воды будут смоделированы простейшим образом – каналами общего вида между граничными узлами типа «расход» и «давление», с тепловым портом и теплообменной стенкой между каналом и баком, см. рис. 3.1.2.



Рисунок 3.1.2 Расчетная схема конденсатора (внутри субмодели)

# 3.1 Понятие о субмодели и типовой подпрограмме

На основе блока Субмодель можно создавать свои новые расчетные блоки, подготавливая внутри субмодели типовую схему и задавая свойства и параметры субмодели. Свойства далее будут транслироваться внутрь тех или иных блоков внутри субмодели. А параметры субмодели – вычисляться по параметрам расчетных блоков.

О такой субмодели можно говорить как о типовой теплогидравлической подпрограмме, или как о процедуре.

### 3.2 Создание теплогидравлической подпрограммы

Давайте создадим блок для конденсатора на основе блока **HS** – **Маска конденсатора**, расположенного на вкладке **Маски**. Поставьте этот блок на схему (можно в текущем проекте, где вы набрали проточную часть) и сразу поменяйте имя класса у него на **HS** – **Конденсатор КП-3200**, чтобы блок не имел более общее имя класса с библиотечным блоком, см. рис. 3.2.1. Также можете задать какое-либо другое имя блока, например «КП3200». Имя класса поменять важно, потому что в SimInTech есть механизм автоматического обновления блоков, и при следующем открытии проекта все ваши наработки могут исчезнуть, если вы измените блок с тем же именем класса, который есть в библиотеке. Блок «обновится» до библиотечного. Для масок это не столь актуально, но все равно имя класса настоятельно рекомендуется менять при разработке своего нового блока.

缔 Своі	Ф Свойства: КП3200							
Общие	Визуальные слои							
Название		Имя	Формула	Значение				
Имя объекта		Name		КП3200				
Тип элемента		ClassName		HS - Конденсатор КП-3200				
Подска	зка	Hint						

Рисунок 3.2.1 Задание имени блока и имени класса

Теперь, разместив на схеме такую «субмодель» (маска сделана из субмодели, поэтому размещенный блок – это субмодель, только с подготовленным рисунком), давайте организуем для нее входные и выходные порты.

Двойным щелчком зайдите внутрь субмодели и разместите там один блок типа **HS – порт входа** и **HS – порт выхода**, как показано на рис. 3.2.2. Задайте им имена **Выхлоп турбины** и **к ЭКН**.



Рисунок 3.2.2 Порт входа и выхода HS

Если вы перейдете на уровень выше, то увидите, что у субмодели порты создались слева и справа. Чтобы это изменить (нам надо сверху и снизу), зайдите снова внутрь субмодели и задайте расположение портов у блоков соответствующим образом: у блока **HS** – **порт входа** порт должен быть снизу, у другого блока – сверху. Тогда и на уровне выше, у субмодели, они переместятся на более верные места – но только в том случае, если свойство **Способ ассоциирования портов** стоит в значении **По положению**. Иначе надо еще и у субмодели изменить расположение портов.

Подготовительные процедуры мы сделали – поставили субмодель, задали имя класса, добавили порты.

# 3.2.1 Набор схемы внутри субмодели

Приступим к существенной части – заданию топологии.

Внутри субмодели требуется разместить следующие блоки:

- HS пароводяной компенсатор давления (1 шт.);
- **HS** узел компенсатора, разместить в верхней части бака (всего таких узлов 2 шт., но один узел будет проставлен вместе с баком);
- HS Цилиндрическая толстая стенка (2 шт.); разместите справа от бака;
- HS Канал (2 шт.); разместите их в направлении снизу вверх;
- HS Внутренний узел (2 шт.); сверху от каждого канала;
- **НЅ Граничный узел** (2 шт.); снизу от каждого канала;
- **НЅ Подпитка** (2 шт.), около внутренних узлов.

После размещения всех блоков на схеме внешний вид должен получиться сходным с рис. 3.2.3. Для подсоединения гидравлическими линиями связи все готово: каналы соедините с внутренними и граничными узлами, подпитки заведите во внутренние узлы – два контура охлаждающей воды готовы. От входного порта субмодели проведите линию связи к верхнему узлу бака, от выходного порта – к нижнему узлу бака.



Рисунок 3.2.3 Блоки для модели ГК

Для организации теплообменников необходимо добавить тепловые порты к каналам и к баку.

В каналах установите свойство **Количество тепловых связей** = 1, при этом на каждом канале в середине появится красная точка – это тепловой порт для подключения тепловых линий связи.

В баке тепловые структуры можно подключать как внешние стенки бака, но в нашем случае это не так – у нас каналы должны быть трубчаткой внутри бака. Поэтому следует поставить свойство **Количество тепловых портов (для связи с трубными пучками)** в баке равным 2. Свойство находится в группе **Теплообмен** в свойствах бака. При этом у бака появятся два входных тепловых порта, по умолчанию они расположены справа у блока – переместите их в левую часть, для более корректного соединения со стенками. Соедините тепловой порт каждого канала со своим входным тепловым портом стенки (чтобы контрольные объемы каналов были с внутренней стороны стенок), каждый выходной порт стенок – со своим тепловым портом бака. Результат сравните с рис. 3.2.4.



Рисунок 3.2.4 Топология субмодели конденсатора

Сравните полученный результат также с рис. 3.1.2 – у нас получилась визуально другая схема, но математически (топологически) это та же самая модель. Рассмотрим еще раз, что в ней будет смоделировано: забортная (охлаждающая) вода поступает в схему в два маленьких контура из граничных узлов, с заданными параметрами воды. Расход через оба контура будут поддерживать блоки подпитки (зададим их с отрицательным расходом, как мы делали это на отборах турбины). Таким образом, в модели всегда будет присутствовать расход холодной воды и идти охлаждение конденсатора через блок типа цилиндрическая стенка, с внутренней стороны которого протекает холодная вода, а наружная сторона будет иметь теплообмен с пароводяной средой в баке. В баке поступающий через верхний узел пар или пароводяная смесь с высокой энтальпией отдает энергию стенке и конденсируется, конденсат будет отводиться через нижний узел бака к группе ЭКН (пока что в граничное условие). Задача локальной модели конденсатора – принимать и конденсировать пар с заданными параметрами и расходом. То есть на вход конденсатору будем подавать пар с расходом 125 т/ч и энтальпией около 2158 кДж/кг, как у нас это получилось в модели проточной части на выходе.

Самая трудная часть в такой модели – это создать баланс между процессом конденсации, входящим расходом «греющего пара» и выходящим расходом конденсата. Эти три процесса, или расхода (можно говорить о расходе конденсации в баке), должны быть уравновешены, равны друг другу. Тогда модель сможет прийти в равновесие, даже без регулятора, а уровень в баке не будет уходить вверх или вниз.

# 3.2.2 Создание свойств субмодели

Теперь, набрав всю топологию схемы, надо задать корректным образом свойства всех блоков. Принципиально это можно сделать тремя способами:

- задавать непосредственно числа в блоках (самый простой и плохой вариант, потому что в некоторых местах надо задавать одинаковые или взаимно зависимые числа);
- 2) аналогично тому, как мы делали в проточной части, задавая некоторые постоянные в скрипте, а затем используя в нужных блоках те или иные именованные константы, или формулы на их основе. Это нормальный вариант, но не самый лучший, т. к. зачастую в блоках надо задавать не совсем те числа, которые присутствуют в исходных данных и «понятны» пользователю. Например, можно задаться внешним диаметром трубочек и толщиной стенки, тогда у каналов гидравлический диаметр должен быть равен внешнему диаметру минус двойная толщина. А в цилиндрических стенках надо задавать радиус, который в два раза меньше;
- 3) сделать типовую субмодель, в которой пользователю надо задать свойства у субмодели, причем в понятном ему формате (приближенно к исходным данным), а внутри субмодели скрипт самостоятельно пересчитает все нужные для данной топологии свойства для всех блоков и проинициализирует их перед расчетом. Этот вариант похож на предыдущий, только он позволит все, касающееся данной субмодели, вставить непосредственно в нее, и повторное использование такой субмодели будет просто – скопировать и вставить в другой проект. Кроме того, в модели конденсатора есть свойство типа «Материал», которое через скрипт или константу не так просто «подготовить», как через свойства блока. Мы будем двигаться именно третьим путем, с частичным использованием как первого, так и второго способов.

При анализе исходных данных было выявлено, что конденсатор геометрически по высоте условно разделен на две части – конденсатосборник внизу и паровое пространство вверху (рис. 3.2.5). Эти части имеют разное проходное сечение и объемы (соответственно, высоты тоже). По исходным данным объем конденсатосборника (объем нижнего водяного пространства, обозначим его *Vv*) составляет 5 м<sup>3</sup>, объем парового пространства (*Vp*) 55 м<sup>3</sup>. Трубчатка расположена в паровом пространстве на уровне *Zt* = 0.5 м, высота трубчатки *Ht* = 2 м. Площадь поперечного сечения бака в паровом пространстве *Sp* = 16 м<sup>2</sup>, площадь сечения в конденсатосборнике *Sv* = 5 м<sup>2</sup>.



Рисунок 3.2.5 Схема конденсатора, к созданию его модели

Площадь поверхности теплообмена: 3200 м<sup>2</sup>. В исходных данных также присутствуют и иные величины, характеризующие материал трубочек, их диаметр, параметры охлаждающей воды и др. Все данные, важные для задания свойств блоков, были сведены в таблицу и заданы как свойства субмодели.

Задайте их аналогично рис. 3.2.6. Для этого надо перейти для блока субмодели в интерфейс редактирования его свойств, который доступен после выделения блока на схеме и далее вызова пункта главного меню **Правка** → **Изменить блок...** 

Примечание: этот пункт меню доступен, только если активирован режим разработчика, пункт главного меню **Вид — Режим разработчика**.

Когда вы перешли в интерфейс изменения блока, добавьте там 27 строчек и аккуратно наберите все требуемые свойства. Обратите внимание на имена свойств и задайте их в точности как на рисунке, потому что дальше в скрипте мы будем обращаться к этим свойствам по именам. В колонке **Название** особой тщательности не требуется.

焥 Реда	стирование блока: КП3200							
Свойства	Общие Параметры Порты Расчёт							
N₽	Название	Имя	Тип данных	Форм	Значение	Режим	Действие	Способ расчёта
1	Ручное задание свойств внутри субмодели	is_ruch	Двоичное		Нет	Выход		Константа
2	Количество элементов разбиения по охлаждающей воде	Count	Целое	10	10	Выход		Константа
3	Объем парового пространства	Vp	Вещественное	50	50	Выход		Константа
4	Площадь зеркала по пару, м^2	Sp	Вещественное	16	16	Выход		Константа
5	Объем конденсатосборника, м^3	Vv	Вещественное	5	5	Выход		Константа
6	Площадь зеркала конденсатосборника, м^2	Sv	Вещественное	5	5	Выход		Константа
7	Начальный уровень воды, м	Level	Вещественное	0.9	0.9	Выход		Константа
8	Высотная отметка низа трубчатки относительно низа бака, м	Zt	Вещественное	0.5	0.5	Выход		Константа
9	Высота трубчатки, м	Ht	Вещественное	2	2	Выход		Константа
10	Поверхность теплопередачи, м^2	F	Вещественное	3200	3200	Выход		Константа
11	Внешний диаметр трубки, м	d	Вещественное	0.018	0.018	Выход		Константа
12	Толщина стенки трубки, м	ds	Вещественное	0.0006	0.0006	Выход		Константа
13	Количество охлаждающих трубок	n	Целое	6400	6400	Выход		Константа
14	Число ходов по охлаждающей воде	Nx	Вещественное	1	1	Выход		Константа
15	Материал трубки	Material	Имя файла баз		CTX18H10T	Выход		Константа
16	Коэффициент чистоты охлаждающих трубок	Fc	Вещественное	0.85	0.85	Выход		Константа
17	Высотная отметка низа бака, м	Zk	Вещественное	-10	-10	Выход		Константа
18	Номинальное давление, Па	Pnom	Вещественное	P_ou	4903.325	Выход		Константа
19	Давление забортной воды на входе, Па	Pov	Вещественное	1e5	100000	Выход		Переменная
20	Температура охлаждающей воды, С	Tov	Вещественное	10.1	10.1	Выход		Переменная
21	Расход охлаждающей воды в секцию 1, т/ч	Gov1	Вещественное	5000/2	2500	Выход		Переменная
22	Расход охлаждающей воды в секцию 2, т/ч	Gov2	Вещественное	5000/2	2500	Выход		Переменная
23	Длина трубки, м (справочно)	L	Вещественное		0	Выход		Константа
24	Гидравлический диаметр трубчатки, м (справочно)	Dg	Вещественное		0	Выход		Константа
25	Высота бака, м (справочно)	Нр	Вещественное		0	Выход		Константа
26	Высота конденсатосборника (справочно)	Hv	Вещественное		0	Выход		Константа
27	Проходное сечение по охлаждающей воде, м^2 (справочно)	S	Вещественное		0	Выход		Константа

Рисунок 3.2.6 Свойства модели конденсатора

Далее, тип данных – в основном **Вещественный**, но есть два целых свойства (с типом данных **Целое** число), одно **Двоичное** и одно со специальным типом **Имя файла базы данных**, через которое мы будем задавать материал стенок теплообменника.

Способ расчета надо поставить **Переменный** только для тех свойств, формула для которых должна быть пересчитана на каждом шаге расчета. Здесь к таким свойствам можно отнести свойства, задающие характеристики охлаждающей воды. Остальные меняться не будут.

Свойство **is\_ruch** служебное, используется в тех случаях, если будущий пользователь нашего блока не станет использовать создаваемую нами автоматизацию и захочет сам задать внутри субмодели те или иные свойства. Мы им воспользуемся внутри скрипта субмодели.

Последние 5 свойств – информационные, они будут вычисляться в скрипте, и их пользователю задавать не надо. Чтобы сообщить об этом пользователю, задайте их в Списке имен свойства для чтения, указав в соответствующем свойстве субмодели: «L;Dg;Hp;Hv;S;» (без кавычек). После этого свойства будут подсвечиваться серым фоном, который говорит о том, что задавать эти свойства смысла нет – они будут пересчитаны.

Задав таким образом свойства у субмодели, перейдем к «программированию» внутренностей нашей модели конденсатора. Примечание: на практике, как правило, не создают сразу такую модель с 27 свойствами, а вырабатывается подобный перечень постепенно за несколько итераций. Это только в методическом пособии сразу уже «все готово». Как правило, создание такого перечня – результат нескольких (или нескольких десятков) проб, ошибок и корректировок при создании типовой подпрограммы.

Свойства задаются одновременно с написанием скрипта. Добавили 2–3 свойства, для них 3–5 строчек скрипта для их обработки. Потом проинициализировали задачу, убедились, что все корректно в блоках проинициализировалось, скорректировали, если что-то не так, далее добавляем следующие свойства и т. д.

# 3.2.3 Задание имен блоков внутри субмодели

Перейдите внутрь субмодели. Перед написанием скрипта надо задать верные (желательно короткие) имена блоков. Задайте следующие имена у блоков:

**SteamComp** – бак, W1, W2 – стенки,

**Ch1**, **Ch2** – каналы.

Для этих пяти блоков мы будем задавать свойства через скрипт.

Для блоков граничных узлов и подпиток запишем прямо в формулы блоков нужные свойства субмодели.

# 3.2.4 Скрипт субмодели конденсатора

Ниже приведем скрипт, который задает свойства у блоков внутри субмодели, в зависимости от чисел, заданных пользователем у самой субмодели. Этот скрипт следует написать в скрипте блока субмодели. Для этого надо, находясь на уровне вложенности субмодели, нажать кнопку **Скрипт** рядом с зеленой кнопкой вверх (которая перемещает на верхний уровень). Если вы создаете блок в том же проекте, что и проточная часть турбины, то в скрипте проекта остается тот скрипт, который мы набирали для проточной части, – пусть он там остается. Благодаря тому скрипту для номинального давления в конденсаторе мы использовали константу **P\_ou** на 18-й строке рис. 3.2.6. А внутри субмодели скрипт будет пока что пустым. Именно в пустую часть наберите следующие строки:

```
initialization
if (not submodel.is_ruch) then begin
submodel.Dg = submodel.d-2*submodel.ds;
submodel.S = pi*submodel.dg*submodel.dg*n/4/Nx;
setpropevalstring(submodel, "Dg", submodel.dg);
setpropevalstring(submodel, "S", submodel.S);
setpropevalstring(submodel, "L", submodel.F/(pi*submodel.dg*submodel.n));
w1.Material=Material;
setpropevalstring(w1,"Nh",submodel.Count);
setpropevalstring(w1,"R2",submodel.d/2);
setpropevalstring(w1,"delta_wall",submodel.ds/submodel.Fc);
```

```
setpropevalstring(w1,"N rod",submodel.n/2);
setpropevalstring(w1,"deltaH","["+Count#(submodel.L/Count)+"]");
InitObject(w1):
w2.Material=Material:
setpropevalstring(w2,"Nh",submodel.Count);
setpropevalstring(w2,"R2",submodel.d/2);
setpropevalstring(w2,"delta wall",submodel.ds/submodel.Fc);
setpropevalstring(w2,"N rod",submodel.n/2);
setpropevalstring(w2,"deltaH","["+Count#(submodel.L/Count)+"]");
InitObject(w2);
setpropevalstring(Ch1,"N",submodel.Count);
setpropevalstring(Ch1,"Dg","["+Count#submodel.Dg+"]");
setpropevalstring(Ch1,"S","["+Count#submodel.S/2+"]");
setpropevalstring(Ch1,"L","["+Count#(submodel.L/Count)+"]");
setpropevalstring(Ch1,"KsiDir","["+(Count+1)#1/(Count+1)+"]");
setpropevalstring(Ch1,"KsiRev","["+(Count+1)#1/(Count+1)+"]");
setpropevalstring(Ch1,"dZ","["+Count#0+"]");
InitObject(Ch1);
setpropevalstring(Ch2,"N",submodel.Count);
setpropevalstring(Ch2,"Dg","["+Count#submodel.Dg+"]");
setpropevalstring(Ch2,"S","["+Count#submodel.S/2+"]");
setpropevalstring(Ch2,"L","["+Count#(submodel.L/Count)+"]");
setpropevalstring(Ch2,"KsiDir","["+(Count+1)#2/(Count+1)+"]");
setpropevalstring(Ch2,"KsiRev","["+(Count+1)#2/(Count+1)+"]");
setpropevalstring(Ch2,"dZ","["+Count#0+"]");
InitObject(Ch2);
submodel.Hp = submodel.Vp/submodel.Sp;
submodel.Hv = submodel.Vv/submodel.Sv;
setpropevalstring(submodel,"Hp",submodel.Hp);
setpropevalstring(submodel,"Hv",submodel.Hv);
setpropevalstring(submodel,"Zt",submodel.Zt);
setpropevalstring(submodel,"Ht",submodel.Ht);
setpropevalstring(submodel,"Level",submodel.Level);
setpropevalstring(SteamComp, "V", submodel.Vv+submodel.Vp);
tmp = min(submodel.Level,submodel.Hv)*submodel.Sv
     +max(0,submodel.Level-submodel.Hv)*submodel.Sp;
setpropevalstring(SteamComp, "V1_0", tmp/(submodel.Vv+submodel.Vp));
sko1=[0,submodel.Vv,submodel.Vv+submodel.Sp*submodel.Zt,
        submodel.Vv+submodel.Vp];
sko2=[0,submodel.Hv,submodel.Hv+submodel.Zt,
        submodel.Hv+submodel.Hp];
```

```
setpropevalstring(SteamComp,"L_V","[["+sko1+"];["+sko2+"]]");
InitObject(SteamComp);
```

#### end;

end;

Этот скрипт работает только на этапе инициализации, и только если свойство is\_ruch установлено в **Нет**. Условно скрипт разделен на 5 частей, каждая из которых завершается вызовом функции InitObject(<имя блока>), которая инициализирует последовательно 5 блоков внутри субмодели.

Свойства блокам задаются функцией **setpropevalstring**, которая определяет формулу для того или иного свойства. Служебное слово **submodel** позволяет обратиться к свойствам субмодели.

Видно, что свойство **Count** используется и для каналов, и для стенок.

**Dg** (свойство для чтения) считается в самом начале по внешнему диаметру и толщине стенок и используется для задания диаметров у каналов охлаждающей воды.

**S** (свойство для чтения) вычисляется по формуле площади круга, количеству трубок и числу ходов, используется для задания площади проходного сечения в каналах. Каждым каналом мы моделируем все трубочки теплообменника – поэтому **Dg** задается как для 1-й трубочки, а **S** задается как для **N** трубок. В каналах задаем половину посчитанной площади.

L (свойство для чтения) вычисляется в соответствии с заданной поверхностью теплопередачи F, длиной окружности с диаметром Dg и количеством трубок N. Далее L используется в каналах и в стенках, для задания длины элементов каналов.

Material присваивается в блоках стенок и т. д.

Попробуйте самостоятельно, анализируя рис. 3.2.5, набранный скрипт и свойства блока типа **Пароводяной компенсатор давления** и остальных, разобраться в других строчках скрипта.

Примечание: приведенный вариант скрипта является рабочим, но не идеальным. В нем, вероятно, присутствуют некоторые шероховатости. Скорее всего, надо добавить проверку вводимых пользователем данных на корректность (например, что толщина стенки трубочки не может быть больше половины ее диаметра, давление не должно быть отрицательным и т. п.). Возможно, некоторые строки в скрипте есть и лишние... Но данный скрипт работает и позволит нам двигаться дальше.

После набора скрипта попробуйте инициализировать задачу (на расчет запускать рано, хотя тоже можете попробовать – герметичный бачок, без подвода пара и отвода конденсата будет просто остывать, а давление в нем будет падать), и если никаких ошибок система не выдаст, то, скорее всего, вы все сделали правильно.

#### 3.2.5 Параметры конденсатора

Для отладки было бы неплохо вывести на «верхний» уровень субмодели основные параметры. Перейдите снова в редактирование блока через меню **Правка** — **Изменить блок** и задайте там на вкладке **Параметры** 14 новых параметров блока, как представлено на рис. 3.2.7. Все они вещественные, задавать надо аналогично тому, как вы задавали свойства.

Далее перейдите в скрипт субмодели и ниже – под секцией **initialization** ... **end**, в которой мы набрали скрипт с заданием свойств, – напишите следующие строки:

```
submodel._G = abs(Ch1._Gin+Ch2._Gin)*3.6;
submodel._w = abs(Ch1._w[1]+Ch2._w[1])/2.0;
submodel._Tin = Ch1._Tin;
submodel._Tou = Ch1._Tou;
submodel._dPtr = abs(Ch1._Pin-Ch1._Pou)*0.001;
submodel._Q = abs(SteamComp._q_sum)*0.000001;
submodel._Qf = submodel._Q/submodel.F*1000; //kBT/M2
submodel._dTou = SteamComp._T_v2-Ch1._Tin;
```

```
submodel._Level = SteamComp._L;
submodel._Ps = SteamComp._P*0.001;
submodel._Ts = SteamComp._T_v2;
submodel._Hs = SteamComp._hfs;
```

🏟 Редан	стировани	1е блока: KП3	200								
Свойства	Общие Параметры Порты Расчёт										
N♀	Название			Имя	Тип данных	Формула	Значение	Режим	д	Способ ра	
1	Давление в конденсаторе, кПа			_Ps	Вещественное	0	0	Выход		Переменная	
2	Температура в конденсаторе, С			_Ts	Вещественное	0	0	Выход		Переменная	
3	Энтальпия конденсата, ккал/кг				_Hs	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
4	Расход охлаждающей воды, т/ч				_G	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
5	Гидр. сопротивление по охлаждающей воде, кгс				_dPtr	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
6	Скорость охлаждающей воды в трубках, м/с			_w	Вещественное	0	0	Выход		Переменная	
7	Температура охлаждающей воды на входе, С				_Tin	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
8	Температура охлаждающей воды на выходе, С				_Tou	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
9	Средний коэффициент теплопередачи, Вт/м2*К				_alfa	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
10	Температурный напор на выходе из конденсатора, С				_dTou	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
11	Средний логарифмический температурный напор, С				_LMTD	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
12	Общая тепловая нагрузка, МВт				_Q	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
13	Удельная тепловая нагрузка, кВт/м2				_Qf	Вещественное	0	0	Выход		Переменная
14	Уровень воды, м				_Level	Вещественное	0	0	Выход		Переменная

Рисунок 3.2.7 Параметры конденсатора

Эти строки очевидны и не требуют пояснений. Отметим только, что данные строчки будут исполняться на каждом шаге синхронизации задачи, т. е. параметры блока будут пересчитываться в течение расчета. В отличие от свойств, которые рассчитаются только на инициализации и более не будут вычисляться.

Ф Свойства: КП3200						
Свойства Параметры Общие Порты Визуальные сл	юи					
Название	Имя	Значение				
Давление в конденсаторе, кПа	_Ps	71.999051				
Температура в конденсаторе, С	_Ts	90.672835				
Энтальпия конденсата, ккал/кг	_Hs	379799.46				
Расход охлаждающей воды, т/ч	_G	0				
Гидр. сопротивление по охлаждающей воде, кгс	_dPtr	1.4551915E-14				
Скорость охлаждающей воды в трубках, м/с	_w	0				
Температура охлаждающей воды на входе, С	_Tin	20.000295				
Температура охлаждающей воды на выходе, С	_Tou	19.999128				
Средний коэффициент теплопередачи, Вт/м2*К	_alfa	0				
Температурный напор на выходе из конденсатора, С	_dTou	70.67254				
Средний логарифмический температурный напор, С	_LMTD	0				
Общая тепловая нагрузка, МВт	_Q	7.1647885				
Удельная тепловая нагрузка, кВт/м2	_Qf	2.2389964				
Уровень воды, м	_Level	22.224665				

Рисунок 3.2.8 Промежуточные параметры конденсатора

Попробуйте запустить задачу на расчет. Если вы все сделали, как описано выше, то к 30-й секунде расчета параметры конденсатора будут похожи на рис. 3.2.8, и это довольно далеко от тех параметров, которые нам нужны. Давление 70 кПа, уровень 22 м (что нереально, но причина для такого расчета есть, это не ошибка кода). Дело в том, что мы не до конца задали все свойства блоков внутри субмодели. Скрипт нам задал только некоторые числовые свойства и материал стенок. Но остались еще не охваченные скриптом места. Перейдем к ним.

Примечание: у субмоделей в SimInTech есть общее свойство (на вкладке **Общие**) с названием **Закрыть субмодель**. Если это свойство выставлено в **Нет** (так по умолчанию), то в процессе расчета при двойном щелчке мыши по субмодели вы проваливаетесь в субмодель и попадаете на следующий уровень вложенности, как и при редактировании схемы. А для того чтобы вызвать окно текущих параметров (как на рис. 3.2.8), следует нажать правой кнопкой мыши на субмодель и перейти в ее свойства. При этом (если модель запущена на расчет) откроется сразу вкладка параметров.

Если же свойство **Закрыть субмодель** поставить в **Да**, то двойной щелчок мыши по субмодели в процессе расчета сразу откроет параметры. Но зайти в субмодель теперь можно будет только через правую кнопку мыши и выбором там соответствующего пункта **Действия** → **Зайти в субмодель**. Как правило, по окончании всех работ с субмоделью это свойство переключают в **Да** для удобства работы с параметрами.

### 3.2.6 Окончательное задание всех свойств

По рис. 3.2.8 видно также, что расход охлаждающей воды нулевой – мы же не задали ничего в подпитках, поэтому там 0. Перейдите в блоки подпиток, задайте в колонке **Формула** температуру охлаждающей воды **Tov**, а расход охлаждающей воды **-Gov1/3.6** и **-Gov2/3.6** для блоков **W1** и **W2** соответственно. Какой из них у вас будет первым, а какой вторым – не принципиально, главное, чтобы они были соединены соответственно с 1-м и 2-м каналами **Ch1** и **Ch2**.

Можете после этого изменения запустить на расчет – увидите, что параметр субмодели \_G уже будет насчитываться нормальной величины.

Что нам следует еще задать? Выполните последовательно следующие пункты. После выполнения каждого пункта можете запускать на расчет модель и наблюдать, как меняются параметры у субмодели и у блоков внутри нее.

- 1. Для внутренних узлов начальную температуру задайте как Tov+10.
- 2. Для граничных узлов начальную температуру задайте = Tov.
- 3. Давление пусть будут атмосферным, 1е5, как задано по умолчанию.
- 4. В каналах задайте начальное распределение параметров: давление Self.N#1e5, температура Self.N#(Tov+10), расход = Gov1/3.6 и Gov2/3.6. Обратите внимание еще раз, что каналы направлены снизу вверх (на схеме), и в подпитках мы задаем расходы с минусом, а в каналах с плюсом.
- 5. Начальную температуру стенок задайте как Self.Nh#(Tov+10).
- 6. Бак. С баком первым делом надо переключить его геометрию на Произвольный тип геометрии бака. При этом появится свойство L\_V, задаваемое из скрипта. Иначе до этого изменения бак рассчитывался как вертикальный цилиндр постоянного по высоте сечения, и именно из-за этого там насчитывалась высота (уровень в баке) 22 м.
- Начальное давление в баке проставьте равным Pnom. Тогда бак начнет расчет уже из состояния пароводяной смеси с заданным номинальным вакуумом (давлением около 5 кПа).
- 8. Высотная отметка днища бака поставьте **Zk**.
- 9. Нижняя и верхняя отметки трубного пучка в баке. Здесь следует задавать массивы, т. к. у нас два теплообменника подключены к баку через два тепловых порта. Задайте свойство Нижняя отметка трубного пучка как [Hv+Zt, Hv+Zt] (в колонке формула), а свойство Верхняя отметка трубного пучка = [Hv+Zt+Ht, Hv+Zt+Ht].
- 10. Определяющий размер трубного пучка можно задать как внешний диаметр трубочек, поставьте там формулу **Self.Nheatport\_tube\_bundle#d**.
- 11. Постоянная времени сглаживания коэффициента теплоотдачи лучше задать немного побольше, например **3** секунды.
- 12. Коэффициент теплоотдачи на зеркале 1еЗ. Вообще, все эти настройки важны при отладке переходных процессов, а сейчас, поскольку мы настраиваем стационарное состояние, достаточно задать их примерными величинами, хотя бы по порядку величины совпадающими с тем, что должно быть, и это позволит нам при заданной поверхности теплообмена получить нужную интенсивность конденсации пара на трубчатке.

После этих изменений при запуске на расчет давление в баке немного просядет ниже 5 кПа, уровень будет около 0.9 м, остальные параметры должны стабилизироваться. Самой простой проверкой на стабильность для такой модели будет вывести все параметры на временные графики и убедиться, что они все приходят к какому-то равновесному значению, с течением времени.

На этом внутренние модификации типовой подпрограммы конденсатора типа КП-3200 в целом завершены, осталось только подвести греющий пар (выхлоп турбины) и организовать отвод конденсата.

#### 3.2.7 Подключение каналов к модели конденсатора

На баке (пароводяном компенсаторе давления) мы ранее разместили два блока типа **Узел компенсатора**. Сами по себе эти блоки в коде HS являются расчетными узлами тоже, но присоединенными к тому или иному объему бака – они вычисляют параметры теплоносителя и входящий/выходящий расход между узлом и соответствующей частью бака. Но если к этим узлам не подключен ни один канал, то эти два блока почти ничего не означают – в них может попадать только расход из бака и уходить в бак. Блоки эти нужны как возможность подключения к баку каналов, и с точки зрения последних, узел компенсатора – это как бы граничный узел. Узлы компенсатора также задают место подключения канала к баку – высотную отметку врезки канала в бак, тип подключения канала к баку – отвечают на вопрос, к паровому/газовому (верхнему) или жидкостному (нижнему) пространству подключен канал.

Мы сделали так, что линиями связи соединили узлы компенсатора с входным и выходным портами. Значит, с верхнего уровня наша субмодель – это как бы узел (ну или два узла), к которому надо подключать каналы. Это не единственная возможность – мы могли бы разместить внутри субмодели паровой канал и канал отвода конденсата. Но тогда нам пришлось бы в свойствах субмодели еще добавлять диаметры этих каналов и прочие их свойства, что еще увеличило бы сложность модели.

Давайте дополним модель, уже снаружи субмодели, двумя каналами, двумя внутренними узлами и двумя подпитками, как показано на рис. 3.2.9. Подсоедините все линиями связи аналогично рисунку и задайте следующие свойства в блоки.

- 1. Для подпитки, подводящей пар, задайте расход **+G\_ou**. Мы создаем модель конденсатора в том же проекте, что и проточная часть, поэтому все глобальные константы, заведенные ранее, доступны для использования.
- 2. Для подпитки, отводящей конденсат, расход следует задать **-G\_ou**. С таким расходом должна откачивать конденсат группа ЭКН.
- Для подпитки, подводящей пар, задайте температуру T\_ou. Для подпитки, отводящей конденсат, температура особой роли не играет, так как там расход отрицательный. Температура там может оставаться заданной по умолчанию.
- 4. Во внутреннем узле, в который подводится пар, задайте параметры как в граничном узле модели проточной части, т. к. именно этот узел будет потом заменять граничный узел при объединении моделей. Задайте начальные давление и температуру равными T\_ou, P\_ou. Объем узла задайте 1 м<sup>3</sup>, чтобы сгладить возможные колебания схемы при численном интегрировании. Высотную отметку пока можно оставить 0, но вообще к ней надо позже вернуться.

- 5. Гидравлический диаметр у канала подвода пара давайте зададим таким же, какой мы «подобрали» для последнего канала проточной части, равным 4 м.
- 6. Перейдите внутрь субмодели и у верхнего узла бака проставьте гидравлический диаметр 4 м, как и у канала, высоту относительно дна бака = 4.125 м, а тип патрубка – спринклер. Высота 4.125, равная высоте бака, означает, что отверстие будет врезано как бы в крышку бака, и сконденсированная вода не сможет самотеком затекать обратно в канал подвода пара (при переполнении компенсатора, например).
- 7. Для канала, отводящего конденсат, задайте диаметр **1** м, такой же гидравлический диаметр проставьте для нижнего узла бака (внутри субмодели).
- Параметры сконденсированной фазы в конденсаторе. По исходным данным давление в конденсаторе должно быть 0.051 кгс/см<sup>2</sup>, и температура воды примерно 32 °C. Добавьте две глобальные константы в скрипт проекта: const P cnd = 0.051 \* 98066.5; const T cnd= 32.
- Пользуясь этими двумя новыми константами P\_cnd и T\_cnd, задайте начальные условия для канала отвода конденсата. Расход в нем следует задать равным +G\_ou.
- 10. Высотная отметка узла отвода конденсата. Бак у нас стоит на −10 м, задайте для узла, где отводится конденсат подпиткой, высотную отметку еще немного пониже, например равную −15 м.



Рисунок 3.2.9 Каналы подвода пара и отвода конденсата

Проверим еще раз – в подпитке, узле, канале и узле компенсатора, где подводится пар, мы задаем 4 м диаметр Dg, начальные условия такие же, как и на выходе и проточной части (**P\_ou**, **T\_ou**). В подпитке, узле, канале и узле компенсатора задаем 1 м диаметр, а начальные условия – как для конденсатора (**P\_cnd**, **T\_cnd**). Расход везде должен быть **G\_ou** (с точностью до знака).

Казалось бы, все должно быть дальше нормально и уравновешено – охлаждение бака есть, подвод и отвод среды мы организовали с нужным расходом и параметрами, но если вы попробуете запустить задачу на расчет, то увидите крайне нестабильную работу системы, почти на грани устойчивости. В чем причина?

Дело в том, что в подпитке, задавая температуру (33 °C), мы не можем температурой точно указать, вода это или пар, поскольку давление во внутреннем узле будет меняться, а указанная температура очень близка к температуре насыщения... Из-за низкого начального давления в узле, куда вставлена подпитка, сначала там поступает пар, но потом давление поднимается и 33 °C уже соответствуют воде. Свойства входящей среды резко меняются, меняется расход в конденсатор из узла и т. д.

Для корректной работы и верного задания именно пара на входе в конденсатор, независимо от давления в узле, следует воспользоваться заданием через начальную энтальпию. Задайте там энтальпию подаваемой среды такую, какая у нас получилась на выходе из проточной части турбины, а именно **2 158 305** Дж/кг. Определяющий параметр при этом задайте как «**Энтальпия**», см. рис. 3.2.10.



Рисунок 3.2.10 Свойства входящего потока пара

В принципе, можно было бы и начальные свойства в узлах проточной части задавать через энтальпии, так было бы более верно и надежно.

#### 3.3 Отладка номинальных параметров конденсатора

Какие параметры конденсатора следует взять, чтобы убедиться в его корректной работе? Как минимум это те параметры, которые есть в исходных данных, – давление в конденсаторе, им будет определяться температура конденсата (должна быть около 32 °C). Не должен уходить уровень сконденсированной воды ни вверх, ни вниз; это будет определяться равенством расхода конденсации в баке входному и выходному расходам.

# 3.3.1 Добавление вывода параметров на расчетную схему

Но нам, для лучшего понимания модели и процессов, лучше вывести немного больше параметров. Давайте подготовим блок, который выведет на схему 10 параметров конденсатора:

- давление, температуру в баке;
- входную и выходную температуры, расход, скорость потока и перепад давления по охлаждающей воде;
- тепловую нагрузку (мощность), поверхностную плотность тепловой нагрузки;
- уровень в баке.

Для подготовки такого блока так же, как мы это делали для узлов проточной части турбины, можете воспользоваться одним из библиотечных блоков. Например, из вкладки **Просмотр параметров**, **В баке**, блок **НS – Контроль уровня жидкости в баке**.

Выбрав его и поставив на субмодель конденсатора, вы увидите вывод только уровня. Задайте свойства **Текст** и **Имена выводимых параметров** у этого блока аналогично рис. 3.3.1 (также приведены в табл. 3.3.1).



Рисунок 3.3.1 Выводимые параметры субмодели конденсатора

Как вы можете увидеть, мы использовали моноширинный шрифт (например, Lucida Console), тогда на расчетной схеме все знаки «равно» будут находиться один под другим. Количество значащих цифр поставьте равным 6, количество цифр после запятой = 3. Формат числа – фиксированный. Единицы измерения параметров подобраны специально так, чтобы не было больших чисел или слишком маленьких, для удобства вывода на графики и такого рода отладки. Стиль выравнивания поставьте **Слева**, тогда все параметры выстроятся в одну колонку. Выведите также другие отображающие параметры блоки для узлов и каналов – скопируйте их из расчетной схемы проточной части. Запустите модель на расчет. Внешний вид схемы, через 20–30 секунд расчета и стабилизации процесса, должен получиться близким к рис. 3.3.2.



Таблица 3.3.1. Параметры конденсатора, для отладки

Рисунок 3.3.2 Стабилизация параметров после 20 секунд тестового расчета

По рисунку видно, что температура охлаждающей воды поднимается на 12 °C, давление в конденсаторе практически равно номинальному, уровень примерно остается на заданном уровне 0.9 м.

Важным параметром является также гидравлическое сопротивление в конденсаторе контура охлаждающей воды. По исходным данным оно должно быть равно 0.3 кгс/см<sup>2</sup>  $\approx$  30 кПа, при чистых трубках и номинальном расходе забортной воды. Для нашей модели это сейчас не столь принципиально, потому что данный контур у нас смоделирован без насосов, просто на граничных условиях, и он таким и останется. Но, в принципе, вы можете увеличить в каналах коэффициенты местного сопротивления (мы их задавали через скрипт), которыми учтете сопротивление трубчатки на прокачку воды и повысите *dP* в модели, которое при заданных свойствах каналов по умолчанию получилось равным всего 0.8 кПа, что почти в 40 раз меньше. В моделях подогревателей, которые будем делать дальше, это будет важно.

Давайте немного проанализируем переходной процесс и выясним причины, из-за которых мы не можем выставить в модели конденсатора начальные условия, близкие к стационарному состоянию, чтобы уменьшить время переходного процесса, как мы это делали в модели проточной части.

#### 3.3.2 Анализ переходного процесса

Выведем на три графика следующие параметры: 1) давление в конденсаторе, 2) расходы в каналах и расход конденсации в баке, 3) уровень в баке. Подробно порядок вывода не указываем, он аналогичен предыдущим этапам вывода расчетных параметров на графики. Расходы для каналов взяты на выходе из каналов, а расход конденсации – это параметр бака с именем **Расход конденсации пара на трубных пучках, т/ч**. Если вы все делали по описанию, приведенному выше, то графики переходных процессов за первые 15 секунд расчета будут аналогичны рис. 3.3.3, 3.3.4 и 3.3.5. Если вы задали какие-то свойства или начальные условия не так, как было указано, то процесс может численно отличаться, но качественно должен совпадать с рисунками. Если у вас получилось что-то другое, то проверьте задание свойств заново, иной результат является ошибочным.

Что мы видим по рисункам? Что давление претерпевает сильный скачок в область около 30 кПа, затем возвращается к номинальному значению (5 кПа).

Массовый расход конденсации начинается из 0 и через затухающий колебательный процесс приходит к равновесному значению, которое ниже, чем входящий и выходящих расходы. Возникает вопрос: почему? Куда уходит часть подаваемого пара в бак?

В соответствии с тем, что конденсация как бы «разгоняется» в баке и в начальный момент она не велика, а откачка конденсата задана сразу номинальной, уровень воды сначала немного снижается (но это незначительное снижение – всего 2 тысячных метра, то есть 2 мм), затем возвращается к прежнему значению.



Рисунок 3.3.3 Давление в конденсаторе



Рисунок 3.3.4 Расход (входной пар, расход конденсации и выходной расход конденсата)



Рисунок 3.3.5 Уровень в конденсаторе

Давайте разберемся, что происходит в начальный момент времени и из-за чего происходит переходной процесс. У нас есть несколько неравновесных заданий начальных свойств. Первое: температура стенки трубчатки задана постоянной и равной 20 °C, что не соответствует тому распределению, которое должна занять температура стенки в процессе. Это же можно сказать и про коэффициенты теплоотдачи, и про распределение температуры охлаждающей воды по своим каналам. Второе: мы поставили постоянную времени для вычисления коэффициента теплоотдачи в баке = 3 секунды. Это полезно в процессе отладки и в переходных режимах, чтобы коэффициент теплоотдачи не претерпевал сильных скачков и не расшатывал численную схему. Похоже, что он начинает свой расчет с нулевого значения, и требуется некоторое время, чтобы коэффициент принял равновесное значение. Третье – сам расход конденсации на трубчатке зависит и от расчетного коэффициента теплоотдачи, и от температуры стенок, и от температуры воды в трубчатке, и от параметров в конденсаторе. В начальный момент времени он нулевой, и похоже, что через свойства в баке его невозможно задать так же, как в канале.

В результате этих трех причин мы получаем затухающий колебательный процесс в начале расчета. Мы можем только снизить его длительность по времени, снизив 3-секундную «инерцию» в расчете коэффициента теплоотдачи. Попробуйте задать там 1 секунду, 0.1 секунды и 0 секунд и посмотреть на получаемый результат и графики. Видно, что это настроечное свойство сильно влияет на переходной процесс, но не влияет на получаемое равновесное состояние. Давайте оставим в этом свойстве **1 секунду**. Теперь про расход конденсации и его отличие от номинального. Если вы внимательно изучите параметры бака, то сможете обнаружить еще один расход, который примерно равен разнице между номинальным расходом и полученным расходом конденсации, см. рис. 3.3.6. Также модель бака считает почему-то, что пар в него подается с расходом всего 28.99 кг/с, а конденсата отводится 34.72 кг/с. Можно предположить, что входной поток, который мы организовали через энтальпию, взятую из модели турбины, – это не поток пара, а поток пароводяной смеси. Действительно, энтальпии 2158 кДж/кг и давлению 0.005 МПа соответствует область пароводяной смеси с паросодержанием 88 %, см. рис. 3.3.7. Эти 88 % как раз примерно и соответствуют расходу пара 29 кг/с, поступающего в конденсатор. Остальное поступает уже в виде воды и сразу переходит в область сконденсированной фазы (отдельным расходом).

Не вдаваясь в подробности модели бака, чтобы получить требуемый расход конденсации, можете попробовать поднять энтальпию входящего потока, например до 2560 кДж/кг. Но это уже выходит за рамки нашей отладки, потому что выходная среда из турбины – это именно пароводяная смесь с заданной нами энтальпией.

🧔 Свойст	ва : SteamCom	р					
Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои			
Название	Название				Имя	Значение	
Pacxo,	Расходы						
Су	<ul> <li>Сумма расходов жидкости через патрубки в/из 1-й области, кг/с</li> </ul>			бласти, кг/с	_sGf1	-34.721789	
Сү	мма расходов	пара чер	ез патру	_sGv1	0		
Суі	мма расходов	пара чер	ез патру	_sGv2	28.997164		
Pa	сход жидкости	, поступа	ющей ч	_Gf1	0		
···· Pa	Расход пара, поступающего через патрубки в 1-ю область, кг/с Расход пара, поступающего через патрубки во 2-ю область, кг/с Расход жидкости, поступающей через спринклеры, кг/с Расход пара из 1-й области во 2-ю, кг/с			ласть, кг/с	_Gv1	0	
Pa				бласть, кг/с	_Gv2	28.997164	
···· Pa				г/с	_Gspr	5.7258894	
Pa					_G12	0.39609859	
···· Pa	Расход при конденсации на зеркале, кг/с Расход конденсации пара на струях впрыска, кг/с					_Gmir	0
Pa						_Gd	-1.5801743E-6 0
Pa	Расход конденсации пара на стенках компенсатора, кг/с Расход конденсации пара на трубных пучках, кг/с Расход конденсации пара на ТЭН, кг/с Расход конденсации пара в объёме жидкости, кг/с			۲/c	_Gw		
Pa					_g_cond_tube_bundle	29.398678	
···· Pa					_g_cond_ten	0	
Pa					_Gcon	0	
Расход генерации пара в объёме жидкости, кг/с Расход конденсации пара в объёме пара, кг/с			жидкости, кг/с		_Ggen	0.22278363	
				_Gvol	0.00020171466		

#### Рисунок 3.3.6 Расходы бака

Примечание: представленные в данном подразделе рисунки и пояснения могут отличаться от получаемых у вас результатов в связи с обновлениями кода HS, выпущенными в течение 2021 года.



Рисунок 3.3.7 Параметры входного потока теплоносителя на *i*-s диаграмме

Итого, мы получили модель конденсатора, которая «работает» на номинальных параметрах, однако ей требуется около 10–15 секунд, чтобы выйти на них.

Отладку давления в конденсаторе, чтобы оно равнялось точно 0.051 кгс/см<sup>2</sup>, сделаем позже, когда проинтегрируем эту модель с моделью турбины.

#### 3.3.3 Стационарное состояние модели конденсатора

Модель конденсатора, как бы мы ни старались сейчас, все равно не может быть доведена до идеального состояния – из-за невозможности точно задать начальное состояние, совпадающее с равновесным, на которое выходит модель. И из-за отсутствия регулирования уровня в баке – несмотря на то что уровень существенно никуда не сдвигается, но при появлении в модели насосов это уже будет не так... Поэтому сейчас важно отладить модель, чтобы она в принципе осуществляла конденсацию требуемого расхода пара с заданными параметрами и не сильно при этом отклонялась от номинальных и начальных параметров.

Есть еще одна особенность данной схемы – давление в этой системе «держит» именно модель бака и впрямую задать его мы не можем: модель бака выходит на то давление, которое получается в результате расчета. Обратите внимание, что в двух гидравлических контурах данной системы (каждый канал – это как бы свой контур) нет граничного условия типа «давление», что, вообще говоря, нехорошо. В модели охлаждающей воды мы сделали такие граничные условия, в модели проточной части тоже, а в подводе и отводе среды из бака – нет. Граничными условиями по давлению для канала подвода пара и для канала отвода конденсатора являются узлы самого бака! Это принципиальное отличие данной автономной модели от модели проточной части турбины. Кроме того, когда мы проинтегрируем модель турбины и модель конденсатора, то для проточной части и давлений в ее узлах определяющим будет именно давление в конденсаторе (при стабильной подаче свежего пара, конечно, – если будете менять температуру или расход пара на входе, то распределение давлений тоже «поплывет»).

Давление в пароводяном баке определяется температурой, при которой находится среда в этом баке, т. к. это пароводяной компенсатор давления, и, вообще говоря, среда в нем всегда находится как бы на линии насыщения, с небольшими отклонениями от нее.

Настройку этого равновесного давления можно осуществлять минимум двумя способами. Первое – менять температуру охлаждающей воды. Второе – задавать другой поправочный множитель для коэффициента теплоотдачи в трубных пучках в баке. Оба способа изменяют тепловой поток, отводимый из бака. Контур охлаждающей воды как бы стремится все время охладить бак до своей 10-градусной температуры, что снижает давление в баке, но поступающий входной расход горячего пара (или пароводяной смеси) подогревает бак и увеличивает давление в нем. Баланс этих двух процессов и выражается в итоговом давлении, которое устанавливается в модели конденсатора.

Поставьте конечное время расчета в модели, скажем, 10 000 секунд, чтобы расчет рано не остановился, и запустите модель на расчет. Через некоторое время модель выйдет на стационар, давление в конденсаторе примет значение, например, 4.966 кПа, как показано у нас на рис. 3.3.2, и после этого задайте температуру охлаждающей воды – через свойства субмодели конденсатора, не 10.1 °C, как там стоит, а 10.2 °C. Вы увидите небольшой рост давления. Задайте 10.3 °C – еще некоторый рост. На рис. 3.3.8 приведен пример таких действий – на 50-й секунде и на 70-й секунде мы осуществили увеличение температуры входящей в систему охлаждающей воды.



Рисунок 3.3.8 Давление в конденсаторе при изменении температуры охлаждающей воды

Таким образом, можно настроить или «подогнать» равновесное состояние модели к требуемому давлению пара. Мы будем возвращаться к этому способу далее, при объединении моделей.
Если вы оставите считать модель на неограниченное время, например на час модельного времени, то увидите, что уровень в конденсаторе постепенно снижается, но это будет величина на уровне 1 мм в 10–60 секунд, и в общем это уровень погрешности численного расчета. А через время уровень так и вообще может выйти на постоянную величину. Таким образом, стабильное равновесное состояние конденсатора достигнуто – он конденсирует номинальный расход пара с заданными параметрами, в нем держится номинальное давление, а уровень среды стабилен.

### 3.4 Объединение конденсатора и модели проточной части

Давайте осуществим объединение отлаженной модели конденсатора с моделью проточной части турбины. Если вы набирали их рядом, то это не составит никакого труда – надо удалить граничный узел в проточной части, удалить подпитку (подающую пар) в модели конденсатора и соединить последний канал проточной части с внутренним узлом, где была подпитка, см. рис. 3.4.1 и 3.4.2.



Рисунок 3.4.1 Объединение конденсатора и проточной части



Рисунок 3.4.2 После объединения

По рис. 3.4.1 видно, что мы отлаживали модель конденсатора на давление 0.05, и такое же было задано в граничном узле проточной части, и, строго говоря, нам надо было бы удалить еще и внутренний узел и канал подвода пара

в модели конденсатора. Но мы затратили некоторое время на их «доводку» и параметризацию – пусть они лучше останутся в модели. Тем более что между турбиной и конденсатором, скорее всего, есть еще врезки по пару (какой-нибудь байпас или пар на ДУУ), или в будущем мы захотим смоделировать здесь течь теплоносителя, как возможное внешнее воздействие на модель. Этот узел и канал внесут сейчас некоторое сопротивление к потоку пароводяной смеси, но не существенное и сильно не помешают.

После объединения и запуска на расчет система должна «автоматически» с начальных параметров теплоносителя прийти к равновесному состоянию, аналогичному рис. 3.4.2. Видно, что давление на выходе из ПТУ поднялось немного выше, чем 0.05, – но, скорее всего, это так и должно быть, потому что по исходным данным давление 0.051 кгс/см<sup>2</sup> должно быть в конденсаторе, значит, на выходе из турбины оно будет несколько выше.

На этом объединение конденсатора и модели проточной части завершено. Оно получилось таким быстрым из-за корректно отлаженных по отдельности моделей. Если бы этого мы не сделали, то объединение моделей привело бы к появлению большого количества несогласованных колебаний, которые не факт, что привели бы систему к равновесию (а тем более к номинальной точке).

В сводной отладочной таблице, которую мы подготавливали для проточной части, у вас, скорее всего, немного «съехало» давление в конденсаторе, потому что теперь в узле, который мы отлаживали ранее на 0.05 кгс/см<sup>2</sup>, давление будет равно 0.052 кгс/см<sup>2</sup>, что является как бы 4%-ным отклонением. Но здесь очень маленькая база для вычисления отклонения. Кроме того, имеет смысл скорректировать скрипт и вывести там реальное давление в баке конденсатора, а не в узле перед ним. После корректировки, в которой **Node\_6** надо заменить на **КП3200.SteamComp**, соответствующие строки скрипта (остальные строки не приводим, они не изменяются) будут выглядеть так:

```
Text10.Values = KΠ3200.SteamComp._p/98066.5; Text10.Text= " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text15.Values = (KΠ3200.SteamComp._p-P_ou)/98066.5; Text15.Text = " κrc/cm<sup>2</sup>";
Text20.Values = (KΠ3200.SteamComp._p-P_ou)/P_ou * 100; Text20.Text = " %";
```

После чего сводная таблица у вас должна быть вновь похожа на рис. 2.9.5.

Отметим, что из-за отсутствия в модели теплоносителя кода HS неконденсирующихся газов мы не можем реализовать модель блока эжекторов и учесть более верно процессы набора вакуума в конденсаторе. В данной модели конденсатор (в этом смысле) является идеальным – герметичным баком, в котором нет подсосов и отвода лишних газов, ухудшающих процесс конденсации пара.



Приступим к созданию трех моделей для ПНД-1, ПВД-2 и ПВД-3. Выполним их так же, как модель конденсатора, в виде субмодели, начав с ПНД-1. Затем, используя эту субмодель, сделаем подогреватели высокого давления, просто задав другие числа в свойствах субмодели, поскольку процессы в подогревателях будут принципиально похожи, и топология расчетной схемы будет оставаться одной и той же. Таким образом, мы подготовим одну типовую гидравлическую подпрограмму и воспользуемся ей несколько раз.

Примечание: дальнейшее повествование будем продолжать также в пошаговом режиме, но без подробного указания названия каждого свойства каждого блока, предполагая, что читатель уже освоился с интерфейсом SimInTech и основными блоками теплогидравлики НЅ. Если будет написано: задайте диаметр у канала 0.1 м, значит, надо зайти в блок канала и задать там свойство Гидравлический диаметр, м равным Self.N#0.1. И еще одна ремарка: количество задаваемых свойств очень велико, и трудно при подготовке описания 100%-но верно указать последовательность действий и абсолютно все изменения в модели. Поэтому в получаемой вами модели и результатах ее расчета, скорее всего, возникнут разногласия с результатами, приведенными в данном руководстве. Целью дальнейших подразделов методики является объяснение в первую очередь на качественном уровне тех подходов и приемов работы, которые ведут к достижению цели. Если у вас получается другой результат – это вполне вероятно, - но ваш результат не должен качественно отличаться от приводимого в методике. Да и количественно не должно быть сильного расхождения (более 2–5 %). Если вы получаете принципиально иной результат, следует искать причину и ее устранить. Кроме того, вы можете подсмотреть в уже готовой модели, прилагаемой к методике, какие там заданы свойства у блоков и какой написан скрипт или заданы характеристики элементов.

## 4.1 Исходные данные

Исходные данные для создания моделей подогревателей довольно скудные, но достаточные для моделирования. По тепловой схеме есть диаметры трубопроводов подвода и отвода пара/конденсата и охлаждающей (подогревающейся) воды. В технических условиях на турбину приведены параметры греющего пара, площади теплообмена в подогревателях, расходы пара и конденсата, температура конденсата на входе и выходе подогревателя. И это практически все имеющиеся данные для создания модели. Ни диаметра трубочек, ни расположения их внутри бака подогревателя, ни высотных отметок, ни давления внутри самих подогревателей нет. Поэтому недостающие данные придется задать произвольно, но таким образом, чтобы они согласовывались с имеющимися в наличии данными.

Приведем известные данные в табличной форме, см. табл. 4.1.1, сразу для всех трех подогревателей. В этом разделе будет использована только первая колонка, две другие пригодятся в дальнейшем.

	ПНД-1	ПВД-2	ПВД-3
Тип подогревателя	ПН-100	ПВ-280-1	ПВ-280
Поверхность нагрева, м <sup>2</sup>	100	280	280
Абсолютное давление греющего пара, кгс/см <sup>2</sup>	0.96	3.6	9.2
Расход греющего пара, т/ч (для ПНД-1 это расход пара из III отбора, для ПВД-2 – часть расхода из II отбора для ПВД-3 – расход из I отбора)	10	13	18.4
Условный диаметр паропровода, м (по тепловой схеме диаметр меняется по пути от турбины к подо- гревателям)	0.35-0.4	0.3-0.25	0.15-0.25
Расход питательной воды (подогревающегося конденсата), т/ч	129	235	235
Гидравлическое сопротивление по питательной воде, кгс/см <sup>2</sup>	0.75	1.5	1.5
Температура конденсата (питательной воды) до подогревателя и после подогревателя, °С	37 80	104 130	130 170
Условный диаметр трубопровода питательной воды, м	0.15	0.2	0.2

Таблица 4.1.1 Параметры подогревателей

Из таблицы видно, что расход греющего пара на ПНД-1 и ПВД-3 идентичен расходам отборов пара из III и I отбора соответственно – то есть весь пар из этих отборов должен идти в подогреватели. Со II (теплофикационным) отбором сложнее – из него только часть пара должна уходить в ПВД-2, а остальная часть пара идет на теплофикационные нужны (бойлеры и/или другие потребители). Поэтому этот поток пара придется разделить минимум на две ветви, сохранив суммарно нужный расход. Давления греющего пара совпадают с давлениями отборов.

С расходом питательной воды немного сложнее – указан расход, на **4 т/ч** больший, чем наш расход пара и отвод питательной воды через конденсатор. Это, скорее всего, из-за какого-то еще дополнительного расхода в схеме турбины, о котором нам неизвестно – мы знаем только о ДУУ, через который в конденсатор должна приходить еще 1 т/ч пара (у нас в модели не смоделировано). Возможно, есть еще конденсат от блока эжекторов или от другой (технологической) конденсационной установки. Либо ПНД-1 в номинальном режиме работы греет немного меньший расход, чем указано в его паспортных данных. В любом случае, нам надо соблюдать баланс теплоносителя в модели, и наш расход через ПНД-1 будет равен пока что 125 т/ч. Его и будем задавать, имея

в виду сниженный расход воды – значит, она должна немного сильнее подогреться, и немного меньше будет перепад давления на трубчатке.

Давайте некоторые из этих параметров зададим как глобальные константы. Будем обозначать индексом «p» константы, относящиеся к пару или паропроводу, а индексом «v» – к питательной воде (конденсату). Наберите следующий скрипт в основном скрипте проекта, в продолжение тех величин, которые мы задавали ранее для проточной части и конденсатора:

```
// расход греющего пара на ПНД-1
const Gp pnd1 = G o3;
const Gp pvd2 = 13.0/3.6; // расход греющего пара на ПВД-2, кг/с
const Gp pvd3 = G o1;
                          // расход греющего пара на ПВД-3
const Gv_pnd1 = (129.0-4.0)/3.6;//расход пит.воды через ПНД-1, равный G_ou
const Gv pvd2 = 235.0/3.6;
                                //расход пит.воды через ПВД-2
const Gv pvd3 = Gv pvd2;
                                //расход пит.воды через ПВД-3
const Dp pnd1 = 0.4;
                          //Ду паропровода
const Dp_pvd2 = 0.25;
const Dp_pvd3 = 0.25;
const Dv pnd1 = 0.15;
                          //Ду трубопровода пит.воды
const Dv pvd2 = 0.2;
const Dv_pvd3 = 0.2;
```

Для трубопроводов отвода конденсата из ПНД и ПВД диаметры, согласно тепловой схеме, задаем следующими (английской буквой «с» обозначим конденсат):

```
const Dc_pnd1 = 0.080; //Ду отвода конденсата
const Dc_pvd2 = 0.150;
const Dc pvd3 = 0.100;
```

На этом пока общую параметризацию завершим, возможно, дальше нам придется еще какие-то исходные данные задать как глобальные константы, и перейдем к модели непосредственно ПНД-1.

### 4.2 Создание подпрограммы

Топология подпрограммы подогревателя будет проще, чем у конденсатора, но принципиально той же – пароводяной бак, 1 канал с многослойной цилиндрической стенкой, соединенный тепловой линией связи с баком.

Разместите на схеме блок типа **HS** – **Маска теплообменника** из вкладки **Маски**, задайте имя блоку ПНД1, тип подписи укажите **Имя**, имя класса блока сделайте равным, например, **HS** – **Подогреватель** и выберите тип маски 3-й, как показано на рис. 4.2.1. При этом изображение блока изменится.

	🦃 Свойства : ПНД1			
пнд1	Свойства Общие Ви	зуальные сло	и	
	Название	Имя	Формула	Значение
	Тип изображения	im_type		Тип З

Рисунок 4.2.1 Маска-субмодель, на основе которой создаем модель ПНД-1

Пока что это не расчетный блок, но субмодель, внутри которой и на базе которой можно сделать новый расчетный блок. Размер блока на схеме лучше увеличить.

Перейдите внутрь субмодели и по аналогии с тем, как вы делали модель конденсатора, разместите там требуемые расчетные блоки и еще 2 порта входа и 2 порта выхода. Задайте верное расположение портов и соедините их линиями связи, как показано на рис. 4.2.2. Ход воды и расположение канала сделайте справа налево. Для канала граничные узлы или подпитки внутри субмодели задавать не требуется – соедините канал непосредственно с портами входавыхода субмодели. Тогда снаружи блок субмодели будет выглядеть как субмодель с 4 портами. После верного расположения портов снаружи блок будет иметь вид, как представлено на рис. 4.2.3.



Рисунок 4.2.2 Топология модели подогревателя



Рисунок 4.2.3 Вид блока снаружи

Задайте имя блока канала как **Tube**. Имя бака задайте **KO** (от компенсатор объема). Это потребуется далее для написания скрипта.

На этом задание топологии завершено – можно переходить к добавлению свойств и параметров блока.

#### 4.3 Параметризация и настройка номинального состояния

#### 4.3.1 Свойства и параметры модели подогревателя

Задайте (через пункт главного меню **Изменить блок**) свойства, как показано на рис. 4.3.1. Параметры задайте сразу там же, как показано на рис. 4.3.2. Способ расчета всех свойств – **Константа**. Способ расчета всех параметров – **Переменная** (хотя можно оставить и константа, не принципиально).

В перечне свойств вы можете видеть несколько другие свойства, в отличие от модели конденсатора. Связано это с тем, что бак здесь будет вертикальным цилиндром, поверхность нагрева **F** мы задаем по исходным данным, а т. к. она может быть вычислена по формуле  $F = \pi \cdot d \cdot L \cdot n$ , то в колонке **Формула** для длины *L* следует задать длину как **Self.F/(pi\*Self.d\*self.n)**. Ключевое слово Self указывает на текущий блок, т. е. на саму субмодель. Можно было бы сделать и по-другому – задаться длиной, площадью поверхности и количеством и получить диаметр трубочек. Можно задать большее или меньшее количество трубочек, и будет пересчитана их длина.

Вы можете видеть по рис. 4.3.1, что мы задались количеством трубочек = 200, внешним диаметром 27 мм, толщиной 0.2 мм и получили их длину L = 5.81 м (при этой длине поверхность теплообмена равна примерно 100 м<sup>2</sup>). Это некоторый произвол, но он позволяет получить нужные расчетные параметры от модели. Объем бака задан как 41 м<sup>3</sup>, внутренний диаметр 2.5 м, что дает высоту цилиндра примерно 8.3 м. Следует иметь в виду высоту бака, чтобы потом понимать, на какой относительной высоте будет уровень воды в баке.

Ф Редактирование блока: ПНД1								
Свойства	Общие Параметры Порты Расчёт							
Nº	Название	Имя	Тип данных	Формула	Значение			
1	Количество элементов	Count	Целое		10			
2	Объем бака, м3	Vb	Вещественное	41	41			
3	Начальный объем воды, м3	V0	Вещественное	10	10			
4	Внутренний диаметр бака, м	Db	Вещественное	2.5	2.5			
5	Длина трубчатки, м	L	Вещественное	Self.F/(pi*Self.d*self.n)	5.8085746			
6	Внешний диаметр трубки, м	d	Вещественное	0.0274	0.0274			
7	Толщина стенки трубки, м	ds	Вещественное	0.0002	0.0002			
8	Количество охлаждающих трубок	n	Целое	200	200			
9	Материал трубки	Material	Имя файла б		CTX18H10T			
10	Высотная отметка низа бака, м	Zk	Вещественное	-5	-5			
11	Номинальное давление, Па	Pnom	Вещественное	P_03	94143.84			
12	Поверхность нагрева, м^2	F	Вещественное	100	100			
13	Тип изображения	im_type	Перечисление		Тип 3			

Рисунок 4.3.1 Свойства подогревателя

Параметры блока (рис. 4.3.2) повторяют параметры конденсатора (убраны только неиспользуемые, а слово «конденсатор» заменено на «бак» в названиях параметров).

Ф Редактирование блока: ПНД1						
Свойства	Общие Параметры Порты Расчёт					
N♀	Название	Имя	Тип данных			
1	Давление в баке, ата	_Ps	Вещественное			
2	Температура в баке, С	_Ts	Вещественное			
3	Энтальпия конденсата, ккал/кг	_Hs	Вещественное			
4	Расход воды через трубчатку, т/ч	_G	Вещественное			
5	Гидравлическое сопротивление в трубчатке, кПа	_dPtr	Вещественное			
6	Скорость охлаждающей воды в трубках, м/с	_w	Вещественное			
7	Температура охлаждающей воды на входе, С	_Tin	Вещественное			
8	Температура охлаждающей воды на выходе, С	_Tou	Вещественное			
9	Температурный напор на выходе из конденсатора, С	_dTou	Вещественное			
10	Общая тепловая нагрузка, МВт	_Q	Вещественное			
11	Удельная тепловая нагрузка, кВт/м2	_Qf	Вещественное			
12	Уровень воды, м	_Level	Вещественное			

Высотная отметка низа бака нам пригодится, но точно она неизвестна – в имеющихся исходных данных она не приводится, задаем ее – 5 м пока что.

## 4.3.2 Задание свойств блоков на основе свойств субмодели

В модели подогревателя мы не будем использовать скрипт для задания свойств блоков. Воспользуемся колонкой **Формула** и зададим в ней то, что следует.

Для бака задайте следующие свойства:

- 1) Тип геометрии вертикальный цилиндр;
- 2) Объем = Submodel.Vb;
- 3) Высотная отметка = Submodel.Zk;
- 4) Внутренний диаметр = Submodel.Db;
- 5) Начальное давление = Submodel.Pnom;
- 6) Начальная объемная доля 1-й области = Submodel.V0/Self.V;
- Нижняя отметка трубного пучка = Self.Nheatport\_tube\_bundle#3;
- 8) Верхняя отметка трубного пучка (относительно дна бака) = Self. Nheatport\_tube\_bundle#Self.V/(pi\*Self.Din^2/4);
- 9) Определяющий размер трубного пучка (для теплообмена) = Self. Nheatport\_tube\_bundle#Submodel.d;
- 10) Тип пучка = Self.Nheatport\_tube\_bundle#1;
- 11) Постоянная времени сглаживания коэффициента теплоотдачи = 1 секунда;
- 12) Коэффициент теплоотдачи на зеркале = 1000.

Остальные свойства оставьте заданными по умолчанию. Задание свойств очевидно, только для трубного пучка мы выбрали (произвольно) расположение таким образом, чтобы в основном он был в паровой области бака, выше уровня конденсата.

Для верхнего узла бака задайте:

- 1) Начальное давление = parent.P0;
- 2) Начальная температура = steamps(self.P0,3);
- 3) Определяющее свойство = Энтальпия;
- 4) Объем узла = 0.1;
- 5) Диаметр отверстия = Dp\_pnd1;
- 6) Уровень относительно дна бака = Submodel.Vb/(pi\*Submodel.Db^2/4);
- 7) Тип патрубка = Спринклер.

Ключевое слово **Parent** является ссылкой на родительский блок, то есть на бак. Уровень относительно дна для этого узла ставим максимально возможный, равный высоте бака.

Для нижнего узла бака задайте:

- 1) Начальное давление = parent.P0;
- 2) Начальная температура = waterps(self.P0,3);
- 3) Определяющее свойство = Энтальпия;
- 4) Объем узла = 0.1;
- 5) Диаметр отверстия = Dc\_pnd1;
- 6) Уровень относительно дна бака = 0;
- 7) Тип патрубка = Обычный.

Функции waterps и steamps возвращают параметры воды и водяного пара на линии насыщения, в нашем случае мы выбрали энтальпию, чтобы корректно задать пар и воду.

Для блока цилиндрической стенки задайте следующие свойства:

- 1) Количество элементов по длине = Submodel.Count;
- 2) Наружный радиус = Submodel.d/2;
- 3) Толщина стенки = Submodel.ds;
- 4) Кол-во стержней = Submodel.n;
- 5) Длины элементов разбиения = Self.Nh#Submodel.L/Self.Nh;
- 6) Материал = Submodel.Material.

Остальное можно оставить заданным по умолчанию, в т. ч. и начальную температуру элементов стенки – брать из тепловых связей с теплоносителем.

Для канала задайте свойства по рис. 4.3.3. Приведем их также и в тексте (на рисунке может быть мелко и не все видно):

- 1) Количество расчетных элементов = Submodel.Count;
- 2) Диаметр = Self.N#(Submodel.d-2\*Submodel.ds);
- 3) Проходное сечение = pi\*Self.Dg^2/4\*Submodel.n;
- 4) Длины элементов = Self.N#Submodel.L/Self.N;
- 5) Приращение высоты = Self.N#Submodel.Vb/(pi\*Submodel.Db^2/4)/Self.N;
- 6) Прямое местное сопротивление = (Self.N+1)#40/(Self.N+1);
- 7) Обратное местное сопротивление= (Self.N+1)#40/(Self.N+1);
- Коэффициент интенсификации теплообмена = Self.N#1.0 (этим свойством еще будем настраивать номинальное состояние);
- 9) Коэффициент интенсификации сопротивления = (Self.N+1)#1.0;
- 10) Шероховатость = Self.N#1e-5 (по умолчанию);
- 11) Начальное давление = Self.N#Pv\_pnd1;
- 12) Начальная температура = Self.N#Tv\_pnd1;
- 13) Начальный расход в канале = Gv\_pnd1.

Видно, что мы смогли все свойства всех блоков задать корректно, пользуясь свойствами субмодели и не прибегая к скрипту, как это было в модели конденсатора. Это другой, альтернативный способ параметризации субмоделей.

Название	Имя	Формула
Количество тепловых связей	Nheatport	
···· Количество расчётных элементов	N	Submodel.Count
— Гидравлический диаметр, м	Dg	Self.N#(Submodel.d-2*Submodel.ds)
Проходное сечение, м²	S	pi*Self.Dg^2/4*Submodel.n
Длины элементов, м	L	Self.N#Submodel.L/Self.N
Приращение высоты, м	Dz	Self.N#Submodel.Vb/(pi*Submodel.Db^2/4)/Self.N
Прямое местное сопротивление	KsiDir	(Self.N+1)#40/(Self.N+1)
Обратное местное сопротивление	KsiRev	(Self.N+1)#40/(Self.N+1)
Коэффициент интенсификации теплообмена	kAlfa	Self.N#1.0
Коэффициент интенсификации сопротивления	kKsi	(Self.N+1)#1.0
Абсолютная шероховатость, м	Sh	Self.N#1e-5
Объёмное энерговыделение, Вт/м³	qv	Self.N#0.0
- Расчет критического течения	is_Kr	
Расчет потерь на ускорение	is_Conv	
Тип геометрии	geom_type	
Коэффициент гидравлического сопротивления трения	ksiTr	Self.N#0.0
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К)	Alfa	Self.N#0.0
🖃 Начальное состояние		
Задать нач. распределение параметров?	SetInitDistrib	
— Начальное давление, Па	P0	Self.N#Pv_pnd1
— Начальная температура, °C	то	Self.N#Tv_pnd1
Определяющее свойство, по которому вычислять	DefineParam	
Начальный расход в канале, кг/с	G0	Gv_pnd1
🕮 Экспериментальные		

Рисунок 4.3.3 Свойства канала внутри модели подогревателя

Чтобы верно интерпретировались свойства начальных давлений и температур, добавьте в основной скрипт проекта следующие строки (начальные давления задаем более-менее произвольно, температуры в исходных данных есть):

```
const Pv_pnd1 = 10 * 98066.5;  //давление конденсата
const Tv_pnd1 = 37;
const Pv_pvd2 = 50 * 98066.5;  //давление пит.воды
const Tv_pvd2 = 104;
const Pv_pvd3 = 50 * 98066.5;  //давление пит.воды
const Tv_pvd3 = 130;
```

#### 4.3.3 Параметры подогревателя

Для расчета параметров подогревателя добавьте следующий скрипт в разрабатываемую субмодель (<u>не</u> в основной скрипт проекта!):

```
G
      = Sum(Tube._g)/(Submodel.Count+1)*3.6;
      = Sum(Tube. w)/(Submodel.Count+1);
W
_Tin
      = Tube. Tin;
Tou
      = Tube. Tou;
dPtr = Tube. dP/1000;
Q
      = Tube. qfsum/1e6;
      = submodel. Q/submodel.F*1000; //ĸBt/m2
_Qf
dTou = KO. t v2-Tube. Tou;
_Level = K0._l;
Ps
      = KO. p;
      = KO. t f1;
Ts
      = K0. h f1;
Hs
```

Данный скрипт не требует комментариев, он очевиден.

#### 4.3.4 Добавление каналов по пару и питательной воде

Обратите внимание, мы сделали модель таким образом, что по пару и конденсату порты входа-выхода подключены к узлам бака, то есть снаружи по этим портам можно подключать только каналы. А по линии воды внутри субмодели стоит канал. К каналу в коде HS можно подключать как узлы, так и другие каналы – в последнем случае они объединяются (склеиваются) в одно ребро. Поэтому снаружи данной модели будет корректно, если мы разместим еще 4 канала у каждого порта входа-выхода и с концов этих каналов поставим два граничных узла, два внутренних узла и подпитку, которая будет принудительно создавать расход нужной величины, см. рис. 4.3.4. На рисунке представлено состояние модели, когда блоки проставлены из библиотеки, а из модели проточной части скопированы блоки, отображающие параметры, – они показывают сейчас значения по умолчанию.



Рисунок 4.3.4 Внешний вид автономной модели подогревателя

В отличие от конденсатора и его отладки, попробуем по греющему пару применить здесь другой способ задания греющего пара – через граничный узел. Расход греющего пара при этом уже не будет строго определенным, и надо будет отладить его значение. Фиксированным будет только расход отбора конденсата из бака.

Для проставленных каналов, граничных узлов и подпиток задание начальных условий и диаметров очевидно.

Для подвода пара и отвода конденсата надо поставить все аналогично верхнему и нижнему узлам в баке:

- 1) давление **P\_03**;
- температура **T\_o3**, но лучше задать через энтальпию как steamps(**P\_o3**,3) и waterps(**P\_o3**,3);
- расход Gp\_pnd1 ставим его в канале пара, отвода конденсата и в подпитке с отрицательным знаком;

- 4) **Dp\_pnd1** гидравлический диаметр по пару;
- 5) **Dc\_pnd1** диаметр по трубопроводу отвода конденсата.

У нижнего узла (где отводим конденсат подпиткой) задайте еще высотную отметку –10 м, чтобы он был ниже бака.

Для каналов по подогревающейся воде (конденсату конденсатора) задайте одинаковые свойства теплоносителя, без учета подогрева – то есть в начальный момент времени все контрольные объемы этих каналов будут иметь теплоноситель холодный, с параметрами такими же, как в граничном узле:

- 1) давление **Pv\_pnd1**;
- 2) температура Tv\_pnd1;
- 3) расход Gv\_pnd1 (в подпитке со знаком минус);
- 4) диаметр в узлах и каналах **Dv\_pnd1**.

После корректной простановки всех-всех свойств выведите на график расход пара и отвода конденсата, а также уровень в подогревателе. Запустите модель на первый тестовый расчет и оцените результат. У автора настоящей методики сначала получился режим, при котором расход пара увеличивается до значений порядка 100–400 т/ч, уровень в баке растет, что говорит о некорректном процессе и задании данных. Также вода подогревается всего до 50 °C, а должна до 88. Значит, что-то в модели не так и она требует корректировки (графики см. на рис. 4.3.5 и 4.3.6). График уровня в ПНД-1 мы вывели специально на график уровня в конденсаторе – в дальнейшем, при объединении моделей, это будет одним из инструментов, показывающих, все ли в модели верно, не уходит ли в каком-то из баков уровень. Сейчас видно, что уходит.



Рисунок 4.3.5 Уровни воды в баках



Рисунок 4.3.6 Расход греющего пара и конденсата

Поисследовав модель, мы поняли, что в граничном узле отбора пара заданы его параметры через температуру, и они соответствуют пароводяной смеси, а не пару – отсюда значительно больший расход (т. к. удельный объем пароводяной смеси ниже, чем у пара) и недостаточный подогрев воды в ПНД. После задания параметров пара через энтальпию **steamps**(**P\_03**,3) и следующей итерации расчета все встало на свои места, результат представлен на рис. 4.3.7, 4.3.8 и 4.3.9.

По рисункам видно, что расход пара теперь установился на близком к номинальному значении, но он теперь недостаточен. Вода подогревается до 69 °С, и все свидетельствует о том, что процесс конденсации (теплообмена) идет на недостаточном уровне. Скорее всего, рассчитываемый в коде коэффициент теплопередачи для трубчатого теплообменника в данном случае недостаточен, и его надо скорректировать...



Рисунок 4.3.7



Рисунок 4.3.8



Рисунок 4.3.9

#### 4.3.5 Отладка номинального состояния

Для достижения номинального состояния попробуйте в модели бака увеличить коэффициент интенсификации теплообмена (свойство Поправочные множители для коэффициентов теплоотдачи для пучков), например, до величины 1.2.

При этом после запуска на расчет вы увидите, что вода подогреется на пару градусов выше, а греющего пара подогреватель будет «забирать» из граничного условия немного больше.

Попробуйте задать этому коэффициенту значения сначала 1.5, затем 1.8 и 2.0. Вы будете приближаться к номинальной точке подогревателя и при каком-то значении этого поправочного множителя достигнете номинала. У автора настоящей методики это произошло при значении 3.9. Но что говорит такое высокое значение «поправочного множителя»? Это говорит о том, что в геометрии подогревателя какие-то вещи заданы принципиально неверными. Давайте вернемся к заданию свойств для ПНД-1 и проанализируем. На-

пример, заданный диаметр трубочек 0.0274 м = 27.4 мм довольно велик. Попробуйте его задать равным 0.0164 м, тогда пересчитается длина трубочек (она станет равной почти 10 м) для достижения нужной поверхности теплообмена, и в целом это должно привести к интенсификации теплопередачи – возможно, воде не хватало «длины» для подогрева, а не площади или коэффициента теплопередачи.

Действительно, при диаметре трубочек **0.0164 м** коэффициент интенсификации теплообмена достаточно задать равным всего **1.08**, для попадания в «номинальную» точку, при остальных свойствах всех блоков, заданных, как было указано выше. Итоговый результат приведен на рис. 4.3.10.



Рисунок 4.3.10 Итоговое состояние модели ПНД-1

Обратите внимание еще на два аспекта – перепад давления на трубчатке у нас получился равным 71 кПа, а по исходным данным табл. 4.1.1 он должен быть равен 0.75 кгс/см<sup>2</sup>. Такое «попадание» получилось благодаря тому, что в свойствах канала внутри субмодели мы задали коэффициенты местного сопротивления равными (Self.N+1)#40/(Self.N+1) – это значение тоже подо-

брано для соответствия исходным данным. Второй аспект – сейчас мы задали параметры греющего пара на линии насыщения, то есть подогреватель конденсирует насыщенный пар (пароводяную смесь со 100%-ной массовой концентрацией пара). Однако в модели проточной части параметры теплоносителя в III отборе другие – там пароводяная смесь с немного сниженными параметрами, с энтальпией 2448 кДж/кг, а не 2672.

Строго говоря, в модели ПНД-1 надо бы сделать еще одну итерацию, задав в граничном узле не насыщенный пар, а пар, который реально будет потом при объединении моделей. Можете это проделать самостоятельно сейчас или потом при объединении – коэффициент интенсификации придется еще раз подбирать, чтобы ПНД-1 работал стационарно – вода подогревалась на требуемую величину, уровень не «уплывал» от начального значения, и процесс конденсации шел с номинальным расходом.

В нашей модели, при задании энтальпии в граничном узле по пару равной 2 448 081 Дж/кг, пришлось снизить поправочный множитель до значения 0.85.

# 4.4 Подключение модели ПНД-1 к проточной части

После согласования модели ПНД-1 с параметрами пара в III отборе и отладки модели ПНД-1 на номинальный расход из III отбора ее довольно просто по пару подключить к модели проточной части. Давайте это проделаем. Контур с водой ПНД-1 пока что объединять не с чем – холодный конденсат в ПНД-1 должны подавать электроконденсатные насосы, которые мы еще не реализовали в модели.

В модели проточной части надо удалить подпитку на III отборе, а в модели ПНД-1 убрать граничный узел и подключить паропровод ПНД-1 к узлу под третьим отбором, см. результат на рис. 4.4.1. Примечание: прежде чем это делать, <u>выделите и скопируйте рядом на схеме всю модель ПНД-1 еще раз</u>, вместе с подпитками и граничными условиями – она нам потребуется для создания моделей ПВД.

По рисунку вы можете видеть (и в вашей модели должны получиться те же результаты!), что ПНД-1 сохраняет уровень конденсата около 2 м (на рис. 4.4.1 приведено состояние на 200-й секунде расчета), расход пара и сконденсированной фазы на входе и выходе в него составляет 9.99–10.00 т/ч, а давление пара в III отборе осталось практически неизменным на уровне 0.96–0.962 кгс/см<sup>2</sup>.

Подогрев воды (конденсата) несколько уменьшился по сравнению с исходными данными – наша модель подогревает воду теперь до 76 °С, а не до 80, что в общем-то плохо, т. к. дальше это приведет к некоторым проблемам. Но, по всей видимости, расход греющей пароводяной смеси с энтальпией ниже, чем энтальпия пара на линии насыщения при давлении III отбора, это не позволяет подогреть 125 т/ч воды с 37 до требуемых 80 °С. Либо в исходных данных есть ошибка (могли посчитать ПНД-1 как раз для насыщенного пара, для другого режима работы ПТУ), либо в нашей модели проточной части что-то не так – надо перепроверять. Но 4 °С – не сильное отличие от того, что требуется получить, и не помешает нам двигаться дальше.



Рисунок 4.4.1 Подключение ПНД-1 к проточной части



# 5.1 Исходные данные

Исходные данные для моделей ПВД-2 и ПВД-3 приведены в подразделе 4.1. Мы воспользуемся этими данными, а также глобальными константами, которые заводили при создании модели ПНД-1.

# 5.2 Создание подпрограммы

Подпрограмма для ПВД-2 и ПВД-3 будет идентична подпрограмме для ПНД-1. Это та же нодализационная схема как снаружи, так и внутри, нам только нужно будет изменить ее настроечные свойства и свойства блоков рядом с субмоделью.

Воспользуемся скопированной моделью ПНД-1, скопируйте ее еще раз рядом на схеме и задайте имена субмоделей как **ПВД2** и **ПВД3** соответственно, см. рис. 5.2.1.



Рисунок 5.2.1 Скопированная и переименованная модель ПНД-1



Рисунок 5.2.1 (окончание)

После этого вам надо пройтись по каждому блоку – по каждому каналу, каждому граничному и внутреннему узлу, по свойствам самих субмоделей – и задать верно все-все свойства, которые мы задавали для ПНД-1. Благодаря тому что глобальные константы заданы однотипно, вам во многих местах придется просто заменить pnd1 на pvd2 (или pvd3 для модели ПВД-3). Проделайте все самостоятельно, а ниже мы приведем только новые свойства, которые зададим не так, как в модели ПНД-1.

### 5.3 Задание верных свойств

Объемы баков и начальный объем воды давайте оставим прежним, 41 и 10 м<sup>3</sup>, потому что этих данных мы точно не знаем.

Внутренний диаметр баков поставьте 2 м, пусть баки будут немного повыше и поуже. Это не сильно принципиально.

Поверхности нагрева ставим в обеих моделях 280 м<sup>2</sup> в соответствии с исходными данными.

Внешний диаметр трубочек задайте 0.0604 и 0.0444 м у ПВД-2 и ПВД-3. Эти значения подобраны, чтобы процесс конденсации был близок к номинальному, при поправочном множителе для коэффициента теплоотдачи, близкому к единице. Количество трубочек = 235 и 320 штук соответственно. Эти значения были выбраны исходя из того, чтобы длина трубочек  $L \approx 6.3$  м получилась примерно равной той высоте бака, на которой они расположены – начиная от отметки 3 м до верха бака.

Материал – тот же, что у ПНД-1. На материал мы не обращаем большого внимания, потому что, во-первых, мы его не знаем точно, а во-вторых, при достаточно малой толщине стенки от материала трубочек мало что зависит. Но в принципе, при создании модели материалом и его свойствами тоже надо озаботиться.

Остальные свойства всех блоков оставьте пока заданными так же, как для ПНД-1, но скорректируйте диаметры и начальные свойства теплоносителя (давление, расход, начальная энтальпия или температура) под параметры теплоносителя для ПВД-2 и ПВД-3. Оставлять те же значения, которые были для ПНД-1, смысла не имеет – получится другой ответ.

После задания всех-всех свойств выведите на график, где представлен уровень в конденсаторе и уровень в ПНД-1, еще два уровня: в баках ПВД-2 и ПВД-3. Это потребуется для визуальной быстрой оценки, насколько расход откачки конденсата, заданный подпитками, отличается от расхода конденсирующейся пароводяной смеси. При разбалансе расходов уровень на графике будет уходить вверх или вниз, и график позволит быстро это увидеть.

Начальные давления в моделях ПВД задайте как **P\_o2** и **P\_o1** соответственно. Такие же давления надо проставить в каналах и узлах по пару и сливу конденсата.

В граничных узлах, моделирующих отборы пара, задайте давления и энтальпии как **P\_o2**, **2609320** и **P\_o1**, **2733876** соответственно. Задавать лучше те числа, которые в вашей модели получились в отборах проточной части в равновесном состоянии.

Местное сопротивление трубчатки у ПВД-2 задайте как (Self.N+1)#30/(Self. N+1), в отличие от (Self.N+1)#40/(Self.N+1) у ПНД-1 и ПВД-3.

Высотные отметки для баков и нижних узлов (узлов слива конденсата) пока оставляем теми же, как и для ПНД-1.

#### 5.4 Настройка номинального состояния

После задания всех свойств и первого пробного запуска на расчет график уровней в подогревателях получился (у автора методики), как представлено на рис. 5.4.1. Мы специально приводим в том числе и «неправильные» графики, чтобы показать разные способы отладки модели.

По рис. 5.4.1 видно, что если в конденсаторе и в ПНД-1 уровни, что называется, «стоят» и с точностью до миллиметров первые 200 секунд расчета практически никуда не уходят, то для ПВД-2 и ПВД-3 ситуация совершенно другая – уровень сконденсированной фазы довольно быстро уходит вниз, значит, откачка конденсата (заданная с номинальным расходом и верная) из баков происходит быстрее, чем подается и конденсируется греющий пар. Следовательно, интенсивность конденсации недостаточна.

Действительно, при копировании модели ПНД-1, которую мы отладили на пароводяную смесь из III отбора, автор забыл про поправочный множитель, который остался в значении 0.85. Вернув его в значение 1.0, можно ситуацию улучшить, но не слишком существенно.

Давайте зададим другие диаметры трубочек (все равно они нам неизвестны), что улучшит теплообмен. Возможно, по питательной воде конструктивно там сделано несколько ходов. Задайте для ПВД-2 диаметр трубочек 0.0344 м, а для ПВД-3 0.0264 м. Или можете самостоятельно прийти к аналогичным значениям, которые позволят «уравновесить» процесс конденсации с требуемым расходом. Результат по уровням для данных диаметров трубочек приведен на рис. 5.4.2. Сравните его с 5.4.1 и увидите уже существенное улучшение стационарного процесса для ПВД-2 и ПВД-3. Теперь ни о каком существенном уходе уровня речи не идет, хотя постепенно он все равно снижается. Оставшийся небаланс можно «свести» уже поправочным множителем для коэффициента теплоотдачи. В нашем случае достаточным оказалось значение 1.05 у этого множителя для обоих подогревателей высокого давления. Тогда «загиб» графиков уровня вниз у ПВД-2 и ПВД-3 практически исчез на рассматриваемых 200 секундах. Рисунок не приводим – он аналогичен 5.4.2, только еще «лучше».



Рисунок 5.4.1 Уровни в баках в «стационарном» состоянии



Рисунок 5.4.2 Скорректированный переходной процесс выхода на стационарное состояние

# 5.5 Объединение проточной части с моделями ПВД-2 и ПВД-3

## 5.5.1 Греющий пар

Объединение моделей очевидно и аналогично подключению ПНД-1, но есть один нюанс. У второго отбора надо не удалять подпитку с расходом **-G\_o2**, а задать там расход, немного меньший по абсолютной величине, на расход греющего пара для ПВД-2. В подпитке задайте расход: **-G\_o2+Gp\_pvd2**. У первого отбора, т. к. весь отбираемый пар идет на ПВД-3, подпитку следует полностью убрать из расчетной схемы, см. рис. 5.5.1. На рисунке представлен результат расчета после первых 200 секунд моделирования. Благодаря тщательной отладке отдельных моделей ПВД-2 и ПВД-3 они практически никак не повлияли на проточную часть, и параметры пара вдоль нее изменились нечувствительно (отладочная таблица показывает отклонения давлений на тех же уровнях, что и ранее).

Обратите внимание на подогрев питательной воды – для ПВД-2 он практически четко повторил исходные данные, для ПВД-3 снова некоторый недогрев, как и у ПНД-1, по сравнению с исходными данными. Также мы не очень верно задали местные гидравлические сопротивления по питательной воде – должны получить перепад на уровне 1.5 атмосферы (см. табл. 4.1.1), а получили 1.9 и 2.3 – разница вышла из-за разных значений Ksi, которые мы задали в предыдущем подразделе. Надо снизить Ksi у каналов по питательной воде. Задайте там по двадцатке, где стоит 40 и 30 (для каналов внутри субмоделей ПВД-2 и ПВД-3 поставьте местное сопротивление равным **(Self.N+1)#20/(Self.N+1)**). После этого получится перепад давления почти 155–158 кПа, что примерно соответствует требуемому перепаду по исходным данным.

По тепловой схеме ПТУ, питательная вода, подогретая в ПВД-2, должна далее поступать на подогрев в ПВД-3. В нашей схеме мы получили близкие параметры выходящей из ПВД-2 воды и входящей воды в ПВД-3, но все же не идентичные, см. рис. 5.5.2.



Рисунок 5.5.1 Объединение по пару проточной части ПТУ и подогревателей высокого давления



Рисунок 5.5.2 Параметры питательной воды между ПВД-2 и ПВД-3

Такое отличие приведет к некоторому (небольшому в данном случае, однако) смещению точки равновесия для ПВД-3 при объединении этих двух частей модели. Если бы оно было больше, то пришлось бы после этого объединения что-то «подкручивать» в теплообмене у ПВД-3.

# 5.5.2 Питательная вода

Уберите подпитку в модели ПВД-2 и граничный узел питательной воды в модели ПВД-3 и объедините эти две модели (сравните рис. 5.5.2 и рис. 5.5.4). Запустите схему вновь на расчет (на 200 секунд) и оцените полученное равновесное состояние. В нашем случае оно мало изменилось по сравнению с рис. 5.5.1. Результат по итоговой табличке представлен на рис. 5.5.3, по ситуации на расчетной схеме – рис. 5.5.4.

Заланное	Абс. давление пара перед турбиной	Абс. давление пара в I отборе	Абс. давление пара в камере регулируемого теплофикацион- ного (II) отбора	Абс. давление пара в III отборе	Давление после турбины
(номинальное)	35 кгс/см <sup>2</sup>	9.2 кгс/см <sup>2</sup>	3.64 кгс/см <sup>2</sup>	0.96 кгс/см <sup>2</sup>	0.05 кгс/см <sup>2</sup>
В модели	35.011 кгс/см <sup>2</sup>	9.2113 кгс/см <sup>2</sup>	3.6465 кгс/см <sup>2</sup>	0.96294 кгс/см <sup>2</sup>	0.050834 кгс/см <sup>2</sup>
Отклонения	0.0107 кгс/см <sup>2</sup>	0.011287 кгс/см <sup>2</sup>	0.0064924 кгс/см <sup>2</sup>	0.0029363 кгс/см <sup>2</sup>	0.00083373 кгс/см <sup>2</sup>
	0.03057 %	0.12268 %	0.17836 %	0.30586 %	1.6675 %

Рисунок 5.5.3 Давления в проточной части при подключении подогревателей

Из-за того, что вода в ПВД-3 стала поступать с несколько другими параметрами – чуть более горячая и с меньшим давлением, это немного повлияло на процесс конденсации там. Греющий пар на ПВД-3 поступает теперь с расходом на 0.2 т/ч меньше, чем ранее, и уровень в нем будет постепенно падать. Остальные параметры изменились несильно.

Если дать схеме посчитать более длительное время, можно увидеть, что этот небаланс в 0.2 т/ч даст снижение уровня в ПВД-3, см. рис. 5.5.5. Но это не очень сильное снижение уровня – если за час масса воды в ПВД-3 снизится всего на 200 кг, это несильно повлияет на модель в целом. Но надо иметь в виду, что такой небаланс есть, и без регулятора модель придет через некоторое время к опустошению ПВД-3, что даст какое-то скачкообразное изменение стационарного состояния в этот момент.



Рисунок 5.5.4 ПВД-2 и ПВД-3 после объединения по питательной воде



Рисунок 5.5.5 Уровни в ПВД-2 и ПВД-3 при расчете 2000 секунд

Что делать в модели дальше? Нам осталось не так много, чтобы «замкнуть» цикл – подготовить модель электроконденсатных насосов, питательных насосов и сливного насоса для ПНД-1 (он откачивает конденсат и подает его в деаэратор).



## 6.1 Исходные данные

Подогреватели воды промежуточного контура ПС-450 и пиковый подогреватель ПС-450П с точки зрения их модели похожи на модели подогревателей – они так же питаются паром (из I и II отбора), так же подогревают воду, поэтому в данной методике они пропущены – предоставляем читателю разработку этих моделей как самостоятельную работу.

Тем более что включение их в работу означает перевод ПТУ из спецификационного режима в другой (теплофикационный), что повлечет за собой перераспределение давлений и расходов по отборам пара. Это можно делать, но это уже другая работа – отладка модели в переходных режимах и в других стационарных состояниях. Мы занимаемся в данной методике спецификационным режимом, созданием необходимых сущностей в модели для моделирования пока что стационарного номинального состояния.

# 6.2 Недостающие элементы модели

Рассмотрим недостающие в модели детали и вернемся к конденсатору и ПНД-1. Сконденсированную фазу из конденсатора необходимо насосами подавать на подогрев в ПНД-1, откуда она будет подаваться в деаэратор.

Туда же (в деаэратор), согласно тепловой схеме, необходимо сливать и конденсат из самого ПНД-1. Но т. к. давление в ПНД-1 низкое (около 1 атмосферы), а деаэратор стоит на некоторой высоте, скорее всего выше, чем ПНД-1, то требуется еще сливной конденсатный насос для откачки конденсата из ПНД-1.

Конденсат из ПВД-3 будет подаваться сначала в ПВД-2 (для чего придется в модели ПВД-2 делать еще одну врезку в бак), и уже из ПВД-2 конденсат подается на деаэрацию.

Из деаэратора (в его головку надо будет подать немного пара из II отбора) блоком питательных насосов воду надо будет прокачивать через ПВД-2 и ПВД-3. Скорее всего, свести полностью балансы воды у нас не выйдет из-за расхода пара на теплофикацию, но мы это скомпенсируем в итоге граничными условиями и/или подпитками.

Итого, грубо говоря, нам остается сделать модели трех разных насосов: электроконденсатный насос (ЭКН), электроконденсатный насос сливной (ЭКНС)

и электропитательный насос (ЭПН), отладить их автономно, чтобы они выдавали требуемый расход воды при заданных ее параметрах на всасе, заданном Ду и необходимом перепаде высот, и подключить к модели. Также необходима модель атмосферного деаэратора (ДА) – это будет просто отдельный бак, куда будет сливаться много разных расходов воды, пароводяной смеси, в том числе и греющего пара из II отбора, конденсироваться при давлении, близком к атмосферному, и откачиваться вода.

Примечание: из-за отсутствия в модели теплоносителя кода HS неконденсирующихся газов большого принципиального смысла в деаэраторе не будет – он просто будет «держать» баланс масс и энергий втекающих в него расходов теплоносителя. Это будет та же модель пароводяного бака, но никакого процесса именно деаэрации (удаления газов) смоделировать не получится, потому что в модели их и так нет нигде.



# 7.1 Характеристика насоса ЭКН-150-110

Основная проблема, возникающая при моделировании насосов, – отсутствие расходно-напорной характеристики для насоса. Предположим, что в нашем случае мы располагаем только наименованием марки насоса: «ЭКН-150-110», в которой, скорее всего, зашифрован напор и расход в номинальном режиме. Но ни самой кривой (зависимости напора от расхода), ни номинальной частоты вращения, ни КПД насоса или мощности не указано. Поэтому мы ограничимся лишь этими двумя цифрами, а остальное зададим условно, чтобы насос качественно подходил для нашей модели.

В сети можно найти такую информацию: «Условное обозначение насоса ЭКН 150-110 расшифровывается следующим образом: буквенное обозначение ЭКН – конденсатный электронасос; цифра буквенного обозначения 150 – номинальная подача электронасоса, т/ч; цифра после тире 110 – номинальный напор электронасоса, м. Пример записи обозначения электронасоса при заказе и в документации другого изделия: "Конденсатный электронасос ЭКН 150-110" ТУ 101-М-01385ТУ».

Примем, что номинальные расход и напор для нашего насоса, для воды при нормальных условиях, равны 150 м<sup>3</sup>/ч и 110 м. Исходя из расхода конденсата в нашем режиме (125 т/ч), производительности даже одного насоса должно хватить.

По тепловой схеме блок ЭКН представляет собой 3 насоса, работающих в параллель, см. рис. 7.1.1. На тепловой схеме приведено много подробностей, которые моделировать сейчас мы не будем. Например, рециркуляция конденсата, подача конденсата на уплотнения подшипников насосов и т. п. Мы сосредоточимся на главном процессе и смоделируем его – три ветви насосов, Ду200 на всасе, Ду150 на напоре, общий трубопровод после объединения ветвей тоже Ду150, наличие обратных клапанов на напорах насосов.

Для моделирования насоса в коде HS предусмотрено три типа насосов – заданный напор насоса, насос с полиномными характеристиками и насос с заданной пользовательской характеристикой. Вообще говоря, с имеющимися скудными исходными данными оптимальнее всего было бы воспользоваться моделью насоса с полиномными характеристиками. В этой модели, по сути, задается три точки расходно-напорной характеристики – максимальный напор при 0-м расходе, максимальный расход при 0-м напоре (такой расход, при котором насос уже не создает напора) и номинальная точка – номинальный расход и номинальный напор. По ним строится парабола (самим кодом HS), и она является характеристикой насоса. Очень удобное задание характеристики.



Рисунок 7.1.1 Блок главных конденсатных электронасосов

Но мы специально, с точки зрения обучения, пойдем по пути, который сложнее, – через задание пользовательской характеристики насоса. С нуля мы ее разрабатывать не будем – проще воспользоваться уже тем, что разработали до нас.

Откройте редактором таблиц файл, расположенный в дистрибутиве SimIn-Tech по адресу: C:\SimInTech\bin\DataBase\HS\ENGINES\PUMPS\CЭ-1250-70-11.tbl. И сохраните его там же в файл с именем ЭКН-150-110.tbl.

Данный файл содержит три таблицы – собственно расходно-напорную характеристику (первая таблица, в ячейках таблицы напор, по осям относительный расход и относительная частота вращения), таблицу КПД (в зависимости тоже от расхода и частоты) и таблицу момента на валу насоса.

Перейдите в глобальный скрипт этого файла (кнопка с глобусом в панели инструментов), и вы увидите там заданную характеристику и скрипт, рассчитывающий таблицы для насоса типа СЭ-1250-70-11 – это сетевой электрический насос с гораздо большей подачей, чем нам требуется (1250 м<sup>3</sup>/ч), и с меньшим напором (70 м). Нам потребуется скорректировать исходные массивы, заданные там, под наши характеристики. Если бы мы обладали графиками расходно-напорной характеристики, КПД и момента, то по сколотым точкам из этих графиков можно было бы задать здесь характеристику.

Число точек по расходу и по частоте нам сейчас не важно – оставляем его таким, как задано в характеристике насоса СЭ-1250-70-11, взятого за основу. А вот другие строки, до строчек

const Nq=5; //Число точек по расходу const Nw=12; //Число точек по частоте

скорректируем. Запишите там следующий скрипт, вместо того что написано для предыдущего насоса:

Q0=150;	//Объемный расход	ц, м^3/ч
H0=110;	//Напор, м	
w0=740;	//частота вращени	ия, об/мин
ws=750;	//ближайшая синхр	онная частота, об/мин
N0=60;	//мощность, кВт	(задана условно!!!)
kpd0=0.8;	//КПД	(задано условно!!!)

M0=1e3\*N0/(2\*pi\*w0/60); //момент на рабочем колесе, н\*м

//Сколотая характеристика насоса

const	Q=	[	1,	50.0,	100.,	150.0,	400];//M	13/ч
const	H=	[125.	0, 3	120.0,	115.0,	110.0,	50];//	М
const	N=	[38.7	7,	42.0,	51.0,	60.0,	61];//	кВт
const	kpd=	[0.00	00, (	9.450,	0.700,	0.850,	0.3];	

Сколотые точки мы задали таким образом, что при снижении расхода до нуля насос создает всего лишь на 1.5 атмосферы больший напор, чем в номинальной точке, а нулевой напор будет достигаться после расхода примерно в 2.5 раза больше, чем номинальный расход. То есть довольно пологая характеристика, но все же это не постоянный напор 110 м, а зависящий от расхода.

Точки для мощности и КПД заданы условно.

После набора этих строк надо пересчитать все таблицы и сохранить файл. Первая таблица должна быть такой же, как показано на рис. 7.1.2.

М	Х	1	2	3	4	5
Y		0.00027777778	0.013888889	0.027777778	0.041666667	0.11111111
1	0	0	0	0	0	0
2	0.1	1.25	1.2	1.15	1.1	0.5
3	0.2	5	4.8	4.6	4.4	2
4	0.3	11.25	10.8	10.35	9.9	4.5
5	0.4	20	19.2	18.4	17.6	8
6	0.5	31.25	30	28.75	27.5	12.5
7	0.6	45	43.2	41.4	39.6	18
8	0.7	61.25	58.8	56.35	53.9	24.5
9	0.8	80	76.8	73.6	70.4	32
10	0.9	101.25	97.2	93.15	89.1	40.5
11	1	125	120	115	110	50
12	1.1	151.25	145.2	139.15	133.1	60.5

Рисунок 7.1.2 Напорная характеристика ЭКН

Видно, что для 1.0 частоты вращения напор соответствует заданному нами вручную в массивах. При большей частоте вращения напор выше, при меньшей – ниже. То есть скрипт, которым мы воспользовались, посчитал все верно. Вроде бы.

# 7.2 Создание схемы группы ЭКН

Для моделирования группы ЭКН нам потребуются все те же блоки – каналы, внутренние узлы, граничные узлы. Но придется ставить и новые блоки – насосы, обратные клапана, задвижки.

Перед этим мини-теория: блоки насосов, задвижек и обратных клапанов размещаются в коде HS на блоках каналов, на какой-либо элемент в канале, и оказывают влияние на расчет расходов в канале. То есть, с точки зрения теплогидравлики, насосы и задвижки являются внешним «возмущающим» воздействием.

Задвижки добавляют в канал то или иное местное сопротивление. Насосы добавляют дополнительный перепад давления в элемент канала. Модель задвижки вычисляет привносимое в канал местное сопротивление в зависимости от положения задвижки. Насос вычисляет добавляемый перепад давления (напор) по своей характеристике, в зависимости от частоты вращения насоса и текущего расхода через насос (элемент канала).

Соответственно, входным воздействием являются положение задвижки и частота вращения насоса. Как правило, эти две величины вычисляются вне теплогидравлической задачи. Например, в модели электродвигателя насоса или двигателя, управляющего задвижкой. У нас таких моделей не будет, и положение задвижек будем задавать вручную. Частоту вращения насосов будем задавать единичную для работающих насосов и 0-ю для выключенных. Но надо понимать, что, вообще говоря, это переменные величины, являющиеся входными в модели насоса и задвижки кода HS. С обратными клапанами посложнее – их положение вычисляет сама модель клапана, внутри кода HS, в зависимости от перепада давления с двух сторон от задвижки. Таким образом, клапан может самостоятельно открываться или закрываться, в зависимости от перепада давления на нем и заданной ему характеристики. У обратных клапанов своя характеристика.

Обратим внимание еще на задание высотных отметок – несмотря на то что расчетная и тепловая схемы рисуются в одной плоскости, разные единицы оборудования могут находиться на разных высотных отметках, что в случае воды дает существенную нивелирную добавку к давлению. Для предотвращения явления кавитации насосы обычно ставят на то или иное заглубление, чтобы давление на всасе насоса никогда не достигало давления насыщения.

Разместим нашу расчетную схему с насосами ЭКН еще ниже по высоте, чем узел под конденсатором. Конденсатор мы размещали на уровне –10 м, а узел под ним – на уровне –15 м. Разместим все ЭКН, трубопроводы и узлы для них на уровне –20 м. Точных значений нам неизвестно, но 10-метровый напор (примерно 1 атмосфера) создаст минимальный запас до кавитации. Хотя, возможно, насосы надо размещать еще ниже по высоте или поднимать вверх конденсатор.

# 7.2.1 Необходимые блоки

Разместите в свободном месте схемы следующие блоки: 9 внутренних узлов, 12 каналов, два граничных узла, три насоса с таблично заданными характеристиками на средние каналы, три обратных клапана на напорные каналы и 4 задвижки – три до насосов, на всасывающих трубопроводах, и одну на общем напорном трубопроводе. Пример приведен на рис. 7.2.1. У задвижек выберите тип оформления «Задвижка с пневмоприводом» (на математику это не влияет).



Рисунок 7.2.1 Размещение блоков на схеме для моделирования ЭКН

Соедините все линиями связи, проверьте, что насосы, задвижки и обратные клапаны действительно разместились на каналах (либо через пункт контекстного меню **Показать родителя**, либо подвигав каналы – все дочерние блоки должны двигаться вместе со своим родителем).

Дайте имя каждому технологическому блоку (ГКН\_11,21,31 для насосов, аналогично для задвижек, см. рис. 7.2.1 и 7.1.1). Вообще говоря, этого правила следует придерживаться при разработке модели того или иного объекта – давать в модели имена, аналогичные исходным (проектным) данным.

Зададим сразу все высотные отметки, чтобы потом не забыть. Входной граничный узел в дальнейшем мы заменим на узел, который находится под конденсатором, – поэтому ему задаем высоту –15 м (такую же, как и в узле под конденсатором). В остальных узлах расчетной схемы задайте –20 м, в том числе и в выходном граничном узле. Можно это сделать и через глобальные константы – задать там опорные высотные отметки и пользоваться именованными константами в блоках. Возможно, это более правильный способ.

Важный нюанс – у каналов также есть задаваемый перепад высот для каждого элемента канала. Мы этим не пользовались, т. к. не обращали еще внимания, но вообще это один из важных инструментов для задания вертикальных или наклонных каналов.

# 7.2.2 Свойства блоков

Перейдем к тщательному заданию свойств блоков. По тепловой схеме мы видим, что у каждого насоса есть всасывающий трубопровод диаметром 200 мм, потом сужение и труба, где стоит насос, далее напорный трубопровод имеет диаметр 150 мм.

Моделируя конденсатор, мы сделали всего 1 канал для слива конденсата (так было проще отлаживать) и пока что так и оставим, но ему надо задать диаметр побольше, чем 200 мм. У нас был задан там 1 м, давайте сделаем 0.5 м (500 мм). А для остальных каналов на схеме проставим 200 и 150 мм. Такой же диаметр поставьте и в граничных узлах. Таким образом, задайте:

- 1) 0.5 м гидравлический диаметр у левого граничного узла;
- 2) 0.5 м диаметр первого канала;
- 3) 0.2 м диаметры всасывающих каналов перед насосами;
- 4) 0.15 м диаметры всех остальных каналов;
- 5) 0.15 м гидравлический диаметр у правого граничного узла.

Длины всех каналов задайте по 5 м, как **Self.N#5**. Объемы всех узлов задайте равными 0.1 м<sup>3</sup>.

Далее, местные гидравлические сопротивления. По исходным данным они нам неизвестны, но по практике моделирования любой клапан или насос вносит то или иное сопротивление. Давайте зададим его по 5 для каналов с насосами, 2 для каналов с задвижками и обратными клапанами и 25 для канала с общим регулирующим клапаном. Для этого в каждом канале проставьте прямое и местное сопротивление:

(Self.N+1)#5/(Self.N+1) у насосов,

(Self.N+1)#2/(Self.N+1) у задвижек и обратных клапанов,

(Self.N+1)#25/(Self.N+1) у общего регулирующего клапана, на напорном трубопроводе.

Количество участков у каналов – задайте по 2 элемента на тех каналах, где стоит арматура, а у самих блоков-задвижек номер элемента канала поставьте 2. Это не обязательное изменение, но так будет лучше – чтобы задвижки стояли
на той гидравлической связи, которая образуется между элементами внутри канала, а не между элементом канала и узлом. В предыдущих версиях кода HS с этим были некоторые проблемы.

Теперь о начальных частотах вращения и положениях задвижек. Для всех насосов задайте файл характеристики с именем «ЭКН-150-110», который мы подготовили. Номинальную частоту вращения задайте у всех **12.5** Гц (= 625 об/мин). Для первых двух насосов задайте относительную частоту вращения **1.0** (это значит, что насос включен), для третьего **0.0** (выключен). Арматуре на всасе первых двух насосов задайте положение **100** %. Арматуре на общем напорном трубопроводе задайте характеристику KsiMin = **25**, KsiMax = **1е10**, положение **50** % пока что (его будем подбирать позже). У других задвижек достаточно характеристики, линейной по расходу, и KsiMin/KsiMax, заданных по умолчанию.

Начальные свойства теплоносителя. Для всех каналов и внутренних узлов, т. к. мы их расположили на высоте –20 м, а конденсатор находится на высоте –10 м и там почти полный вакуум (5000 Па), в узлах нашей схемы при выключенных насосах и наличии воды в конденсаторе и трубах будет давление около 1 атмосферы. Поэтому начальное давление можно – в первом приближении – оставить во всех узлах заданным как 1е5 Па, кроме граничного узла, который расположен на отметке –15 м. В модели проточной части у этого же (внутреннего) узла устанавливается давление порядка 62 000 Па. Давайте у нашего граничного узла зададим такое же начальное давление, чтобы потом проще было интегрировать схемы. Можете там задать начальное давление как **P\_cnd+57000**.

Начальную температуру во всех узлах и всех каналах установите равной **T\_cnd**. Вообще говоря, давление и температура потом поднимутся из-за действия насосов, но начальные значения можно задать пока что такими.

Расходы пока оставляем нулевыми. Посмотрим, как включенные насосы создадут напор и появится расход.

Давление в правом граничном условии задайте равным **10e5**, потому что насосы должны прокачивать расход теплоносителя через ПНД-1 и потом напора должно хватить на прокачку этого же теплоносителя до деаэратора (ДА). Вспомним, что в модели ПНД-1 мы задавались именно таким давлением подогреваемой воды.

Для обратных клапанов задайте минимальное и максимальное местное сопротивление **3** и **1e8**. Перепады давления открытия и закрытия задайте **0.1e5** и **0.01e5**.

Выведите на график расходы в левом (всасывающем общем) канале и в напорном общем канале, где размещена задвижка К\_3\_1. Можно попробовать запустить модель на расчет. Результат по расходу должен получиться примерно 132 т/ч, и на это значение модель выйдет где-то за 1 секунду, см. рис. 7.2.2.

За первую секунду расчета происходит много процессов, вы их можете самостоятельно поисследовать. Но как минимум мы видим, что модель устойчива, выдает примерно тот расход, который нам нужен, и осталось только скорректировать положение общей задвижки на напоре, чтобы подобрать требуемый нам расход величиной в 125 т/ч. Близкое совпадение с номинальным расходом получилось из-за совместно заданных и подобранных характеристик насосов, диаметров трубопроводов и характеристики общей задвижки – сочетание минимальной и максимальной Ksi с 50 % дало примерно нужный расход. Можете в процессе расчета позадавать другое положение у этой задвижки и увидеть тот диапазон расходов, которые система может выдавать при включенных двух насосах.



Рисунок 7.2.2 Выход модели насосов на стационарное состояние

Хотя характеристика у задвижки задана как линейная (по расходу), то есть расход через нее должен линейно зависеть от ее положения, однако в модели это строго не получается, потому что у насосов и у других частей контура есть еще свои характеристики и в зависимости от положения задвижки меняется как расход через нее, так и давления в узлах системы. В нашей модели зависимость расхода от положения задвижки (снятая с модели через фазовый портрет менеджера данных) получилась, как представлено на рис. 7.2.3. Мы не знаем, является ли данная задвижка в ПТУ регулирующей, но вообще примерно в этом месте должен быть регулятор уровня конденсата в конденсаторе. И его параметры надо подобрать так, чтобы при положении регулятора от 20 до 80 % (или от 30 до 70 % примерно) у него была хорошая регулирующая способность, то есть способность эффективно изменять расход через себя. График (рис. 7.2.3) показывает, что определенной регулирующей способностью, перекрывающей наш номинальный расход в обе стороны, данная задвижка обладает. При положении регулятора меньше 45 % мы будем иметь расход ниже номинального, при положениях 50 % и выше – больше номинального. Будем эту задвижку использовать как регулятор, работающий в ручном режиме, для подбора требуемого расхода в 125 т/ч.



Рисунок 7.2.3 Характеристика задвижки К\_3\_1, полученная в модели

### 7.3 Отладка схемы

Подберите положение задвижки К\_3\_1 таким образом, чтобы расход стал равен 125 т/ч.

В нашей модели этого получилось достичь при положении задвижки 46.5 %.

Давайте снизим эффект «разгона» воды на первой секунде и попробуем задать расход, близкий к номинальному в начальных условиях. Там, где идут индивидуальные каналы на насос, задайте начальный расход как **G\_ou**/2, в общих каналах **G\_ou**. Кроме каналов через нижний (третий) насос – там расход должен быть нулевым.

Существенного улучшения (на первой секунде расчета) вы не увидите, потому что поле давлений задано неверно – в начальный момент времени везде 1е5 Па. Задайте на каналах насосов и на всех каналах и узлах справа от них начальное давление 12е5 Па. Но это тоже не выправит график расхода – чтото в модели насоса, скорее всего, в начальный момент времени инициализируется неправильно и приводит к повышенному напору насоса на первых шагах расчета.

Скорее всего, начиная с этого момента (вернее, с моделей подогревателей) нам не удастся избежать начального переходного процесса, занимающего время до 30–300 секунд расчета. И каждую итерацию, и дальнейшие шаги придется все время сверять, выходит схема на стационарное состояние или нет.

### 7.4 Объединение ЭКН с конденсатором

Поскольку начальные параметры теплоносителя в узле левого граничного условия мы выставили равными узлу под конденсатором, то объединение в этой части не должно сильно нарушить стационарное состояние системы в целом. Проделайте это – подключите модель насосов к конденсатору, см. рис. 7.4.1.

После этого запустите на расчет и убедитесь, что уровень в конденсаторе, возможно, в первые секунды расчета начнет снижаться или расти, но потом выйдет на стабильное значение. Мы приводим то, что получилось в нашей модели, – рис. 7.4.2. После достижения равновесия, в процессе расчета, мы прикрыли задвижку К\_3\_1 на 10 % (до 36.5), чтобы увидеть, как она будет регулировать уровень в конденсаторе. Уровень начал расти. Затем увеличили ее положение на 20 % (до 56.5 %) – уровень стал снижаться. После этого вернули на 46.5 %, что соответствует в нашей модели требуемому расходу в 125 т/ч. Таким образом, заготовка для регулятора уровня в конденсаторе в модели готова.

Обратите внимание, что расход 125 т/ч (см. рис. 7.4.1) теперь уже обеспечивается не принудительным блоком типа «подпитка», а двумя насосами и их совместной работой с задвижкой и граничным условием типа «давление». Можете попробовать оставить в работе один насос и посмотреть, хватит ли его для откачки конденсата (задвижку придется, скорее всего, открывать почти на 100 %).



Рисунок 7.4.1 Объединение ЭКН и проточной части



Рисунок 7.4.2 Уровни в баках после подключения ЭКН

### 7.5 Объединение с ПНД-1

Объединение модели насосов с ПНД-1, казалось бы, должно быть простым делом, если бы не одно но – при подключении к контуру подогреваемой воды в этой части контура не останется граничного условия типа «давление», и оно будет насчитываться, уже исходя из давления в конденсаторе, нивелирных перепадов и напора, создаваемого насосами. То есть давления по контуру будут пересчитываться и, возможно, снизятся – этого желательно избежать, потому что снижение давления приведет к кавитации насосов и выходу системы из устойчивого состояния.

Давайте попробуем сделать объединение, не зная ни о каких подводных камнях – просто убрав граничное условие справа от ЭКН, убрав граничное условие справа от ПНД-1, скопировав внутренний узел справа от К\_3\_1 в еще один новый внутренний узел и соединив общий напорный канал с каналом на входе в ПНД-1 через новый внутренний узел. Его лучше скопировать, чтобы не задавать там заново начальные условия.

В нашей модели ничего критического не произошло – устойчивое состояние не потерялось. Но если у вас начались какие-то сильные колебания расходов или давлений около ЭКН, стал увеличиваться или снижаться уровень – значит, чтото сделано неверно и требуется найти ошибочное (сильно ошибочное) место.

В нашей подготавливаемой модели тоже не все задано идеально верно, но то, что мы задаем, позволяет держать устойчивый расчет около номинальной точки.

Приведем график уровней в баках, полученный за первые 200 секунд расчета, на рис. 7.5.1. По рисунку видно, что хотя расчет устойчив, но уровень в конденсаторе имеет тенденцию к снижению, а уровень в ПНД-1, наоборот, растет. Значит, те изменения, которые произошли в модели, привели либо к увеличению откачки теплоносителя из конденсатора, либо – другой возможный эффект – увеличилась интенсивность конденсации в ПНД-1, он стал забирать больше пара на себя, а в конденсатор (или в другие ПВД) стало идти меньше пара, чем 125 т/ч.

Чтобы скомпенсировать этот эффект, надо снизить поправочный множитель для коэффициента теплоотдачи в баке ПНД-1. Действительно, на 200-й секунде нашего расчета ПНД-1 отбирал 10.2 т/ч пара (на 0.2 больше номинального расхода), а ПВД-3 отбирал 18.4 т/ч пара (меньше на 0.2, чем надо). Задав в баке ПНД-1 значение поправочного множителя равным 0.80 вместо 0.85, за несколько итераций мы улучшили ситуацию, результат приведен на рис. 7.5.2. Вам предстоит много раз проделывать такие же «подкрутки», не обязательно в поправочном множителе, а и в других частях модели, потому что при дальнейшей интеграции все больше и больше будет взаимных влияний элементов модели друг на друга. Важно каждый раз оценивать тот стационар, на который выходит модель, по опорным показателям – расходам, давлениям в контролируемых точках, температурам.



Рисунок 7.5.1 Уровни в баках при подключении ЭКН к ПНД-1

Кроме этого, уже на данном этапе система получилась довольно сложной, насосы добавили в систему свою нелинейность, и расход конденсата, который протекает через ПНД-1, не сразу выходит на номинальное значение. Контур также меняет свою температуру, и все это сказывается на процессе конденсации в ПНД-1. По рисунку видно, что уровень в ПНД-1 вроде бы к 100-й секунде расчета пришел к стабилизации, но это не так – на 200-й секунде наметилась тенденция к его дальнейшему росту (а у конденсатора – к дальнейшему снижению). Поэтому, вообще говоря, полная модель турбины без регуляторов (хотя бы регуляторов уровней в баках) не работает стабильно длительное время. Но мы постараемся это сделать или хотя бы увеличить длительность такого «квазистационарного» режима.



Рисунок 7.5.2 Уровни в баках при поправочном множителе 0.8 в ПНД-1

Скажем пару слов о внешнем виде модели. На текущий момент написания методики внешний вид модели представлен на рис. 7.5.3. Хотя мы стараемся делать все аккуратно (к чему и вас призываем), но количество элементов и их взаимное расположение уже возросло до такой степени, что на одной плоскости они смотрятся не очень красиво, схема уже «на грани фола». Поэтому при желании можно большую модель разделять на листы (субмодели), где представлять ту или иную часть модели. Например, блок ЭКН можно свернуть в субмодель и представить на этой плоскости одним блоком со входом и выходом конденсата. Оформительскую часть оставляем на ваше усмотрение. На практике бывает так, что удобно все держать и на одной плоскости, и когда с расчетной схемой человек работает многие месяцы, то он привыкает к такому положению дел, аналогично как и принципиальную тепловую схему обычно чертят на одном листе большого формата.



Рисунок 7.5.3 Внешний вид модели



# 8.1 Характеристика насоса ЭПН-150-75

Для насоса ЭПН-150-75 ситуация примерно аналогична – нам известна только номинальная точка работы этого насоса, при 100%-ной частоте вращения ротора.

Из сети интернет можно найти информацию, что в этом случае 75 – это уже не метры, а килограмм-сила на квадратный сантиметр: «Условное обозначение насоса ЭПН 150-75 расшифровывается следующим образом: буквенное обозначение ЭПН – питательный электронасос; цифра буквенного обозначения 150 – номинальная подача электронасоса, т/ч; цифра после тире 75 – номинальное давление нагнетания электронасоса, кгс/см<sup>2</sup>. Пример записи обозначения электронасоса при заказе и в документации другого изделия: "Питательный электронасос ЭПН 150-75" ТУ 101-М-01384ТУ».

Таким образом, номинальный объемный расход насоса составляет 150 м<sup>3</sup>/ч, а напор равен примерно 750 м.

По аналогии с тем, как мы делали файл с характеристикой конденсатного электронасоса, сделайте рядом с ним файл **ЭПН-150-75.tbl** (копией файла характеристики насоса, который мы уже сделали), откройте его редактором таблиц и задайте там в глобальном скрипте следующие настройки:

Q0=150;	//Объемный расход, м^3/ч				
H0=750;	//Напор, м				
w0=740;	//частота вращен	ия, об/мин			
ws=750;	//ближайшая синхронная частота, об/мин				
N0=600;	//мощность, кВт	(задана условно!!!)			
kpd0=0.8;	//кпд	(задано условно!!!)			
M0=1e3*N0/(2*pi	*w0/60); //момент	на рабочем колесе, н*м			
<pre>const Nq=5;</pre>	//Число точек по	расходу			
<pre>const Nw=12;</pre>	//Число точек по	частоте			
//Сколотая хара	ктеристика насоса	I.			
const Q= [	1, 50.0, 100.	, 150.0, 400];//м3/ч			
const H= [810	.0, 800.0, 780.	0, 750.0, 50];// м			

```
const N= [380.7, 420.0, 510.0, 600.0 610];// кВт
const kpd= [0.000, 0.450, 0.700, 0.850, 0.3];
```

По расходу и напору можно примерно прикинуть мощность этого насоса – это уже относительно большой насос, мощность где-то полмегаватта. Но для наших целей конкретная характеристика (точная) сейчас не так важна – главное, чтобы насос обеспечивал номинальную подачу и напор.

Пересчитайте скрипт и все таблицы в файле, сохраните файл на диск.

# 8.2 Создание схемы группы ЭПН

По принципиальной тепловой схеме насосов ЭПН тоже должно быть три, если не считать разводочный питательный насос (РПН), который мы не будем моделировать. Компоновка ЭПН такая же, как и у группы ЭКН, но на напоре каждого насоса после обратного клапана стоит еще запирающая арматура. Поэтому проще будет не рисовать с нуля все, а скопировать схему в части ЭПН, вставить ее рядом, добавить по каналу и узлу около каждого насоса и переименовать все элементы оборудования, как представлено на рис. 8.2.1.

Примечание: масштаб рисунка уменьшен, но сейчас важны наименования блоков, а не параметры теплоносителя по узлам.



Рисунок 8.2.1 Схема группы ЭПН

На всасывающем канале поставьте задвижку с именем K\_51\_1, названия насосов ЭПН\_11, ЭПН\_21, ЭПН\_31, на напорной линии регулирующему клапану дайте имя ПК. Обратные клапаны имеют имена: K\_56\_1, K\_57\_1, K\_58\_1. Задвижки на всасе и на напоре насосов: K\_53\_1, K\_54\_1, K\_55\_1, ПВ\_14\_1, ПВ\_15\_1, ПВ\_16\_1. Слева и справа от схемы поставьте граничные узлы, соедините все линиями связи. Подробно на каждом действии мы не останавливаемся – все уже должно быть вам известно, и эту схему можете воспринимать как самостоятельную работу, потому что ничего принципиально нового тут не будет.

### 8.3 Свойства блоков и номинальное состояние

По принципиальной тепловой схеме диаметры трубопроводов должны быть следующие:

- 1) от ДА к группе ЭПН: Ду250;
- 2) на всасе каждого ЭПН: Ду150;
- 3) на напоре каждого ЭПН: Ду150;
- 4) общий питательный трубопровод: Ду200, и такой диаметр сохраняется дальше через оба ПВД и уходит к парогенераторам РУ.

Примечание: скорее всего, нам позже следует скорректировать диаметр у линии подвода и отвода питательной воды у ПВД-2 и ПВД-3.

Проставьте самостоятельно эти диаметры у нужных каналов на схеме. Длины у каналов оставляйте по 5 м. Не забудьте проставить гидравлические диаметры у граничных узлов (такие же, как и у каналов, к которым они подсоединяются).

Для каждого насоса выберите характеристику **ЭПН-150-75.tbl**, которую вы недавно сделали.

Роль ЭПН очень простая – забрать деаэрированную питательную воду из бака ДА, прокачать через подогреватели высокого давления и подать ее дальше в парогенераторы. Примем, что в баке ДА давление будет около 2 атмосфер, высотная отметка ДА будет на +0 м, а группа ЭПН будет находиться на отметке минус 20 м. Задайте в левом граничном условии давление 2e5 Па и уровень 0 м. А во всех остальных узлах, в т. ч. и правом граничном узле, – высотную отметку –20 м.

Тогда на всасе насосов давление должно быть около 4 атмосфер, на напоре будет порядка 75–80, и на входе в ПВД должно быть несколько меньше этого значения. Допустим, там будет 60 атмосфер (на такое давление настраивали ПВД).

Задайте начальное давление в узлах до насосов = 4e5, после насосов 80e5, а температуру везде проставьте 104 °С (это температура с 16-градусным запасом до кипения, при давлении 2 атмосферы). Можете температуру в граничном узле задать формулой waterps(self.P,2)-16.

Для давления и температуры воды в ДА задайте глобальные константы:

**const** P\_da = 2e5; // примерно **const** T\_da = 104; // град.С

В граничном условии справа проставьте давление 60е5, а регулятору питания (клапан ПК) задайте 5%-ное положение.

Продумайте самостоятельно, какие свойства надо задать для начальных условий в каждом канале, и проставьте их верно. Если вы все проделали корректно, то переходной процесс по расходу на всасывающем и напорном трубопроводе для группы ЭПН будет выглядеть примерно как на рис. 8.3.1.



Рисунок 8.3.1 Переходной процесс выхода на номинальный расход

В итоге система вышла на расход 108 т/ч, а нам нужно получить 235 т/ч. Подберите положение ПК такое, которое обеспечит расход 235 т/ч. В нашей модели подобному расходу соответствует положение ПК = 19.2 %. У вас должно получиться в принципе такое же значение. Но могут быть отличия в значениях местного гидравлического сопротивления, заданные в каналах, и тогда в вашей схеме клапан придется поставить в несколько другое положение.

Переходной процесс на рис. 8.3.1 не самый лучший – увеличение расхода до 400 кг/с во всасывающем трубопроводе является признаком сильного разбаланса в начальных условиях. Скорее всего, это происходит из-за модели насосов, которые в сразу включенном состоянии выдают слишком большой напор на своих каналах.

Давайте применим другой способ задания начальных условий – вначале все насосы будут остановлены, давления до обратных клапанов = 4 атмосферы в узлах, после обратных клапанов = 60 атмосфер, как в граничном условии. Температура везде 104 °C. Расходы начальные во всех каналах = 0.

А у первых двух насосов задайте не 1.0 относительную частоту вращения, а формулой следующее выражение: **max(0, min(1, 0.5\*(time-1))**), что означает линейный рост частоты вращения от 0 до 1 за 2 секунды, начиная с 1-й секунды модельного времени. При таком задании начальных условий расход на входе и выходе уже будет более верным, см. рис. 8.3.2.



Рисунок 8.3.2 Плавный пуск ЭПН

Убедитесь, что в граничный узел с 60 атмосферами группа насосов выдает расход 235 т/ч, а регулятор ПК стоит в некотором промежуточном положении (значит, есть запас на регулирование в обе стороны).

Подготовка модели группы ЭПН на этом завершена.

Примечание: вы могли заметить, что в каналах отключенного третьего насоса также поднимается давление, становясь выше, чем должно быть (см. рис. 8.2.1, например) по граничному условию. Это происходит из-за особенностей моделирования арматуры в SimInTech – арматура всегда имеет ту или иную степень протечек, т. к. моделируется местным гидравлическим сопротивлением, которое хотя и велико, но не обеспечивает полного перекрытия для расхода теплоносителя. Чтобы существенного обратного расхода через третий насос не возникало, нужно в запорной арматуре и в обратных клапанах ставить более высокие степени у гидравлического сопротивления **KsiMax**. Например, 1е12 или 1е16. Но тогда возможны проблемы с численным интегрированием – эти величины надо подбирать и согласовывать с шагом расчета.



Прежде чем моделировать деаэратор, давайте обратим внимание на такой параметр схемы, как баланс расходов. От модели ПТУ, как правило, в стационарном режиме требуется равенство расхода свежего пара на турбину и расхода питательной воды, возвращаемой в парогенераторы. В нашей модели в исходных данных расход пара на турбину равен 220 т/ч (221 т/ч с учетом ДУУ), а про расход питательной воды сказано только, что он должен быть около 235 т/ч, и его величина уточняется позже, в процессе испытаний всей энергоустановки. Возможно, избыток питательной воды (14–15 т/ч) тратится на непрерывную продувку парогенераторов или еще на какие-то нужды.

То есть у нас наблюдается некоторый небаланс по расходам. Кроме этого, существенная часть пара из II отбора будет уходить на теплофикационные нужды и потребителей, которые мы не моделируем.

Таким образом, деаэратор будет иметь непрерывный отток воды в размере –235 т/ч (на группу питательных электронасосов), а поступления в него будут следующими:

- +125 т/ч конденсат из ГК, подогретый в ПНД-1;
- + 10 т/ч конденсат греющего пара (КГП) из ПНД-1 (он будет заливаться в деаэратор при помощи дополнительного небольшого сливного электронасоса);
- + 18.4 + 13 т/ч конденсат греющего пара из ПВД-2 и ПВД-3;
- + некоторое количество (Х) т/ч греющего пара на сам деаэратор.

Всего суммарно 166.4 т/ч + Х входящий поток теплоносителя в деаэратор.

До 235 т/ч не хватает +68.6 – Х т/ч расхода, который смоделируем пока что блоком типа «подпитка» в бак деаэратора.

# 9.1 Отличие деаэратора от ПНД и ПВД

С точки зрения моделирования, деаэратор представляет собой тоже бак, как и ПВД или ПНД. Деаэратор лучше смоделировать баком произвольного сечения, сделав его головку более узкой и небольшой по объему, по сравнению с нижней частью.

В отличие от ПВД-ПНД, деаэратор в нашей модели не будет содержать теплообменников, и мы не будем его оформлять как отдельную субмодель и подпрограмму. Скорее, деаэратор у нас будет просто как уравнительный сосуд, в котором выравниваются параметры греющего пара.

Также модель деаэратора может быть набрана из двух баков – верхнего и нижнего объемов. Нам сейчас, для целей данного методического пособия, более подробная модель деаэратора не нужна, смоделируем его просто баком, с требуемым количеством узлов (отверстий), и подберем свойства и характеристики подводящих трубопроводов и подпитки таким образом, чтобы уровень в этом баке не изменялся, а параметры питательной воды были стабильными в процессе расчета.

# 9.2 Набор схемы

Подключать бак деаэратора к схеме можно в любой последовательности. Правильно было бы, конечно, сначала автономно его отладить, как мы это делали с ГК, ПНД, ПВД. Но так как исходных данных именно по деаэратору и его номинальному состоянию у нас мало, будем делать его сразу на схеме, интегрируя по шагам в набранную модель турбины.

Исходя из косвенных признаков – то, что деаэратор называется атмосферным (ДА), а температура питательной воды на входе ПВД-2 составляет 104 °С, можно сделать вывод, что давление в деаэраторе в стационарном номинальном состоянии составляет порядка 1.0-1.2 атмосферы. Примем объем бака деаэратора 50 м<sup>3</sup>, а высотную отметку, на которой он расположен, = 0 м.

Тогда при наличии некоторого уровня в баке давление в нижней точке будет явно выше атмосферы, температура сконденсированной воды может быть 100...105 °C, и кавитации на всасе питательных насосов не должно быть. Тем более что сами насосы в нашей модели заглублены.

Разместите на схеме бак типа «пароводяной компенсатор», задайте ему объем 50 м<sup>3</sup>, внутренний диаметр = 1.7 м, начальное давление 1.2e5 Па, начальную объемную долю 1-й области = 0.25.

Для нижнего узла (откуда будет откачиваться питательная вода) задайте диаметр **0.25** м, то же давление **1.2e5**, начальную температуру **104** °C, высотную отметку = **0** м относительно днища бака, а объем узла равным **0.1** м<sup>3</sup>. Объемы узлов задаем пока что, вообще говоря, произвольно, но не 0.01 м<sup>3</sup> для сглаживания возможных начальных колебаний. Объем, равный 0.01 м<sup>3</sup> = 10 л, хотя это примерно ведро воды, все же недостаточен для таких моделей, где расходы измеряются порядками 10...100 кг/с.

Скопируйте этот узел и вставьте на бак еще одно отверстие и к двум отверстиям подсоедините по подпитке, задав у одной расход «+**Gv\_pvd2**» и температуру +**99** °C, а у другой с минусом «-**Gv pvd2**» (температура при этом не важна).

Задайте имя баку (блоку) как DA.

Проставьте на схему блоки, контролирующие давление и уровень в баке, проинициализируйте схему. Результат сравните с рис. 9.2.1.

Если запустить модель на расчет, то параметры среды в баке не должны резко меняться – будет происходить постепенное охлаждение воды и пара, снижение давления, но не сильное. Результат расчета температур в баке ДА на первых 5 секундах представлен на рис. 9.2.2. При дальнейшем расчете давление в баке должно снижаться до атмосферного и, возможно, немного ниже. Температура должна тоже снижаться и достигнуть 100...99 °С через довольно продолжительное время (более 5 минут модельного времени), потому что входящий поток воды имеет такую температуру.

Если у вас получился неустойчивый расчет – перепроверяйте начальные условия и другие характеристики проставленных блоков.



Рисунок 9.2.1 Начальная инициализация модели ДА



Рисунок 9.2.2 Постепенное охлаждение деаэратора

### 9.3 Предварительная отладка на номинальные параметры

Добившись состояния, что из модели ДА мы можем «откачивать» 235 т/ч горячей воды, с температурой около 104 °С, мы можем этим баком заменить граничное условие, из которого питательные насосы забирают (всасывают) питательную воду. Уберите в модели ЭПН граничный узел, а в модели ДА нижнюю подпитку (с отрицательно заданным расходом) и соедините эти две модели (рис. 9.3.1). После этого, запустив на расчет, стационарное состояние у насосов должно остаться (качественно) таким же, как и было. Только параметры воды на всасе перестали быть постоянными, температура и давление воды постепенно снижаются...



Рисунок 9.3.1 Подключение модели ДА к питательным насосам

Для того чтобы температура питательной воды не снижалась, давайте подключим к модели ДА греющий пар. Скопируйте еще раз узел бака и разместите его в верхней части изображения бака (рис. 9.3.1). Задайте там следующие свойства: начальное давление и температуру, как у пара II отбора **P\_o2**, **T\_o2**. Уровень относительно дна бака = **10** м. Тип патрубка = спринклер. Подключите к нему подпитку и задайте ей расход, например, 1 т/ч. То есть в свойстве надо указать +**1**/**3.6**, а температуру задайте как у пара II отбора, **T\_o2**. В другой подпитке, по которой поступает 99°-ная вода, задайте расход равным **Gv\_pvd2-1/3.6**.

После этого, запустив модель на расчет и оценив температуры в баке, вы можете увидеть, что они все же снижаются, см. рис. 9.3.2.

Задайте расход греющего пара +2 т/ч (с аналогичным изменением расхода воды в ДА). Повторите расчет. Наши результаты представлены на рис. 9.3.3. Как видно при сравнительном анализе рис. 9.3.2 и 9.3.3, остывание ДА стало меньше. Путем нескольких итераций вы можете подобрать такой расход пара (как бы из II отбора турбины), при котором ДА не будет ни перегреваться, ни остывать, тогда давление в нем будет примерно постоянным, и питательная вода, подаваемая на насосы, будет иметь постоянные параметры.

В нашем случае оказалось достаточным подавать пар с расходом порядка +2.4 т/ч, чтобы поддерживать параметры в ДА неизменными.



Рисунок 9.3.2 Снижение температур в ДА при подаче некоторого количества греющего пара (+1 т/ч) с параметрами II отбора



Рисунок 9.3.3 Изменения температур в ДА при подаче некоторого количества греющего пара (+2 т/ч) с параметрами II отбора

Порядок дальнейшего объединения ДА и модели турбины будет следующий: подключаем к ДА еще одного «поставщика» воды, снижаем входящий расход из подпитки на требуемую величину и подбираем расход греющего пара в ДА таким образом, чтобы параметры среды в ДА не плыли слишком сильно вверх или вниз.

Автономно или, по крайней мере, с моделью питательных насосов модель ДА работает, в чем вы убедились в процессе этой небольшой отладки.

Примечание: вообще говоря, есть еще такой фактор, как охлаждение всего оборудования путем отдачи тепла в окружающую среду. У каждого бака, узла или контрольного объема канала (элемента канала) должна быть стенка с определенной поверхностью и пусть небольшим, но заданным коэффициентом теплоотдачи и температурой окружающей среды. Наша модель в этом смысле пока что идеальна, без потерь тепла в окружающую среду. Но при желании вы можете это смоделировать, задав стенки у баков, ненулевые площади поверхности стенки в узле, коэффициенты теплообмена, а каналы заменив на трубы (или к каждому каналу присовокупив модель стенки с внешним охлаждением). Тогда многие процессы количественно пойдут по-другому, и надо будет заново «выставлять» стационарное состояние. Про набираемую модель можно говорить как про идеальную в этом смысле, то есть теплоизолированную, у которой нет тепловых потерь.



Вообще говоря, методику построения модели можно было бы сделать иначе – сначала отладить все автономные модели по отдельности, на номинальные параметры (как мы это сделали с проточной частью, затем с главным конденсатором). И только после отладки отдельных частей заняться их объединением в единую модель.

Но автору методики показалось, что непосредственное объединение каждой части сразу после того, как она выполнена, интуитивно более понятно и легче осуществляется, пока характеристики и номинальные параметры очередной части модели еще в памяти и легко видеть, насколько сильное происходит отклонение от стационара при очередном объединении моделей.

Кроме того, данная методика написана по неполным исходным данным, и зачастую многие параметры мы отлаживали на абстрактные номинальные величины.

На текущий момент нам осталось только завести всех смоделированных поставщиков воды в ДА, в том числе смоделировать сливной насос для ПНД-1, и питательную воду подать на ПВД-2,3. На этом учебная модель турбины будет завершена.

# 10.1 Характеристика сливного насоса ЭКН-12-50,

### ДОБАВЛЕНИЕ ЕГО В СХЕМУ

Характеристику данному насосу задайте аналогично тому, как мы делали это для двух других типов насосов, скопировав один из файлов для заготовки. Задайте имя файлу **ЭКН-12-50.tbl** и сохраните его в директории C:\SimInTech\ bin\DataBase\HS\ENGINES\PUMPS. При помощи редактора таблиц наберите там следующий скрипт вместо того, который остался от предыдущего насоса:

```
00=12:
               //Объемный расход. м^3/ч
H0=50;
               //Напор, м
w0=740:
               //частота вращения, об/мин
ws=750;
               //ближайшая синхронная частота, об/мин
N0=30:
               //мощность, кВт (задана условно!!!)
kpd0=0.8:
                                (задан условно!!!)
               //КПД
M0=1e3*N0/(2*pi*w0/60): //момент на рабочем колесе. н*м
const Na=5:
                //Число точек по расходу
const Nw=12:
                //Число точек по частоте
//Сколотая характеристика насоса
                      5,
                            10,
                                   12,
                                         20];//м3/ч
const Q=
           Γ
                1,
const H=
           [55.0, 53.0, 51.0,
                                 50.0.
                                          5];// м
           [18.0, 20.0, 26.0,
                                 30.0.
                                         31];// кВт
const N=
const kpd= [0.000, 0.450, 0.700, 0.850, 0.3];
```

После этого пересчитайте все таблицы и сохраните данный файл еще раз на диск, после чего закройте редактор таблиц. Характеристика нового насоса готова.

Данный насос предназначен для откачки (слива) конденсата греющего пара из ПНД-1 и подачи его в ДА. Насос нужен из-за того, что давление в ПНД-1 низкое, и расположен ПНД-1 может быть немного ниже по высоте, чем ДА.

### 10.2 Подключение ПНД-1 к ДА по конденсату греющего пара

Напомним, что у нас узел слива конденсата находится на отметке –10 м, диаметр сливного трубопровода задан глобальной константой **Dc\_pnd1**. По исходным данным, на напоре этого насоса стоит еще регулирующий клапан с именем **K\_32\_1** и обратный клапан **K\_47\_1**, см. рис. 10.1.1. По рисунку также видно, что Ду трубопровода напорного равен **0.05** м.

Давайте эту часть схемы смоделируем четырьмя последовательно расположенными каналами и узлами между ними, начиная от узла под ПНД-1. На каналах будет последовательно расположен насос, регулирующий клапан и обратный клапан, как показано на рис. 10.1.2. Проще всего будет взять копии канала и узла, которые расположены у нас под ПНД-1, т. к. в них уже заданы все нужные начальные условия для конденсата греющего пара ПНД-1.



Рисунок 10.1.1 ЭКНС на принципиальной схеме

Для канала после обратного клапана задайте диаметр 0.05, такой же поставьте и у узла бака, с которым соединен канал. Узел бака пусть будет на отметке 0 м (узел скопируйте у нижней подпитки).

Проанализируйте самостоятельно, что еще надо задать и скорректировать по сравнению со свойствами по умолчанию.

В конечном счете данный участок схемы должен прокачивать 10 т/ч теплоносителя и не приводить к опорожнению или переполнению ПНД-1.



Рисунок 10.1.2 ЭКНС в расчетной схеме

Уберите подпитку из узла слива конденсата из ПНД-1, а в подпитке воды для ДА сделайте на 10 т/ч меньше подаваемый туда расход, задав там расход, равный «**Gv\_pvd2-2.4/3.6-Gp\_pnd1**».

Характеристику для регулирующего клапана задайте равнопроцентную по расходу и выставьте его положение в 50 %.

Попробуйте запустить модель на расчет. Скорее всего (если вы все сделали верно), у вас установится расход менее 10 т/ч. Увеличьте положение задвижки, подобрав его таким, чтобы расход стал равен 10 т/ч. В нашей модели этого удалось достичь при 67%-ном положении задвижки. Параметры среды в деаэраторе будут постепенно расти. Может возникнуть вопрос: почему температура

в ДА растет, если мы подливаем теперь 97-градусную воду вместо 99-градусной из подпитки? Дело все в насосе – он добавляет мощности и подогревает ГКП из ПНД-1. Поэтому для сохранения стабильности параметров воды в ДА надо немного уменьшить расход греющего пара. Подберите новое равновесное значение, например +2.3/3.6. Аналогично исправьте и в блоке подпитки воды.

Запустите модель на расчет заново. Сравните результат по температурам в ДА с рис. 10.1.3. Полученный результат должен быть очень похожим на рис. 9.3.3.



Рисунок 10.1.3 Новый температурный баланс в ДА

### 10.3 Подключение ПНД-1 к ДА по линии главного конденсата

Теперь давайте подключим основной (подогретый в ПНД-1) конденсат из ГК к деаэратору. Для этого всего лишь надо скопировать 1 канал, выходящий из ПНД-1, и подключить его к ДА через новый узел (отверстие) в баке. На канал разместите арматуру с именем К\_12\_1, задайте ей 80%-ное положение, как показано на рис. 10.3.1. Мы воспользовались блоками типа **В память** и **Из памяти**, для того чтобы не тянуть канал слишком далеко по схеме.



Рисунок 10.3.1 Подключение ПНД-1 к ДА через блоки В память и Из памяти

Диаметр этому каналу задайте 0.1 м. Остальные свойства можно оставить без изменения (если вы скопировали канал из существующего уже на схеме).

В подпитке воды для ДА добавьте еще слагаемое -Gv\_pnd1, итого получится **Gv\_pvd2-2.3/3.6-Gp\_pnd1-Gv\_pnd1**. Это остающийся небаланс в размере 27.14 кг/с.

Не забывайте у узлов бака ставить такой же гидравлический диаметр, как и у каналов, которые подключены к этим узлам.

Попробуйте запустить задачу на расчет – у вас может увеличиться существенно расход конденсата из конденсатора, т. к. давление на принимающей стороне (в ДА) стало теперь ниже, чем было равновесное давление во внутреннем узле с отбирающей подпиткой. Подберите такое положение задвижки К\_12\_1, которое даст расход на уровне 125 т/ч по тракту главного конденсата.

В нашей модели пришлось поставить задвижку в положение **13.44** %, притом что она стоит на канале с Ду 100, а свойства KsiMin/KsiMax заданы у нее как 1/1e10.

Обратите внимание, что за время подбора положения задвижки уровень в ГК мог уйти сильно вниз (рис. 10.3.2, например), а параметры среды в ДА – существенно снизиться из-за большого расхода холодного конденсата в него. Вам, скорее всего, придется несколько раз перезапускать модель, пока вы не подберете параметры греющего пара в ДА для этой итерации разработки модели. У нас получилось равновесное значение расхода греющего пара, равное +6.6/3.6 кг/с. Обратите внимание, что в начале переходного процесса в ДА подается холодный (не прогретый еще) конденсат, что немного захолаживает ДА, но через время он восстанавливает свои параметры.



Рисунок 10.3.2 Снижение уровня в конденсаторе и его стабилизация при задании положения задвижки К\_12\_1 = 13.5 %

Подбирать расход греющего пара для ДА, в принципе, не обязательно каждый раз. Но сам прием – не подключать ДА по пару к турбине до момента объединения всех остальных частей модели – довольно удобен. Если бы мы подсоединили подачу греющего пара ко II отбору сразу, то ДА забирал бы или меньше, или больше пара, чем нужно, из-за чего отлаженный стационар по проточной части нарушался бы довольно сильно, из-за этого и параметры в подогревателях и конденсаторе тоже уплывали бы, и пришлось бы тратить больше времени на подстройку ДА, так чтобы он не смещал точку равновесия.

Вы можете самостоятельно дополнить таблицу отладки модели опорными расходами конденсата греющего пара из подогревателей и расходом основного конденсата из ГК, который откачивается ГКН'ами, чтобы в более удобном виде следить за текущим состоянием модели и насколько сильно она отличается от номинальных значений, на которые модель настраиваем.

В нашем случае ситуация с расходами после 300 секунд расчета представлена на рис. 10.3.3.

Заланный	Расход пара перед турбиной	Расход пара в I отборе	Расход во II отборе	Расход в III отборе	Расход после турбины
(номинальный)	220 т/ч	18.4 т/ч	66.6 т/ч	10 т/ч	125 т/ч
В модели	220 т/ч	18.208 т/ч	66.613 т/ч	10.505 т/ч	124.67 т/ч
Отклонения	2.8322Е-7 т/ч	-0.19228 т/ч	0.012771 т/ч	0.50527 т/ч	-0.32575 т/ч
	1.2873E-7 %	-1.045 %	0.019176 %	5.0527 %	-0.2606 %

Рисунок 10.3.3 Расходы в модели после подключения ПНД-1 к ДА

Легко видеть, что расходы по некоторым отборам довольно прилично отошли от тех значений, на которые модель была настроена. Это объясняется взаимной увязкой расхода подогревающейся воды и процесса конденсации, который происходит в подогревателях. Пока что выправлять такую ситуацию мы не будем, так как при дальнейшем объединении все равно будут другие отклонения, и лучше уже потом их скорректировать.

# 10.4 Подключение ПВД-3 и ПВД-2 к ДА

По принципиальной тепловой схеме ситуация выглядит так: конденсат от ПВД-3 сливается в ПВД-2, и уже потом объединенный КГП от ПВД-3 и ПВД-2 уходит в деаэратор. Поэтому нам придется внести коррекцию в «типовую подпрограмму» ПВД-2, добавив к ней еще один узел в бак и еще один входной порт.

Исходные данные по трубопроводу между ПВД-3 и ПВД-2 следующие: диаметр Ду100, на нем находятся задвижка К 34 1 и обратный клапан.

Труба от ПВД-2 к ДА имеет Ду150, задвижку К\_33\_1, затем сужение до Ду100 и тоже обратный клапан.

Дальнейшие действия проще всего выполнять копированием существующих блоков на схеме, т. к. в них заданы, в принципе, подходящие нам свойства, а не значения по умолчанию, если брать блоки из библиотеки. Проведите самостоятельно еще один канал между узлом слива ГКП из ПВД-3 (который пока что с подпиткой) и субмоделью ПВД-2. Внутри субмодели ПВД-2 добавьте еще один узел в нижней части бака и входной порт. Соедините все линиями связи и на двух каналах, по которым теперь будет течь КГП из ПВД-3, разместите задвижку и обратный клапан. Удалите подпитку, откачивающую КГП из ПВД-3, а в подпитке для КГП ПВД-2 укажите суммарный расход: -**Gp\_pvd2-Gp\_pvd3**.

Диаметры каналов и диаметр нового отверстия в баке ПВД-2 задайте самостоятельно. Начальное положение задвижке дайте 50 %. После запуска схемы на расчет подберите положение этой задвижки так, чтобы расход через новую трубу стал равен номинальному расходу греющего пара на ПВД-3.

Результат всех усилий должен быть похож на рис. 10.4.1. Обратите внимание, что нам пришлось приоткрыть задвижку до **66.22** %, чтобы получился расход 18.4 т/ч (расход греющего пара при этом 18.2 т/ч). Обратный клапан полностью открыт из-за того, что давление в ПВД-3 больше давления в ПВД-2. Откачка КГП из ПВД-2 теперь идет суммарная с расходом 31.4 т/ч.



Рисунок 10.4.1 Объединение КГП для ПВД-3 и ПВД-2

Теперь этот суммарный расход надо подать в ДА. Так как давление КГП в узле слива из ПВД-2 более 4 атмосфер, узел при этом находится на отметке – 10 м, то этого давления хватает для того, чтобы конденсат самостоятельно заливался в ДА. Действительно, никакого насоса на этой трубе нет – и нам достаточно просто добавить еще 1 канал и завести его в ДА. Скопируйте существующий канал слива из ПВД-2 и проведите его к ДА, лучше это сделать через блоки **В память** и **Из памяти**, см. рис. 10.4.2. Добавьте также задвижку, она потребуется для настройки расхода, и обратный клапан.



Рисунок 10.4.2 Подача КГП от ПВД-3 и ПВД-2 к ДА

Чтобы настроить положение задвижки, в подпитке воды к ДА надо убрать еще сумму двух расходов, численно равных расходам греющего пара на ПВД-2 и ПВД-3, – чтобы ДА не переполнялся. Формула там теперь будет такая:

#### Gv\_pvd2-6.6/3.6-Gp\_pnd1-Gv\_pnd1-Gp\_pvd2-Gp\_pvd3.

Запустите модель на расчет и в процессе расчета подберите положение **K\_33\_1** таким образом, чтобы расход на ДА через нее был равен сумме номинальных расходов греющего пара на ПВД-2 и ПВД-3, а именно (18.4 + 13) = 31.4 т/ч. В нашей модели этого удалось достичь при положении задвижки = 69.05 %.

Приводим результаты расчета по уровням в баках модели и по параметрам пара в ДА на рис. 10.4.3 и 10.4.4.

По рисункам видно, что уровни в баках модели более-менее устойчивы. Изменения в уровне ПВД-2 объясняются изменениями положения задвижки в процессе настройки модели. Но теперь, когда мы стали подавать большое количество относительно горячего конденсата из подогревателей высокого давления (температура воды оттуда составляет около 130 °C), естественно, что параметры в ДА начали расти (рис. 10.4.4). Можно попробовать снизить количество греющего пара на ДА либо подснизить температуру подаваемой воды, которая у нас установлена в 99 °C. Попробуйте там в подпитке задать **90**-градусную воду и посмотреть на результат.



Рисунок 10.4.3 Уровни в баках



Рисунок 10.4.4 Температура в ДА

Анализ поведения уровней в баках модели может подсказать дальнейший ход регулировки схемы задвижками либо коррекцией процессов теплообмена (конденсации) в баках подогревателей. Но давайте выполним еще один шаг объединения моделей – подключим питательную воду и подадим ее в ПВД, а затем уже финально будем настраивать схему на номинальные параметры.

### 10.5 Подключение питательных насосов

Давайте посмотрим на параметры питательной воды. У вас в модели должно быть, что после ПК выходит 104-градусная вода расходом 235 т/ч в граничное условие с давлением 60е5 Па. А в ПВД заходит вода с такой же температурой, но давлением 49е5 Па. Если мы сейчас объединим по этому каналу разные части модели, то давление воды в ПВД повысится на 11 атмосфер, увеличится ее расход, что скажется как на уровнях в ДА, так и на уровнях ПВД. Поэтому сразу объединять эти две модели нехорошо. Кроме того, расход питательной воды сейчас определяет блок подпитки на выходе, и это не самый лучший способ – когда у нас на одном и том же канале будут как насосы, так и блок подпитки, вытягивающий заданный **постоянный** расход. Лучше поставить на выходе питательной воды граничное условие с заданным давлением питательной воды, например **50e5** Па, или заданную ранее константу **Pv\_pvd3** (точного значения мы не знаем). Можете просто перекинуть граничный узел справа в левую (выходную) часть каналов с питательной водой, а правый узел с подпиткой – в левую часть, убрав подпитку. В этот узел вместо подпитки подайте питательную воду с напора ЭПН. Возможно, удобнее будет это сделать блоками **В память** и **Из памяти**, см. рис. 10.5.1.

Попробуйте это сделать самостоятельно и после объединения подобрать новое положение ПК таким образом, чтобы расход не изменился и остался равен **235 т/ч**. В нашей модели этого удалось достичь при положении ПК **16.07** %. Параметры в подогревателях могут немного при этом шаге «поплыть».

Запустите модель на расчет где-то на интервал времени порядка 1000– 1800 секунд (до получаса) и посмотрите на устойчивость расчета. Если ваш стационарный процесс не приводит к сильным изменениям в уровнях баков модели, то модель должна быть способна выдержать полчаса расчета без сильных изменений всех параметров системы. В нашей модели графики уровней повторяют тенденцию рис. 10.4.4, параметры в ДА по температуре стабильны. В вашей модели может получиться что-то немного по-другому, но качественно процесс должен быть похож.



# 11.1 Донастройка отдельных частей модели

Итак, мы имеем дело с моделью ПТУ, выполненной частично. Из несделанного в модели – это потребители пара на теплофикацию, также греющий пар на ДА сделан «с разрывом», через подпитки, хотя тут можно провести еще каналы напрямую. Возврат воды в ДА тоже сделан подпиткой. Остальное, в принципе, выполнено, без других трубопроводов, которые оказывают несущественное влияние на модель (например, ДУУ не выполнено, возможный слив КГП от ПВД в ГК, и еще ряд труб, которые для целей обучения не важны).

И мы получили модель, которая после всех увязок стационарное состояние держит, но недолго. Может быть, 2–3 часа она будет считать нормально, но потом в каком-то из баков кончится вода или он переполнится, и начнется другой переходной процесс.

В нашей модели подогреватель ПНД-1 отбирает на +0.55 т/ч больше пара, чем должен, ПВД-2 на –1 т/ч меньше, ПВД-3 на –0.15 т/ч меньше, чем должны. Это не сильная погрешность, но она приводит к тому, что пара в главный конденсатор идет примерно на 0.6 т/ч больше – 126 т/ч вместо 125, и уровень в нем растет, т. к. насосы откачивают 125 т/ч.

У нас есть ряд настроечных и регулировочных параметров, которыми можно воздействовать на схему для корректировки ее состояния. Это положения тех или иных клапанов – если расходы по линиям не такие, как должны быть. И поправочный коэффициент в баках, которым можно немного улучшить или ухудшить конденсацию, чтобы отбор пара происходил более или менее эффективно. Попробуйте самостоятельно изменять поправочный коэффициент для теплообмена в пучках труб в баках ПНД и ПВД и несколькими итерациями, возможно с перезапуском модели, добиться того, чтобы расходы пара в отборах приблизились к номинальным значениям, а отклонение составило менее 0.5 % от номинала.

В нашем случае мы:

- снизили с 0.8 до 0.75 коэффициент в ПНД-1;
- увеличили с 1.05 до 1.5 коэффициент в ПВД-2;
- увеличили с 1.05 до 1.35 коэффициент в ПВД-3;
- немного скорректировали положение K\_33\_1 до 68.9 %;
- положение К\_3\_1 выставили в **46.1** %;
- температуру воды, подливаемой из подпитки в ДА, увеличили до 95 °C. Хотя это оказалось много, и в итоге остановились на **94.5** °C.

Заланный	Расход пара перед турбиной	Расход пара в I отборе	Расход во II отборе	Расход в III отборе	Расход после турбины
(номинальный)	220 т/ч	18.4 т/ч	66.6 т/ч	10 т/ч	125 т/ч
В модели	220 т/ч	18.372 т/ч	66.541 т/ч	10.039 т/ч	125.05 т/ч
Отклонения	-5.175Е-7 т/ч	-0.027706 т/ч	-0.059047 т/ч	0.038581 т/ч	0.048168 т/ч
	-2.3523E-7 %	-0.15058 %	-0.08866 %	0.38581 %	0.038535 %

Заданное (номинальное)	Абс. давление пара перед турбиной	Абс. давление пара в I отборе	Абс. давление пара в камере регулируемого теплофикацион- ного (II) отбора	Абс. давление пара в III отборе	Давление после турбины
	35 кгс/см <sup>2</sup>	9.2 кгс/см <sup>2</sup>	3.64 кгс/см <sup>2</sup>	0.96 кгс/см <sup>2</sup>	0.05 кгс/см <sup>2</sup>
В модели	35.004 кгс/см <sup>2</sup>	9.2042 кгс/см <sup>2</sup>	3.644 кгс/см <sup>2</sup>	0.96213 кгс/см <sup>2</sup>	0.050929 кгс/см <sup>2</sup>
	0.0037092 кгс/см <sup>2</sup>	0.00424 кгс/см <sup>2</sup>	0.0039785 кгс/см <sup>2</sup>	0.0021303 кгс/см <sup>2</sup>	0.0009291 кгс/см <sup>2</sup>
Отклонения	0.010598 %	0.046087 %	0.1093 %	0.22191 %	1.8582 %

Рисунок 11.1.1 Параметры модели, полученные после корректировок теплообмена в подогревателях

Итоговый процесс принял характер, представленный на рис. 11.1.1, 11.1.2 и 11.1.3. В таблицах видно, что отклонения основных параметров не превышают 0.5 %, кроме давления после турбины, но там очень маленькая база. Уровни в баках и их динамику удалось существенно уменьшить, и они стали не так сильно изменяться во времени. Температура в ДА стабилизировалась после подбора новой равновесной температуры воды, возвращаемой от потребителей.



Рисунок 11.1.2 Уровни в баках



Рисунок 11.1.3 Температура в ДА

### 11.2 Оценка полученного результата,

#### НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАБОТЫ

В таком состоянии модель и расчет являются устойчивыми, соответствующими исходным данным, а модель даже без регуляторов может считать если не неограниченно долго, то достаточно продолжительное время. Отметим, что, кроме уровней в баках, другие параметры модели – расходы, давления, температуры – практически не изменяют своих значений по узлам и иным контрольным объемам (можете вывести какие-то еще параметры на графики), и в системе присутствует стационарный процесс.

Регулирующие клапаны находятся в промежуточных положениях – не в 50 %, конечно, как должны быть в идеальном варианте, но с достаточным запасом хода как в одну, так и в другую сторону.

Что в модели следует делать дальше, если бы мы продолжали над ней работу и у нас были бы все необходимые исходные данные?

- 1. Надо доделать модели потребителей пара из II отбора и возврат сконденсированной воды из них в ДА.
- 2. Добавить канал с регулятором давления пара в ДА, скорее всего из II отбора тоже, и/или от свежего пара.
- 3. Сформировать модель ДУУ, добавить расход величиной 1 т/ч в конденсатор.
- 4. Более тщательно подойти к заданию высотных отметок.
- 5. Добавить точки контроля (датчики) в модель и реализовать как минимум регуляторы уровня для всех баков в системе. Также регулятор давления в ДА и других баках, по необходимости.
- Попробовать провести переходные режимы и отладку модели в других режимах работы. Сделать сравнение результатов, полученных в модели, с какой-то еще информацией – результатами испытаний, другими расчетами.

Пункты 1–4 вы можете проделать самостоятельно, для этого хватит знаний и умений, описанных в методике. Пункт 5 относится уже к реализации и моделированию регуляторов (некоторые будут описаны в следующем подразделе), а пункт 6 по своей трудоемкости превысит объем работы, описанный в настоящей методике. Скорее всего, при выполнении пункта 6 придется корректировать и характеристики ступеней для других режимов работы, и характеристики насосов, возможно, заданные свойства в каналах, узлах и регуляторах.

Скажем еще пару слов про оформление схемы. Надо всегда стремиться к тому, чтобы расчетная схема была красиво оформленной и читаемой другим специалистом без затруднений. На это следует затрачивать дополнительные усилия, но они целесообразны, так как в неряшливо набранной схеме, даже верной математически, очень трудно разобраться и вносить дальнейшие изменения. Надписи и элементы схемы желательно не накладывать друг на друга и делать всегда читаемыми.

На этом учебная методика по созданию модели динамики ПТУ завершена.

Однако сама по себе модель динамики не является достаточной моделью объекта, поскольку реальная паротурбинная установка практически никогда не работает без системы управления. Для полноценного анализа поведения системы необходима еще модель ее системы управления, хотя бы алгоритмической части, измерительных приборов (датчиков) и в части влияния органов управления на турбину.

В этом случае мы уже переходим от автономной модели динамики объекта к комплексной модели, в которой учитывается взаимное влияние действий оператора и автоматики на объект и наоборот – влияние физических процессов, протекающих в объекте, на действия алгоритмов управления и регуляторов.

К сожалению, объем подобной работы выходит далеко за рамки настоящей методики и не может быть пошагово описан за разумное время на нескольких десятках страниц. Постараемся здесь дать исчерпывающие пояснения к подходу создания модели системы управления, реализованному в SimInTech, а также выполним модель нескольких похожих регуляторов, а именно – регуляторов уровней в баках, которые присутствуют в модели.


В созданной модели ПТУ присутствует 5 баков – это главный конденсатор (ГК), деаэратор атмосферный (ДА) и три бака подогревателей ПНД-1, ПВД-2, ПВД-3. В каждом из них в наличии имеется входящий поток пара / пароводяной смеси и/или воды и выходящий поток конденсата. В некоторых баках входных и выходных каналов более двух. В реальной установке, и в математической модели тоже, никогда не будет достигнуто строгого равенства входящего расхода выходящему, а следовательно, всегда уровень сконденсированной фазы в баках будет «гулять» – уходить или вниз, или вверх. Хотя мы старались достичь баланса, с довольно хорошей точностью, но даже в стационарном процессе есть небольшое рассогласование между расходами, которое приводит к изменению уровней в баках. Поэтому для каждого из баков необходим регулятор уровня. Его устанавливают, как правило, на сливе баков в виде регулирующего клапана, чтобы иметь возможность регулировать исходящий из бака расход воды вплоть до полного перекрытия этого расхода, если в бак перестанет поступать греющий пар, например.

Мы рассмотрим подробно реализацию одного такого регулятора и кратко (по аналогии) создание остальных четырех регуляторов.

#### 12.1 Подход SimInTech к созданию комплексных моделей

Возможности SimInTech по созданию комплексных моделей практически не ограничены – потенциально можно набрать комплексную модель электростанции, подводной лодки, самолета или любого другого технического объекта, включая модель системы управления и человеко-машинного интерфейса (т. н. цифровой двойник). Пошаговое руководство по созданию такой модели приведено в справочной системе SimInTech, см. упражнения по созданию комплексной модели в справке: «Начало работы» – «Пошаговые руководства...» – «Комплексная модель на основе теплогидравлической расчетной схемы». Дальнейшее повествование исходит из того, что читатель внимательно ознакомился с указанным пошаговым руководством.

Опишем кратко суть. Комплексная модель любого объекта условно разделяется на несколько частей:

- модель динамики объекта управления (ее мы сделали, в первом приближении);
- типовая модель измерительных приборов (датчиков);
- типовые модели исполнительных механизмов (включая их блоки управления);
- алгоритмическая часть системы управления алгоритмы и регуляторы;
- виртуальные пульты управления, позволяющие осуществлять в удобном оператору виде контроль и управление объектом.

Алгоритмическая часть системы управления на входе имеет показания датчиков с учетом их достоверности и, возможно, управляющие действия оператора с пульта управления; на выходе – команды управления и регулирования, которые идут на блоки управления задвижками, клапанами, насосами и т. д. Блоки управления уже непосредственно управляют приводами задвижек, клапанов и насосов, и последние непосредственно влияют на объект. Настоящий подраздел посвящен именно этой алгоритмической части АСУ. Название «алгоритмическая» условно, оно отражает тот факт, что в модели у нас не будет смоделировано все оборудование АСУ ТП. Не будет моделей кабелей, цифроаналоговых и аналогово-цифровых преобразователей. Мы не будем моделировать токовые сигналы в миллиамперах и/или вольтах, которые чаще всего применяются при реализации АСУ, не будем моделировать другую аппаратуру и преобразователи. Принимаем при этом допущение, что измеренные сигналы и их значения достоверно попадают на входы системы управления, а выходные сигналы корректно уходят на требуемые блоки управления. Все запитано электроэнергией и другими ресурсами и работает без отказов. Конкретная реализация путей прохождения сигналов сейчас нас не интересует.

#### 12.1.1 База сигналов, ее разработка

Для моделирования и совместного расчета модели теплогидравлики и автоматики необходимо общее пространство переменных и их имен, которые будут доступны обеим моделям – как теплогидравлике, так и автоматике.

В SimInTech таким общим местом является файловая база данных сигналов SDB. В базе данных создаются переменные, доступные в процессе расчета всем проектам, которые пользуются данной базой.

Самым оптимальным для большинства проектов способом является расположение базы данных в отдельном каталоге, по аналогии с тем, как мы разместили проект модели ПТУ в своем каталоге (см. подраздел 2.1).

Создайте директорию «C:\turbine\База» и «C:\turbine\ACУ», затем в нашем проекте C:\turbine\Проточная часть\TK-35-38.prt пропишите имя базы данных, как показано на рис. 12.1.1 ("..\База\TK3538.db" – имя файла английскими или русскими буквами – это не принципиально, без кавычек, но с двумя точками), сохраните проект, закройте его и снова откройте – он откроется уже с подключением новой базы сигналов, см. рис. 12.1.2. Подробнее про базу данных и ее подключения написано в пошаговом руководстве [5] в справке, подраздел 4.

🏟 Параметры проекта: C:\turbin	⊵∖Проточн	ая часть\ТК-35	-38.prt	слой: Теплогидравлика	_	×
Параметры расчёта Синхронизация	Рестарт	База данных	Вид	Настройки		
Модуль базы данных проекта	\$(Root)\se	lb.dll				$\sim$
Имя файла базы данных проекта	\База\Т	K3538.db				<b>C</b>

Рисунок 12.1.1 Подключение файла базы данных сигналов

🦃 Simulati	on In Technic	:									
Файл Пра	вка Вид М	Иасштаб	Вставка	Поиск	Сервис	Расчёт	Инс	трументы	Окно	Справка	Кодогенерато
- 🙆 🗋	🖶   🗗	XhI	a x i 1	) t	🕒 🛱 📲		₽	База данны	ых		
Субструкту	ры Теплоги	дравлика	Просмотр	парамет	ров Тели	контроля	, T	Подпись о	бъектов	B	
	2 *				> 02A>> →	12 12		Солдать бл	поки по	таблице	- 1
		9	i Par				<u> </u>	равнить	объекть	l	
🥠 TK-35-38	3.prt						9	Сравнить	проекть	l	
Вид Масш	лаб Режим	и: Редакти	рование					Показать (	списки в	аходов-вых	одов
: : 🔶 🗐 🗊 5	🔊 🔻 Теплог	илравлика			- A -			Информа	ция о фа	айле проек	та
							*	Графичес	кий реда	актор	
Ви	иодели:		9.088	кгс/сі	12	3.54		Редактор г	перевод	a	
			0.110		2	0.000		Сервер уд	алённог	о расчёта	
0-			-0.112	кгс/с	M- /	-0.098		Настройка	а утилит		
💷 Редакт	гор базы дан	ных сигна	лов C:\tu	rbine\Баз	a\TK3538.c	lb		Редактор т	габлиц		
Редактор	Настройки	Состояние	е сети					Генератор	свойст	в газов для	TPP
N≏	Категории		N	2	Группы сиг	налов	1	Калькулят	ор		
			1					Транслите	рация		F
								Калькулят	ор свой	ств воды и	пара
								Сгенериро	овать пр	ограмму	
								Редактор о	файла б	азы данны:	x
							_				

Рисунок 12.1.2 База сигналов к проекту подключена

Теперь создайте новый проект общего вида, сохраните его в каталог «C:\turbine\ACУ» с именем C:\turbine\ACY\ACY.prt и проделайте аналогичные манипуляции с ним для подключения этого проекта к нашему файлу базы данных сигналов. После этого сохраните данный проект (он еще пустой), закройте и снова откройте, чтобы убедиться, что база сигналов к нему подключена (она тоже пока еще пустая), и закройте все проекты.

Далее нужно создать пакет проектов (новый), который сохраните в каталоге проекта, в файл с именем, например, C:\turbine\Пакет.pak. Пакет создается в пункте главного меню Файл → Новый проект → Пакет. Далее в этот пакет добавьте проект автоматики и проект теплогидравлики, сохраните пакет, а результат сравните с рис. 12.1.3.



Рисунок 12.1.3 Новый пакет проектов Пакет.рак и его проекты

Шаг синхронизации между проектами пакета – в SimInTech сделано так, что разные проекты в пакете синхронизируются с тем шагом, который указан в первом проекте пакета. Проверьте параметры расчета для проекта автоматики и проставьте там метод интегрирования **Эйлера**, а шаги задайте равными 0.01 секунды, аналогично максимальному шагу расчета в проекте теплогидравлики.

Іараметры расчёта	Синхронизация Рестар	от База данных	Вид			
Название	аметры	Имя	Формула	Значение		^
Минимальн	ый шаг	hmin	0.01	0.01		
Максималы	ный шаг	hmax	0.01	0.01		
Начальный	шаг интегрирован	startstep		0		
Метод инте	грирования	intmet		Эйлера		
Начальное	время расчёта	starttime		0		
Конечное в	ремя расчёта	endtime	1e19	1E19		
Относитель	ная ошибка	relerr	1e-4	0.0001		
Абсолютная	я ошибка	abserr	1e-6	1E-6		
Относитель	ная ошибка сравн	time_rel_e		1E-12		
🖽 Генерация код	la					
🖃 Управление ра	асчётом					
Шаг синхро	низации задачи	synstep	0.01	0.01		

Рисунок 12.1.4 Настройки синхронизации и расчета проекта автоматики

Таким образом, мы создали новый пакет (комплексную модель) и настроили на совместный расчет два проекта, с общей базой сигналов и тактом обмена сигналами, равным 0.01 с = 10 мс. Возможно, это слишком высокая частота обмена, можно задать и 0.025 секунды или 0.05 секунды.

В чем смысл базы данных в нашем случае? Некоторые расчетные величины (например, уровни в баках) нам будет необходимо передавать в проект автоматики. И наоборот, некоторые расчетные величины из проекта автоматики (например, положения клапанов регуляторов уровней) надо будет передавать из модели двигателя клапана в модель теплогидравлики. Для этого мы создадим в базе данных соответствующие переменные, которые будем определять в месте их расчета в проектах и записывать новые значения в базу данных. А в нужном месте, где требуется их использовать, будем считывать из базы данных значения переменных. Можно думать о базе данных как об общей глобальной разделяемой памяти, доступной проектам пакета. При этом надо следить, конечно, чтобы каждый сигнал (переменная) базы данных определялся строго в одном месте.

#### 12.1.2 Датчики, добавление в базу и в модель

Закройте пакет и переоткройте его заново, чтобы база данных корректно загрузилась в память для обоих проектов пакета.

По аналогии с руководством [5] создайте в базе данных категорию «Датчики» с шаблоном из 5 вещественных сигналов **xq01**, **xq02**, **k**, **xmin**, **xmax**, см. рис. 12.1.5. Это будут: сигнал из модели в единицах измерения модели, потом сигнал в единицах измерения датчика, переводной коэффициент и минимуммаксимум точки контроля, ограничивающие показания. Мы создадим только датчики уровня, поэтому нам хватит этих пяти сигналов для каждого датчика. Важное примечание: поскольку в пакете первым идет проект автоматики, лучше базу данных редактировать из-под него, для этого надо сделать его активным и затем перейти к редактированию базы данных. После редактирования требуется сохранить проект, тогда сохраняется и файл базы данных.

Модель датчика будет следующая: все датчики как приборы будут измерять уровни в баках в миллиметрах (это будет уходить в АСУ), но уровень в коде НЅ вычисляется в метрах, поэтому переводной коэффициент у всех датчиков будет равен 1000. Минимум и максимум установите пока в 0 и в 10000 (мм). Шаблон имени групп задайте одной буквой L (на рисунке не показано).

ктор	Настройки Сос	стояние сети							
	Категории		N≏	Группы сигналов	Гр	oynna	Сводная		
0	Датчики					lō	Имя	Название	
👍 Pe	дактор категори	и							
	liture				_				
ΝQ	имя	названи	le		Тип данны	ых	Формула	Значение	Способ расчёт
Nº 1	имя xq01	Расчет	е гное зна	чени из модели	Тип данны Веществ	ых зен	Формула	Значение О	Способ расчё Переменная
1 2	xq01 xq02	Расчет Показа	е гное зна ания да	чени из модели тчика, е.и.	Тип данны Веществ Веществ	ых зен зен	Формула	Значение О О	Способ расчё Переменная Переменная
1 2 3	хq01 хq02 k	Названи Расчет Показа Коэфф	<sup>1е</sup> гное зна ания да <sup>-</sup> ициент	чени из модели гчика, е.и. перевода в е.и.	Тип данны Веществ Веществ Веществ	ых зен зен	Формула 1000	Значение О О 1000	Способ расчё Переменная Переменная Константа
1 2 3 4	xq01 xq02 k xmin	Названи Расчет Показа Коэфф Миним	<sup>1е</sup> гное зна ания да <sup>-</sup> ициент ум, е.и.	чени из модели тчика, е.и. перевода в е.и.	Тип данны Веществ Веществ Веществ Веществ	ых зен зен зен зен	Формула 1000 0	Значение О О 1000 О	Способ расчё Переменная Переменная Константа Константа

Рисунок 12.1.5 Категория Датчики

Создайте в данной категории 5 групп сигналов с именами LGK, LDA, LP1, LP2, LP3, что сокращенно обозначает: L – уровень, а следующие две буквы ГК, ДА, Подогреватели-1,2,3 соответственно. Этим действием мы создали в базе данных (а значит, и в комплексной модели) новые 5 × 5 = 25 сигналов, или глобальных переменных, с именами LGK\_xq01, LGK\_xq02, LGK\_k... и т. д. Теперь

ими можно пользоваться. Если бы мы знали кодовые обозначения точек контроля из проекта, то воспользовались бы ими. Сохраните проект автоматики (в котором редактировали базу). Перейдите к проекту теплогидравлики.

Для того чтобы те или иные расчетные значения кода HS попадали в базу данных сигналов, используется специальный блок типа «точка контроля». Их существует несколько, заранее подготовленных. Воспользуемся одним из них, а именно **HS** – **Датчик универсальный**. Это самый первый блок на вклад-ке **Точки контроля**.

Разместите его на баке ДА на расчетной схеме – и увидите надпись в окне отладки «Сигнал с указанным именем не найден в базе данных в объекте Sensor\_1». Ошибка произошла из-за того, что по умолчанию библиотечный блок настроен на имя сигнала «**Sensor\_0\_xq01**», но в нашей базе нет такого сигнала. Датчик необходимо перенастроить. Зайдите в свойства размещенного блока и укажите там имя блока = LDA, группа сигналов в БД тогда станет тоже равна **LDA**, показание датчика – равным **Parent.\_level** (датчик при этом будет считывать текущий уровень в своем родительском блоке, то есть в баке), а имя сигнала в БД = **"xq01"**, с кавычками, если записывать в строке формулы, т. к. тип данных здесь – строка. Сделайте и сравните с рис. 12.1.6. Этим блоком можно считывать любой параметр любого блока на расчетной схеме теплогидравлики и записывать значение в любую категорию с любым именем.

LDA 6.53 Ф Свойства: LDA		r/c]=35.2 /ч]=127	
Свойства Общие Визуальные сло	и		
Название	Имя	Формула	Значение
Показание датчика, е.и.	value	Parentlevel	6.5313325
Имя группы сигналов в БД	group_name	Self.Name	LDA
Имя сигнала в БД	signal_name	"xq01"	xq01
<sup>⊞…</sup> Оформление			

Рисунок 12.1.6 Настройка датчика уровня в ДА

Аналогично вам требуется настроить остальные четыре датчика – все их настройки будут идентичны, с точностью до имен блоков. Имена задавайте такими же, какие мы сделали имена у групп сигналов датчиков в базе данных.

После простановки датчиков на схему сохраните ее. При этом вероятно появление вопроса, аналогичного рис. 12.1.7, – ответить следует утвердительно, т. к. вы добавили новые сигналы в базу и ее размер увеличился.



Рисунок 12.1.7 Сохранение базы данных

Разместите в схеме автоматики 5 блоков типа **Чтение из списка сигналов**, задайте им имена LDA\_xq01, LDA\_xq01, LDA\_xq01, LDA\_xq01 и LDA\_xq01, проведите 5 линий связи и оборвите их, проинициализируйте пакет и сделайте дватри расчетных шага для пакетного расчета. Результат сравните с рис. 12.1.8.



Рисунок 12.1.8 Получение сигналов в схеме автоматики из базы данных

У вас должно получиться следующее: каждый из блоков датчиков, размещенных в схеме теплогидравлики, на каждом шаге расчета записывает текущее значение уровня в баке в свой сигнал. В схеме автоматики происходит чтение этих сигналов из базы данных и передача их на линии связи (дальше пока сигналы никуда не идут). Этим мы проверили сразу два факта: что база данных настроена корректно и подключена к обоим проектам, блоки датчиков размещены верно (все показания видим численно разные) на теплогидравлической схеме, и передача значений сигналов идет корректно. По нашей простой модели датчика (задуманной при создании сигналов в категории **Датчики**), над этим сигналом, передаваемым в метрах, следует провести простую обработку – умножить на коэффициент усиления для перевода в единицы измерения датчика, миллиметры, а затем ограничить показания верхним и нижним пределами датчика. Остановите расчет пакета и сделайте это для первого датчика, как показано на рис. 12.1.9.



Рисунок 12.1.9 Простейшая модель датчика

При этом коэффициентом усиления будет служить сигнал LDA\_k – его следует задать в блоке Усилитель, а пределами в блоке типа Ограничитель будут сигналы LDA\_xmin, LDA\_xmax.

Выход этого блока записываем в базу сигналов с именем LDA\_xq02 при помощи блока Запись в список сигналов.

Такую же относительно простую обработку можно сделать и для других 4 датчиков, задавая в каждом соответствующие имена переменных (сигналов). Но если бы в проекте была сотня, или несколько сотен, или несколько тысяч точек контроля, пришлось бы делать копирование, вставку и изменение одинаковой процедуры многократно? Нет, в SimInTech есть удобный механизм, которым можно типовую обработку сигналов описать шаблонным образом, как типовую подпрограмму, и многократно ее использовать. Это делается при помощи блока **Субмодель** и вынесения внутренности субмодели в отдельный файл.

Называется такой прием «типовая подпрограмма», «типовая субмодель», «компонент», бывают и другие названия. В общем, по аналогии с процедурой в языках программирования и/или по аналогии с моделью главного конденсатора в теплогидравлике, это один раз описанный алгоритм, который вызывается многократно с разными входными и выходными переменными. В SimIn-Tech это сделано в графическом виде.

#### 12.1.3 Типовая подпрограмма

Создадим типовую подпрограмму для датчика нашего проекта на основе созданной простой программы первого датчика.

Закройте пакет, откройте индивидуально проект **ACУ.prt**, оставьте там только то, что касается первого датчика, и сохраните все в файл с именем **C**:\ **turbine\Подпрограммы\Датчик.prt**. Закройте его.

Откройте снова проект **ACY.prt**. Разместите в нем блок типа **Субмодель**, в общем свойстве этого блока **Имя файла субмодели** задайте строку «..**\Подпрограммы\Датчик.prt**» (можно воспользоваться пунктом выбора файла там же в строке этого свойства). Задайте стиль подписи у субмодели равным **Имя**, как показано на рис. 2.1.10, тогда на схеме под субмоделью всегда будет отображаться текущее имя этого блока. Сделаем дальше привязку подпрограммы к имени субмодели, поэтому будет важно всегда видеть это имя на схеме.

	Ф Свойства: Масто5			-
	Общие Визуальные слои			
- /	Название Подпись блока	Имя LabelText	Формула	Значение
зб Режим: Ридак	Шрифт подписи блока	LabelFont		Cambria
• 🔻 Автомати (а	Выравнивание подписи	LabelAlign		Посередине
+ - / +	Стиль подписи	LabelStyle		Имя
+ F	Прозрачный фон	Trasparent		Пнет
••	Сохранять пропорции	Proportional		⊠да
Macro5	Зеркально отразить	Mirror		Пнет
	Анимированный	Animated		Пнет
LDA_xq	Чувствительность к действиям мыш	Sensible		Пнет
	Графическое изображение	Graphics		20202 20202 20202
LGK_xq	Послойная прозрачность	LayeredOp		Пнет
	Не масштабировать изображение	NotChange		Пнет
LP1_xq	Пересчитывать скрипт всегда	RecalcAlways		Пнет
	Режим показа подписей портов	ShowPortN		Внутри блока всегда
LP2_xq	Шрифт подписей портов блока	ShowPortN		Tahoma
	Цвет фона субмодели	ModelColor		16777215
LP3_xq	Закрыть субмодель	Locked		Пнет
	Имя файла субмодели	FileName		\Подпрограммы\Датчик.prt

Рисунок 12.1.10 Оформление субмодели

Для того чтобы указанное имя файла субмодели заработало, надо сохранить, закрыть и снова открыть файл **ACY.prt**. Теперь внутри субмодели будет находиться содержимое файла **Датчик.prt**, и у нас оказалось, что в проекте обработка первого датчика производится как бы два раза. Удалите обработку, которая сделана снаружи субмодели, – она теперь не нужна.

Задайте имя блока субмодели равным «LDA», а имя класса измените, например, на «Подпрограмма датчика», как представлено на рис. 12.1.11.

缔 Своі	🦃 Свойства: LDA — 🗆 🗙								
Общие	Визуальные с	лои							
Назван	ие	Имя	Формула	Значение					
Имя об	іъекта	Name		LDA		^			
Тип эл	емента	ClassName		Подпрограмма	датчика				
Подска	зка	Hint							

Рисунок 12.1.11 Свойства субмодели с подпрограммой датчика

Теперь в нашей подпрограмме надо вместо жестко заданных имен сигналов задать шаблон имен, привязав их к имени субмодели. Это делается при помощи ключевого слова **submodel**, так же, как мы делали это в теплогидравлике при разработке субмоделей баков. Тут есть не очень удобный нюанс – если открывать отдельно файл **Датчик.prt**, то у него никакой субмодели нет, и скрипт, который будем далее писать, будет выдавать ошибку. Поэтому разработку подпрограммы, вынесенной в отдельный файл, лучше вести в составе другого проекта (**ACY.prt** в нашем случае). Но чтобы сохранить именно файл субмодели, надо выбирать пункт главного меню **Файл** → **Сохранить страницу**, находясь внутри субмодели, ссылающейся на внешний файл.

Перейдите внутрь субмодели LDA.

Давайте попробуем изменить имя в блоке **Чтение сигналов** и убедимся сначала, что весь механизм работает так, как нам требуется. Задайте в свойствах этого блока для **Имена сигналов** в колонке **Формула** строку **Submodel.Name** + "\_**xq01**", как показано на рис. 12.1.12. При этом формула проинтерпретируется, значение данного свойства не должно измениться.

🏟 Свойства : SignalReader5		-	- 🗆	×
Свойства Общие Порты Визуальные	е слои			
Название Имена сигналов	Имя signals	Формула Submodel.Name + "_xq01"	Значение LDA_xq01	
Рассчитывать с задержкой на шаг	stepdelay		Нет	
Автосброс	f_command		Нет	

Рисунок 12.1.12 Задание шаблона имени сигнала

Находясь внутри субмодели, выберите пункт меню **Файл** → **Сохранить страницу**, затем перейдите на уровень выше и скопируйте/вставьте полученную субмодель, чтобы на схеме получилось две субмодели. Задайте для второй субмодели имя блока **LGK**.

Проинициализируйте проект, убедитесь, что внутри второй субмодели проставилось имя LGK\_xq01, а не LDA\_xq01. Для этого лучше зайти в свойства блока и посмотреть там. Примечание: блоки типа **Чтение из списка сигналов**  и Запись в список сигналов по умолчанию сделаны неанимированными в SimInTech, для ускорения перерисовки проектов, где таких датчиков стоят тысячи. Это означает отсутствие их перерисовки в процессе расчета, в том числе и при инициализации. Как они загрузились из файла проекта с подпрограммой, с таким изображением они и остаются. Из-за этого у вас при первой инициализации не изменится внешне отображаемое на блоках имя сигнала. Чтобы оно тоже поменялось, надо переключить общее свойство Анимированный у этих блоков в Да, затем пересохранить подпрограмму датчика, переоткрыть снова проект ACУ.prt и проинициализировать его. После этого внешне отображаемое на блоках имя сигнала придет в соответствие с тем, что реально проставлено в свойствах блоков.

Проделайте аналогичную трансформацию по другим блокам, а именно:

- в усилителе вместо LDA\_k запишите {Submodel.Name}\_k;
- в ограничителе вместо LDA\_xmin запишите {Submodel.Name}\_xmin;
- в ограничителе вместо LDA\_xmax запишите {Submodel.Name}\_xmax;
- в выходном блоке (записи в список сигналов) вместо LDA\_xq02 запишите Submodel.Name + "\_xq02".

Отличия в форме записи формул обусловлены разным типом данных в блоках. У чтения и записи сигналов формируем строку, а у математических блоков надо сформировать имя сигнала (переменной), а не строку с именем сигнала. Вместо того что записано в фигурных скобках, препроцессор SimInTech подставит имя субмодели, а уже потом интерпретатор считает из базы данных переменную, имя которой получится.

После этого обязательно сохраните именно проект подпрограммы и переоткройте заново **ACY.prt**. Для проверки работоспособности всего зайдите в базу данных и по каждому датчику задайте разные максимальные значения (например, для проверки, 9000, 8000, 7000, 6000, 5000 мм).

Размножьте субмодели копированием и вставкой, сделайте их 5 штук, то есть добавьте еще три с именами LP1, LP2, LP3. Проинициализируйте проект и убедитесь, что в блоках-ограничителях внутри пяти субмоделей автоматически подхватились разные максимумы, заданные вами в базе данных.

Если что-то не получилось, перепроверьте все сделанные ранее шаги и найдите огрехи. Теперь у нас по одному и тому же простому алгоритму (или модели) обрабатываются все 5 датчиков.

#### 12.1.4 Модификация типовой подпрограммы датчика

Мы сделали довольно простую первую подпрограмму. Следует сказать, что это не единственный способ создавать типовую обработку какой-либо категории базы данных. В руководстве [5] описан другой, векторный способ обработки. В таком способе реализуется не внешний файл и его многократное использование, а один алгоритм в составе проекта, тоже, как правило, в субмодели, по которому в векторизированном формате обрабатывается сразу много групп сигналов какой-либо категории. У каждого способа есть свои плюсы и минусы. Выбранный нами способ более понятен и удобен для отладки – мы будем видеть каждый датчик индивидуально. В векторном способе отладка затруднительна, но он более быстр для расчетов.

Что следует добавить для датчика? Как правило, от модели датчика требуется перевод единиц из одних в другие – мы это сделали (правда, не до конца), ограничение сверху и снизу (сделали), а также требуется возможность задания инерционности для датчика (это не сделано). Дополним шаблон категории **Датчики** в базе сигналов еще двумя сигналами – смещение в единицах измерения датчика **b** и постоянная времени **T** в секундах, см. рис. 12.1.13.

Дополнив этими сигналами категорию, теперь мы сможем в модель датчика (в типовую подпрограмму) добавить инерционность и выходной сигнал вычислять не по формуле  $xq02 = k \cdot xq01$ , а по формуле  $xq02 = k \cdot xq01 + b$ . Для датчиков уровня это может оказаться полезным, потому что точка врезки датчика уровня в бак может не совпадать с уровнем дна бака, а отстоять от него на каком-то расстоянии по высоте. В реальных системах смещением (или какойлибо другой нормировкой) также калибруют датчики, чтобы сигнал, полученный в миллиамперах, в своем диапазоне минимум-максимум преобразовать в единицы измерения в другом диапазоне чисел.

Зайдите в какую-либо субмодель и отредактируйте подпрограмму датчика в соответствии с описанием ниже.

⊿ Реда	актор катег	гории				
Имя кат	егории Д	атчики	Шаблон им	ени групп		
N♀	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	xq01	Расчетное значени из модели	Вещественное		0	Переменная
2	xq02	Показания датчика, е.и.	Вещественное		0	Переменная
3	k	Коэффициент перевода в е.и.	Вещественное	1000	1000	Константа
4	xmin	Минимум, е.и.	Вещественное	0	0	Константа
5	xmax	Максимум, е.и.	Вещественное	10000	10000	Константа
6	b	Смещение, е.и.	Вещественное	0	0	Константа
7	Т	Постоянная времени, с	Вещественное	1	1	Константа

Рисунок 12.1.13 Добавление двух новых сигналов в категорию Датчики

Вам потребуется вместо усилительного звена поставить инерционное (апериодическое) звено первого порядка – этот блок может одновременно и усиливать, и организовывать инерцию при передаче сигнала со входа на выход. Добавьте сумматор и константу b на втором входе сумматора. Задайте свойства блоков по аналогии с заданием ранее. У апериодики: **{Submodel.Name}\_k**, **{Submodel.Name}\_T** и **{Submodel.Name}\_xq01**. У константы: значение как **{Submodel.Name}\_b** и название как **"b"**.

Сохраните файл подпрограммы!

Переоткройте проект **ACY.prt**. Проинициализируйте его, убедитесь, что никаких ошибок нет. Для проверки работоспособности подпрограммы датчика проделайте такую простую процедуру – постройте график, на который выведите, например, сигналы LP1\_xq01 и LP1\_xq02, а также LP2\_xq02 и LP2\_xq02, как показано на рис. 12.1.14. У датчика LP2 задайте в базе данных инерционность 5 секунд, например.



Рисунок 12.1.14 Проверка подпрограммы датчика

Запустите проект на расчет с синхронизацией с реальным временем (выставите это в параметрах расчета на отдельной вкладке). В процессе моделирования зайдите в базу данных и задайте входной сигнал LP1\_xq01 равным 2 м, а затем LP2\_xq01 равным 2 м. Затем задайте снова нулевые показания для xq01 у обоих датчиков. Пронаблюдайте изменение входных сигналов, мгновенно преобразованных в миллиметры, и выходных сигналов датчиков LP1\_xq02 и LP2\_xq02 на графике, сравните с рис. 12.1.15, проанализируйте самостоятельно влияние инерционности в модели датчика на показания датчика.

Верните обратно к 1 секунде инерционность у датчика LP2. Сохраните проект и базу данных. График можно оставить для будущих отладок (можно его нарастить и вывести все 5 уровней на график).



Рисунок 12.1.15 Тестовое сравнение двух датчиков с разной инерционностью

В действительности уровень в баке не будет меняться так сильно и скачкообразно, конечно, только в случае какой-то сильной течи. В зависимости от конструкции уровнемера инерция может быть значительной, и система управления не всегда почти мгновенно (или хотя бы с запаздыванием в 1–2 секунды) может видеть реальный уровень в баке – это следует иметь в виду при проектировании систем управления. Вообще, чем больше инерционность датчика и длительнее запаздывание в контурах прохождения сигналов от объекта к системе управления (СУ), тем менее устойчивую систему регулирования можно построить. Следует стремиться к снижению временных издержек. Но если уж сам датчик обладает инерционностью (термопара, например, или измерение температуры стенки – инерция есть у стенки), тогда это следует учитывать при разработке регуляторов и алгоритмов, реагирующих на показания датчиков.

Резюме по подразделу: мы создали базу данных, категорию сигналов и сами сигналы для уровнемеров, типовую подпрограмму для датчиков проекта, проверили ее и отладили автономно, подавая вручную входные тестовые сигналы.

Можете самостоятельно запустить на расчет пакет и посмотреть, что будет отображаться на графике, когда входные сигналы на датчики будет предоставлять модель ПТУ. В нашем случае в одном из расчетов получился график как на рис. 12.1.16. У вас может получиться какой-то свой график, но запаздывание выходного сигнала и первоначальный выход датчика на рабочее показание (в первые 4–5 секунд расчета) должны быть аналогичными.



Рисунок 12.1.16 Проверка работы подпрограммы датчика с моделью объекта

#### 12.2 Перечень и описание основных регуляторов ПТУ

Рассмотрим кратко все основные регуляторы, которые должны быть реализованы в подобной паротурбинной установке. Другие алгоритмы управления и системы защиты ПТУ в данной методике не рассматриваются. Хотя, в принципе, в динамической модели можно реализовать большинство алгоритмов, защит и блокировок, таких как защита по частоте вращения ротора, по падению вакуума в конденсаторе, по давлению в системе смазки и др.

#### 12.2.1 Регулятор расхода питательной воды

Регулятор расхода питательной воды представляет собой один или несколько питательных клапанов, установленных параллельно за последним из подогревателей, то есть за ПВД-3. По датчику расхода питательной воды данный регулятор управляет питательными клапанами и изменяет подачу питательной воды в реакторную установку (в парогенераторы). На данный регулятор могут быть наложены изменения на скорость регулирования, т. к. от подачи питательной воды может меняться мощность в реакторной установке, и слишком быстро этого делать нельзя. В нашей модели, чтобы реализовать такой регулятор, пришлось бы доделать несколько каналов и поставить на них клапаны, между выходом из ПВД-3 и выходным граничным условием.

В зависимости от проекта часто система регулирования расхода питательной воды должна обеспечивать совместную и раздельную работу реакторной установки и турбоагрегата. При совместной работе предусматривается автоматическое поддержание паропроизводительности РУ в зависимости от нагрузки ТА, тогда регулятор обеспечивает запас паропроизводительности РУ и его автоматическое поддержание, воздействием на расход питательной воды по положению клапана травления пара в главном конденсаторе. При раздельной работе РУ и ТА предусматривается независимое задание паропроизводительности, то есть должен автоматически поддерживаться расход питательной воды. Каждая из двух (трех) ветвей питательной воды должна обеспечивать до 100 % расхода питательной воды. Налагаются также и другие требования.

Как видим, разработка регулятора требует индивидуального кропотливого подхода к его алгоритму. Такой объем моделирования выходит за рамки учебной методики.

#### 12.2.2 Регулятор давления пара в концевых

#### уплотнениях турбины

Данный регулятор поддерживает давление пара в уплотнениях за счет подвода свежего пара в линию запирания уплотнений (в режимах пуска, останова или холостого хода турбины) или сбрасывает из линии запирания уплотнений пар в конденсатор (на основных энергетических режимах) через регулирующий клапан шиберного типа. Таким образом, работа данного регулятора зависит от текущего режима работы ПТУ. Также регулятор имеет минимум два исполнительных механизма.

#### 12.2.3 Регулятор давления пара на деаэратор

В модели мы сделали подвод греющего пара на ДА через подпитку. Но в действительности греющий пар должен отбираться либо из второго отбора, либо из других мест турбины. В данном проекте это может быть сделано минимум из трех точек, а именно: система должна обеспечивать поддержание давления пара, подаваемого на деаэратор атмосферный, при подаче пара от отбора № 2 (среднего давления) ТА или от отбора № 1 (высокого давления) ТА, или от магистрали вспомогательного пара.

Таким образом, у данного регулятора будет минимум три исполнительных механизма, и должна быть некоторая логика работы в виде отдельного алгоритма или электронного устройства управления, осуществляющего выбор того или иного пути подачи пара.

### 12.2.4 Регулятор давления пара перед опреснительной установкой, регулятор давления пара от вспомогательного котлоагрегата на хозяйственные и бытовые нужды

Эти два регулятора специфические именно для данной турбины и довольно простые – один датчик и один клапан, регулирующий давление после себя. Поддержание регулируемого параметра осуществляется за счет изменения подачи пара через регулятор. Эти два регулятора можно было бы довольно просто смоделировать, аналогично тому, как мы сделаем регуляторы уровней в баках. Но так как опреснительной установки и вспомогательного котлоагрегата в учебной модели нет, то не будем их делать.

### 12.2.5 Регулятор уровня в деаэраторе

Поддержание регулируемого параметра осуществляется за счет подпитки главного конденсатора из уравнительной цистерны питательной воды при понижении уровня в деаэраторе и сброса конденсата из напорной магистрали конденсатных насосов в уравнительную цистерну при повышении уровня в деаэраторе.

В разработанной модели уравнительной цистерны нет, а уровень (в принципе) можно регулировать, изменяя расход подпитки – можно как вручную, так и при помощи написанного специально для подпитки модели регулятора.

## 12.2.6 Регулятор уровня конденсата в ПНД-1

Поддержание регулируемого параметра осуществляется за счет изменения слива конденсата из подогревателя через регулирующие клапаны по двум линиям: в деаэратор с помощью сливного насоса ЭКНС через основной и в конденсатор через дополнительный регулятор. Подключение дополнительного регулятора осуществляется автоматически по сигналу верхнего уровня в ПНД-1.

В нашей модели реализован только основной регулятор (клапан), для него и будем делать регулятор уровня в ПНД-1.

## 12.2.7 Регулятор уровня конденсата в ПВД-2

Поддержание регулируемого параметра осуществляется за счет изменения слива конденсата из подогревателя в деаэратор через регулирующий затвор.

То есть, с точки зрения регулирования, регулятор аналогичен регулятору уровня в ПНД-1.

## 12.2.8 Регулятор уровня конденсата в ПВД-3

Поддержание регулируемого параметра осуществляется за счет изменения слива конденсата из подогревателя ПВД-3 в ПВД-2 через регулирующий затвор.

### 12.2.9 Регулятор уровня конденсата в конденсаторе

Поддержание регулируемого параметра осуществляется за счет изменения расхода конденсата в сеть и на рециркуляцию в конденсатор, подводимого к регулирующему клапану шиберного типа по двум линиям: непосредственно от конденсатных насосов и через охладители эжекторов. Модели эжекторов у нас нет, а вот рециркуляцию сделать потенциально можно.

# 12.2.10 Регуляторы уровня конденсата в основных подогревателях промежуточного контура и в пиковом подогревателе

Поддержание регулируемого параметра осуществляется за счет изменения слива конденсата в деаэратор из подогревателя через регулирующий затвор.

### 12.2.11 Регулятор уровня в цистерне сбора конденсата

Поддержание регулируемого параметра осуществляется за счет изменения расхода конденсата, подаваемого конденсатными насосами в уравнительную цистерну ПГНД и ВКУ.

# 12.2.12 Регулятор температуры воды промежуточного контура на выходе из основных подогревателей промежуточного контура

Поддержание регулируемой температуры воды на выходе из подогревателей промежуточного контура осуществляется за счет изменения расхода пара, подаваемого в подогреватели от регулируемого отбора пара турбоагрегата.

# 12.2.13 Регулятор температуры воды промежуточного контура на выходе из подогревателя пикового

Поддержание регулируемой температуры воды на выходе из пикового подогревателя осуществляется за счет изменения расхода пара, подаваемого в подогреватель от магистрали главного пара.

# 12.2.14 Температура конденсата перед конденсатными насосами ПГНД

Поддержание регулируемой температуры конденсата осуществляется за счет изменения расхода забортной воды, подаваемой в охладитель конденсатов и сбрасываемой за борт.

# 12.2.15 Частота вращения ротора и электрическая мощность ТГ

Регулятор должен обеспечивать:

- а) автоматическое поддержание заданной частоты вращения ротора турбины при автономной работе, во всем диапазоне возможного изменения нагрузки генератора, а также при пуске ТА и работе без нагрузки;
- б) автоматическое поддержание заданной электрической мощности при работе в общую электрическую сеть;
- в) удержание турбины на частоте вращения ниже уставки защиты при сбросах нагрузки с выходом на режим холостого хода;
- г) возможность параллельной работы ТА с дизель-генераторами и береговой сетью.

# 12.2.16 Давление свежего пара ПТУ (основной и резервный регуляторы)

Регулятор должен обеспечивать:

- а) автоматическое поддержание давления пара перед ПТУ за счет изменения расхода пара в конденсатор через дроссельно-увлажнительное устройство (ДУУ) системы травления на установившихся режимах и при 100%-ных сбросах и набросах нагрузки ТА; подача воды в ДУУ на увлажнение пара осуществляется от конденсатных насосов через водораспределительное устройство, в количестве, пропорциональном расходу пара (положение клапана травления);
- б) отключение системы травления по пару, в случае ее отказа осуществляется дистанционным закрытием клапанов на подводе пара к клапанам травления.

### 12.2.17 Давление пара в отборе ТА

Регулятор должен обеспечивать:

- а) автоматическое поддержание давления пара в теплофикационном отборе за счет воздействия на регулирующие клапаны части высокого давления ЧВД и регулирующую диафрагму на входе в часть низкого давления (ЧНД);
- б) включение регулятора производится при мощности не менее 30 % Nном (дистанционным выключателем отбора).

### 12.2.18 Другие (локальные) регуляторы

Кроме перечисленных регуляторов, в состав ТА входят также контуры локальных систем (элементов) регулирования. Например, маслосбрасывающий клапан на линиях нагнетания ПМН, СМН, на линии нагнетания масла перекачивающего насоса НП. Уровень воды в корпусе ПГНД, давление вторичного пара ПГНД, температура охлаждающей воды опреснительной установки, температура питательной воды опреснительной установки и др. Как видно, даже просто перечисление регуляторов с краткими комментариями их работы – довольно объемный перечень. Реализация же всех регуляторов, проверка их совместной работы, тестирование на устойчивость, на отсутствие взаимной раскачки регуляторов – довольно объемный и творческий процесс, не поддающийся пошаговому описанию.

В настоящей методике выберем сходные по своей работе регуляторы – регуляторы уровней в баках смоделированной части ТА – и реализуем их в следующих подразделах.

Для сравнения приведем пример реализации алгоритмов и регуляторов для ТА другого проекта. Все регуляторы и алгоритмы обычно структурируются по группам оборудования и/или по функциональному смыслу и раскладываются в отдельные субмодели (листы) в SimInTech, см. рис. 12.2.1.



Рисунок 12.2.1 Пример проекта регуляторов турбинного отделения

Внешнее оформление алгоритмов в SimInTech может быть практически любым – при помощи субмоделей и типовых графических примитивов (линий, окружностей, надписей и т. п.) можно придать требуемое оформление алгоритмам. На приведенных рисунках виден штамп (основная надпись) и аккуратность в исполнении алгоритмов – одновременно это является и расчетной моделью, и документацией к алгоритмической части АСУ ТП.

	С.11 Основной регуля: В ПНД-1 (слив че	тор уровня рез ДН)	С.10 35.3 Основной РК на с на ПНД-1 через Д	ливе КГП Н	LCJ11AP001 C.28n=1.0	Дренажный насос на сливе КГП из ПНД	Į-1
	С.14 Пусковой регулят В ПНД-1 (слнв че	гор уровня рез ДН)	LCJ14AA202 С.12 0.0 НЗ ПНД-1 через Д	ливе КГП Н	LCJ12AP001 C.29n=1.0	Дренажный насос на сливе КГП из ПНД	Į-1
	С.15 Регулятор уровня В ІІНД-1 (слив в 1	а КНДР)	LCJ15AA201 С.13 0.0 РК на сливе КГП из ПНД-1 в КНД	•	LCJ13AP001 C.30n=0.0	Дренажный насос на сливе КГП из ПНД )	Į-1
	С.17 Регулятор уровня В ШНД-2 (слив в 1	а ПНД-1)	LCJ20AA201 С.16 26.7 РК на сливе КГП из ПНД-2 в ПНД-	1			
	С.18 Регулятор уровня В ШНД-2 (слнв в 1	к КНДР)	LCJ21AA201 С.19 0.0 РК на сливе КГП нз ПНД-2 в КНД	•			
<b>—</b>							
п. и дата	С.21 Алгоритм		С.20 31.7 Ссновной РК на с из ПНД-З через Д	ливе КГП Н	LCJ21AP001 C.31n=1.0	Дренажный насос на сливе КГП из ПНД	Į-3
дубл Под	С.35 Пусковой регулят в ПНД-3 (слив че	гор уровня рез ДН)	LCJ24AA202 С.34 0.0 Пусковой РК на с на ПНД-3 через Д	ливе КГП Н	LCJ22AP001 C.32n=1.0	Дренажный насос на сливе КГП из ПНД 0	Į-3
в.Ne Инв.Ne	С.22 Регулятор уровня В ПНД-3 (слив в 1	к КНДР)	LCJ31AA201 C.23 0.0 РК на сливе КГП нз ПНД-3 в КНД	•	LCJ23AP001 C.33n=0.0	Дренажный насос на сливе КГП из ПНЈ о	Į-3
Взаим.ин							
и дата	С.25 Регулятор уровня В ПНД-4 (слив в 0	e CC CIIII)	LCJ40AA201 С.24 24.4 РК на сливе КГП нз ПНД-4 в СС С	ш			
Подп.	С.26 Регулятор уровня В ПНД-4 (слнв в 1	кндр)	LCJ41AA201 С.27 0.0 РК на сливе КГП из ПНД-4 в КНД	•			
итоп			1				
N.	Организация П	Іроект	Система		LCC_LCJ		Листов 1
1HL		го	<ol> <li>Алгоритмы управления.</li> </ol>		пнд		Пист 9
	1			Изм	1		Версия 1

Рисунок 12.2.2 Пример алгоритмов и регуляторов для группы ПНД (содержимое субмодели Группа ПНД рис. 12.2.1)

Пример регулятора уровня в ПНД-2 (другого проекта) представлен на рис. 12.2.3 и 12.2.4. В приведенной выше на рис. 12.2.2 группе алгоритмов регуляторов ПНД логика реализации регуляторов следующая: на первом листе каждого регулятора представлен непосредственно алгоритм для формирования входного воздействия регулятора (рис. 12.2.3), на втором листе – модель регулятора, блока управления и модель регулирующего клапана, которая на выходе формирует положение РК для модели теплогидравлики, в зависимости от управляющих команд регулятора (рис. 12.2.4).

Конечно, такой пример является сложным к повторению с нуля и не очень подходит для обучения. Но он дает представление о внутренней структуре алгоритмов и регуляторов. Постараемся сделать хотя и упрощенную модель регулятора, но такую, которая будет включать в себя все существенные моменты приведенных примеров.



Рисунок 12.2.3 Формирование входного воздействия в регулятор



Рисунок 12.2.4 Регулятор и блок управления регулирующим клапаном

#### 12.3 Типовые блоки управления оборудованием

#### 12.3.1 Блок управления клапаном

В нашей учебной модели единственным исполнительным механизмом будет регулирующий клапан (РК), для которого потребуется разработать типовой блок управления клапаном (БУК). Как правило, для каждого нового проекта такие блоки не разрабатываются с нуля, а на основе предыдущих уже реализованных проектов выбирается наиболее подходящая модель, дорабатывается и используется.

Поясним некоторые моменты рис. 12.2.4 и блока управления клапаном, реализованного на нем. На входах блока управления вы можете видеть управляющие воздействия перевода из режима **Дистанция** в **Автомат**, набор команд дистанционного управления (ДУ) открыть и закрыть клапан, аналогичных команд автоматического управления (АУ), команд от регулятора на закрытие и открытие (так называемые команды **Больше** и **Меньше**). Также есть ряд команд, налагающих запрет на движение (управление) клапаном в ту или иную сторону от тех или иных команд.

Внутренняя структура подобного типового блока управления представлена на рис. 12.3.1. Здесь видно, что выходом этого блока управления являются две команды **Открыть** и **Закрыть**, которые отправляются уже на модель двигателя (обведено красным прямоугольником на рисунке). Для модели двигателя еще учитывается наличие электропитания.

Регулятор (рис. 12.2.4, субмодель РПИ) вырабатывает только команды **Больше** и **Меньше**, отправляемые на БУК, но чтобы они прошли далее к двигателю, регулятор и его блок управления должны быть в режиме регулирования, и не должно быть сформировано запретов на регулирование.



Рисунок 12.3.1 Структура типового БУК

В других режимах работы БУК к двигателю допускаются или команды от алгоритмов (AV), или дистанционные команды от оператора с пульта управления (ДУ). Если на двигателе нет электропитания, то он не воспринимает никакое управление. Блок управления на своих выходах формирует некоторые признаки своего состояния (закрыт, открыт, неисправность), которые могут быть использованы потом либо для вывода на пульте управления, либо в других алгоритмах и регуляторах. Также выходным сигналом этой модели БУК'а является положение штока клапана в процентах, от 0 до 100 %, которое используется далее в модели теплогидравлики как входная величина.

Таким образом, прохождение сигналов регулирования в типовом регуляторе и модели регулирующего клапана следующее.

 В модели датчика из расчетной величины получается преобразованная в единицы измерения датчика величина, с некоторой инерционностью. Это показание точки контроля.

- 2. В модели регулятора, на основе показания датчика и заданной уставки, других настроек регулятора, формируется сигнал рассогласования – входная величина для регулятора. Она может быть сформирована по-разному, иногда на нее накладывается еще предельная скорость изменения, какието другие ограничения. Пример этого алгоритма представлен на рис. 12.2.3.
- Затем сигнал рассогласования поступает на вход ПИ-регулятора или ПИД-регулятора, у которого настроены коэффициенты под текущий объект регулирования. Регулятор вырабатывает постоянно или импульсно сигналы Больше и Меньше.
- 4. Эти сигналы, подаваемые в БУК, приводят к перемещению регулирующего клапана, который воздействует на модель объекта (на теплогидравлику) и в конечном счете приводит к изменению показаний датчика. По изменившимся показаниям датчика формируется изменившееся рассогласование, и далее по циклу начиная с п. 1 происходит следующая «итерация» регулирования.

На это все накладываются дополнительные ограничения – у датчика может сформироваться сигнал недостоверности, регулятор может переключиться в другой режим работы, уставка регулятора может поменяться, электропитание может исчезнуть, вместо регулятора может прийти команда от алгоритмов на принудительное закрытие или открытие РК и т. д. и т. п. В реальной системе управления все эти моменты, конечно, учитываются и задействованы. В учебной модели регулятора мы опустим их для простоты реализации и понимания работы регулятора и создадим только необходимые цепи регулирования, при которых РК и регулятор будет работать всегда в режиме регулирования (неотключаемом), и никаких других вводных не будет предусмотрено.

# 12.3.2 Упрощенный «быстрый» способ реализации регуляторов, работающих совместно с моделью объекта, плюсы и минусы такого подхода

В реальной модели алгоритмической части АСУ ТП, реализованной на любом средстве структурного проектирования (программирования), всегда используется подход, описанный в предыдущем подразделе, с теми или иными модификациями. И такой подход оправдан для больших моделей и больших проектов, в которых количество точек контроля, насосов, клапанов и задвижек исчисляется сотнями и тысячами. Для относительно небольших моделей, используемых в исследовательских или проектировочных целях, не обязательно формировать структуру для отдельных частей алгоритмов и регуляторов. Возможно создание в пределах одной субмодели и алгоритма управления клапаном, и регулятора, и модели электродвигателя этого клапана. Продемонстрируем это на примере регулятора уровня для главного конденсатора (ГК) нашей учебной модели турбины.

Со стороны датчика у нас есть показания уровня в ГК, это сигнал LGK\_xq02. Например, нам требуется поддержание номинального уровня, заданного постоянной величиной +1000 мм. Мы можем в файле ACY.prt набрать простую модель формирования рассогласования показания датчика и уставки, подать его на вход в ПИД-регулятор, набранный из типовых блоков, просуммировать ветви этого регулятора и результат отправить на вход в интегратор с ограничением, которым смоделируем электродвигатель клапана K\_3\_1, см. рис. 7.2.1 и 12.3.2.



Рисунок 12.3.2 Простой контур регулирования уровня в ГК

Для формирования схемы, аналогичной рис. 12.3.2, вам потребуются следующие блоки:

- Чтение из списка сигналов, Запись в список сигналов со вкладки Сигналы, в них задать сигналы LGK\_xq02 (существует в базе данных) и K\_3\_1\_pos (пока еще не существует, добавим в базу позже);
- 2) Константа, задать 1000 (мм);
- Сравнивающее устройство, Усилитель и Сумматор со вкладки Операторы. В усилителях пока оставьте коэффициент усиления 1, в сумматоре задайте три входа либо массивом [1,1,1], либо сокращенной записью 3#1;
- 4) Интегратор, Инерционно-дифференцирующее звено и Интегратор с ограничением со вкладки Динамические. Задайте коэффициенты усиления как на рис. 12.3.2 (для интегрирующей ветви пока что 0). В интеграторе с ограничением задайте минимум и максимум выходного сигнала 5 и 95 (%). Это нужно, чтобы регулятор не закрывался полностью и не перекрывал расход через конденсантые насосы;
- 5) Релейное с зоной нечувствительности со вкладки Нелинейные. В этом блоке поставьте в первом приближении значения «-50», «-40», «40», «50», «-1», «1». Это означает, что регулятор начнет свою работу при рассогласовании ±50 мм и завершит при возврате рассогласования в зону нечувствительности ±40 мм от уставки. Рассуждения верны при единичном коэффициенте усиления в общем усилителе и в пропорциональной ветви регулятора.

Набранный алгоритм состоит из формирования рассогласования между показанием датчика и уставкой, потом общего усилителя и трех ветвей ПИДрегулятора (пропорциональная, интегрирующая и дифференцирующая), сумматора, релейного звена, которое формирует команды на открытие или закрытие РК в случае выхода за зону нечувствительности, и модели двигателя, формирующего текущее положение штока. Положение штока будем использовать в модели теплогидравлики. Создайте в базе данных категорию РК, в которой создайте шаблонный сигнал роѕ, и добавьте одну группу сигналов в категорию, с именем К\_3\_1, см. рис. 12.3.3.

⊿ Реда	ктор категории					
Имя кате	гории РК		Шаблон им	ени групп К		
№ 1	Имя <b>роз</b>	Название Положение РК, %	Тип данных Вещественное	Формула	Значение 50	Способ расчёта Константа
			Α	٦Ļ		
💷 Реда	ктор базы данны	ых сигналов: C:\turbine\Баз	a\TK3538.db	$\mathbf{\nabla}$		
Редактор	Настройки С	остояние сети				
N≏	Категории	N≌	Группы сигналов	Группа	Сводная	
0	Датчики	1	K_3_1	N♀	Имя	Название
1	PK			1	pos	Положение РК, %

Рисунок 12.3.3 Категория РК

После создания категории можно попробовать проинициализировать проект **ACY.prt** – никаких ошибок не должно быть!

На выходе релейного звена формируются или +1, или –1, или 0, следовательно, интегратор, который моделирует двигатель, либо на выходе держит константу (клапан стоит на месте в текущем положении), либо движется на открытие или закрытие с постоянной скоростью. За счет того, что мы задали там коэффициент усиления 0.1, клапан может полностью открыться или закрыться за 1000 секунд моделирования – именно за такое время интеграл от входной +1 с коэффициентом 0.1 достигнет 100 (%). Это очень значительное время (более 10 минут) и, скорее всего, не подойдет для нашей модели, но пока оставьте так, чтобы регулятор и ошибки в его настройке не сильно влияли на теплогидравлику и мы смогли бы отладить и пронаблюдать работу регулятора.

Чтобы связать регулятор и модель, задайте в базе данных начальное значение для положения штока 49.8 % (такое же, как в модели теплогидравлики сейчас стоит у вас положение для клапана К\_3\_1), а сигнал **К\_3\_1\_роз** пропишите как начальное значение в блоке интегратора с ограничением, а также как формулу для положения клапана в модели теплогидравлики, см. рис. 12.3.4.

Свойства	Параметры	Общие	Визуальные сл	ои		
Название	)			Имя	Формула	Значение
Номер	элемента			Element		1
Степе	Степень открытия, %			State	K_3_1_pos	40.319
Коэфф	фициент сопро	тивления	при 100%	KsiMin		25
Коэфф	фициент сопро	тивления	при 0%	KsiMax		1E10
Тип ха	арактеристики			ChType		Линейная (по расходу)
<sup>⊕</sup> Связь	с базой данны	ых				
• Офорі	мление					

Рисунок 12.3.4 Задание положения клапана сигналом базы данных

После этого вы можете закрыть **ACY.prt** и модель теплогидравлики, открытые по отдельности, и открыть **Пакет.pak**, чтобы запустить их на совместный расчет. И пронаблюдать длительный переходной процесс регулирования уровня в главном конденсаторе (процесс может занять более 1000 секунд), см. рис. 12.3.5. Изломы на графике уровня в области +1000 мм обусловлены геометрией бака, а не работой регулятора. По рисунку видно, что процесс носит неустойчивый характер, значит, настройки регулятора выбраны неверно. Кроме того, время хода PK, заданное 1000 секунд, слишком велико. Попробуйте самостоятельно посмотреть, как будет меняться переходной процесс, если поставить коэффициент усиления в интеграторе с ограничением, равным 0.2, затем 0.5 и 1.0. Это соответствует значениям времени хода клапана K\_3\_1, равным 500, 200 и 100 секундам соответственно.

У вас получится тот или иной переходной процесс, похожий на рис. 12.3.5, просто все более и более быстрый (короткий) по времени, а более быстроходный клапан, скорее всего, будет уезжать на верхний или нижний концевик (заданный нами величинами 5 и 95 %).

Поскольку настройки регулятора мы задали очень приближенно, давайте скорректируем их и попробуем добиться улучшения качества переходного процесса. Если вы проанализируете и сравните выходные сигналы пропорциональной ветви и дифференциальной ветви регулятора, увидите, что в основном сейчас «работает» пропорциональная ветвь, – коэффициент пропорциональности, заданный 1 там, вырабатывает выходной сигнал регулятора, пропорциональный рассогласованию в миллиметрах между уставкой и показанием датчика. В интегрирующей ветви задан нулевой коэффициент – ее можно опустить, а в дифференцирующей хотя и стоит коэффициент 10, но данный блок берет производную от рассогласования уровня, то есть скорость изменения уровня, в мм/с. Скорость же изменения уровня в ГК, даже умноженная в 10 раз, не так велика, как рассогласование самого уровня. Это можно увидеть, если разместить в регуляторе еще один блок типа временного графика и вывести для сравнения сигналы по ветвям регулятора, см. рис. 12.3.6 и 12.3.7.





0.9



Рисунок 12.3.6 График для анализа работы регулятора



Рисунок 12.3.7 Значения по ветвям регулятора

Сигнал по дифференцирующей ветви для регулятора уровня важен, так как он позволяет «заранее» остановить движение PK, когда уровень еще не вернулся в зону нечувствительности, но движется в ее сторону – тогда даже если на пропорциональной ветви рассогласование больше зоны нечувствительности, то дифференцирующая ветвь это скомпенсирует и PK не будет дальше открываться или закрываться. Это позволяет улучшить качество переходного процесса, и регулятор не будет загонять PK в полностью открытое или полностью закрытое положение. В идеальном варианте, когда расход втекающей и вытекающей сред из бака уравновешен, уровень находится в пределах зоны нечувствительности и не меняется, производная будет нулевой. Регулятор должен стремиться именно к такому состоянию системы – когда рассогласование будет нулевым. Структура регуляторов бывает разной, возможен вариант, когда рассогласование строится не только по показаниям датчика, но еще и по скорости изменения показаний или, например, по разнице входных и выходных расходов среды для бака.

Задайте коэффициент усиления для Д-ветви регулятора равным не 10, а **100**. Повторите моделирование, оцените полученный переходной процесс.

В типовых регуляторах, как правило, пользуются нормированными показаниями датчиков – на вход в регулятор подается не сигнал датчика в его единицах измерения, а нормированный на шкалу измерения сигнал, умноженный на 100 %, то есть величина от 0 до 100 %. Уставка задается также в процентах от шкалы измерения, и тогда коэффициенты регулятора тоже применяются уже к % и к %/с. В нашем случае быстрой реализации регулятора на входе единицы измерения – миллиметры, поэтому настроечные коэффициенты регулятора пришлось делать настолько разными – уже на два порядка. Попробуйте задать коэффициент усиления дифференциальной ветви равным 500, 1000 и 2000. Проанализируйте, как увеличение этого коэффициента влияет на процесс регулирования. Время хода клапана пусть остается постоянным и равным 100 секундам.

Рассмотрим влияние дополнительной Д-ветви на процесс регулирования. Например, уровень в ГК растет с небольшой скоростью (на Д-ветви небольшая величина, не выходящая за пределы зоны нечувствительности), рассогласование увеличивается, и наступает момент, когда сумма П- и Д-ветвей превышает заданное число +50 в релейном звене (при этом само рассогласование менее 50 мм!). На выходе релейного звена формируется +1, и клапан начинает движение на открытие. Расход слива конденсата из ГК начинает увеличиваться, и это почти сразу влияет на скорость изменения уровня (но не на сам уровень). Тогда значение Д-ветви достаточно быстро меняется, и сумма П- и Д-ветвей возвращается в трубку зоны нечувствительности, заданную в релейном звене ±40.

В варианте, когда Д-ветви не было или ее коэффициент был относительно мал, клапан двигался на открытие все время, пока сам уровень не вернулся бы в зону нечувствительности. То есть в этом первом варианте клапан успевал передвинуться на полное открытие или закрытие, что раскачивало систему и приводило к избыточному регулированию – перерегулированию и неустойчивости. А в модифицированном регуляторе с весомой Д-ветвью регулятор работает на опережение и не ждет, пока уровень снизится, останавливая клапан заранее, когда уровень уже начал снижаться. Конечно, настройки регулятора требуется проверить и в других режимах, с наложением различных внешних воздействий и возмущений. Например, при изменении режима работы турбоагрегата или при открытии/закрытии линии рециркуляции, при совместной работе нескольких регуляторов, влияющих друг на друга, и т. д.

Вы можете самостоятельно исследовать работу регулятора и при других настройках – разном времени хода клапана, разных других сочетаниях коэффициентов регулятора.

Рассмотренный вариант регулятора и его схемы является относительно быстрым способом, для того чтобы набросать простейшую схему регулирования и проверить некоторые идеи регулирования на модели объекта. Однако для моделирования большой системы такой подход по многим параметрам неудобен – все настройки регулятора у нас хранятся в самой схеме, входная и выходная величины регулятора выражены в физических единицах измерения, модель двигателя и его блок управления реализованы совместно с регулятором и т. п.

В следующем подразделе реализуем структурные изменения, разделив набранную схему регулирования на 4 функциональные части и добавив в них некоторые усовершенствования:

- 1) модель датчика (это у нас уже готово);
- подготовка входного сигнала в регулятор (рассогласования), на основе показаний датчика;
- непосредственно ПИД-регулятор, который формирует команды больше/ меньше;
- 4) блок управления клапаном, включающий в себя модель электродвигателя.

# **12.4** Разработка РУГК – регулятора уровня в главном конденсаторе

Спроектируем регулятор уровня конденсата в ГК так, чтобы он работал в относительных нормированных величинах, в процентах от шкалы измерения датчика. Для этого придется дополнить модель датчика еще одним сигналом и дополнительными вычислениями.

# 12.4.1 Пошаговое описание действий для создания первого регулятора

Для формирования рассогласования и уставки в процентах нам нужно модифицировать подпрограмму датчика, чтобы он выдавал еще показания в процентах от диапазона шкалы измерения. Для этого добавьте в категорию **Датчики** вещественный сигнал хq03 с описанием «Показания датчика, %». Далее модифицируйте подпрограмму датчика аналогично рис. 12.4.1.



Рисунок 12.4.1 Модифицированная подпрограмма датчика

В качестве свойств у усилителя надо задать 100 (%), а у блоков чтения и записи сигналов надо задавать по аналогии с предыдущим, **Submodel. Name + "\_xq03"**, **Submodel.Name + "\_xmax"**, **Submodel.Name + "\_xmin"**. В данной подпрограмме возникает операция деления – такие места всегда надо проверять на деление на ноль, то есть возникает требование, чтобы **xmin** и **xmax** в категории датчиков никогда не были равны друг другу.

Выполним далее подпрограмму, которая формирует рассогласование для регулятора. Ее не будем делать в виде типовой подпрограммы в отдельном файле, как мы сделали для датчика, так как в общем виде это могут быть разные алгоритмы у разных регуляторов. Но в категории РК заведем еще один новый сигнал, с именем **ерs**, в который будем записывать рассогласование. Добавьте такой сигнал в базу данных с описанием **Рассогласование**, %. Кроме этого, добавьте сигнал **ust** с описанием **Уставка**, % в эту же категорию РК. Задайте для регулятора К\_3\_1 уставку в значение 25 %, так как диапазон показаний датчика уровня в ГК равен 4000 мм, а номинальный уровень равен 1000 мм, см. рис. 12.4.2. Далее в отдельной субмодели наберите алгоритм, показанный на рис. 12.4.3.

N≗	Группы сигналов	Группа	Сводная					
1	K_3_1	N♀	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
		1	pos	Положение РК, %	Вещественное	49.8	53.02	Константа
		2	eps	Рассогласование, %	Вещественное		0	Константа
		3	ust	Уставка, %	Вещественное	25	25	Константа



Рисунок 12.4.2

Рисунок 12.4.3 Формирование рассогласования для регулятора

После этого давайте реализуем типовой ПИД-регулятор в отдельном файле по аналогии с датчиком. Пусть это будет файл с именем **C:\turbine\Подпрограммы\Peryлятоp.prt**, для его создания можно открыть файл **Датчик.prt** и сохранить там же его в **Peryлятоp.prt**. Для его параметризации через базу данных добавьте в категорию PK следующие константы: общий коэффициент усиления, коэффициент усиления пропорциональной части, интегрирующей и дифференцирующей, а также величину зоны нечувствительности и зоны возврата в процентах и еще постоянную времени для дифференцирующей части в секундах. Пусть это будут сигналы с именами **kreg**, **kp**, **ki**, **kd**, **zn**, **zv**, **Td**, см. рис. 12.4.4.

👍 Ред	актор категор	-					
Імя кат	егории РК	Шабл	юн имени групп К				
N♀	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта	
1	роз Положение РК, %		Вещественное		50	Константа	
2	eps	Рассогласование, %	Вещественное		0	Константа	
3	ust	Уставка, %	Вещественное		0	Константа	
	kreg	Общий коэффициент усиления	Вещественное	1	1	Константа	
5	kp	Коэффициент усиления П-ветви	Вещественное	1	1	Константа	
6	ki	Коэффициент усиления И-ветви	Вещественное	0	0	Константа	
7	kd	Коэффициент усиления Д-ветви	Вещественное	1	1	Константа	
8	zn	Зона нечувствительности, %	Вещественное	0.0125	0.0125	Константа	
9	zv	Зона возврата, %	Вещественное	0.01	0.01	Константа	
10	Td	Постоянная времени Д-ветви, с	Вещественное	1	1	Константа	

Рисунок 12.4.4 Новые сигналы для категории РК

Также добавьте два логических сигнала **yb01**, **yb02** с названиями «Открыть per» и «Закрыть per» – это будут выходные команды perулятора, которые далее отправим на вход блока управления электродвигателя клапана. Сформируйте pacчетную схему perулятора, как показано на puc. 12.4.5.



Рисунок 12.4.5 Типовой учебный ПИД-регулятор (подпрограмма)

В блоках данной подпрограммы следует указать следующие интерпретируемые формулы:

```
Submodel.Name + "_eps"
{Submodel.Name}_kreg
{Submodel.Name}_kp
```

```
{Submodel.Name}_ki
{Submodel.Name}_kd, {Submodel.Name}_Td
-{Submodel.Name}_zn, -{Submodel.Name}_zv, {Submodel.Name}_zv, {Submodel.Name}_zn
Submodel.Name + "_yb01"
Submodel.Name + " yb02"
```

Далее в проекте **ACY.prt**, по аналогии с датчиком, делаете новую субмодель, указываете у нее имя K\_3\_1 (такое же, как и имя группы сигналов в базе данных), указываете у субмодели внешний файл (имя файла субмодели) как ...\Подпрограммы\Peryлятоp.prt, далее сохраняете и переоткрываете ACY.prt, чтобы загрузилась новая подпрограмма, и после инициализации проекта внешний вид вашей подпрограммы регулятора должен стать похожим на рис. 12.4.5.

Величины зоны нечувствительности и зоны возврата мы задали на рис. 12.4.4 не совсем верно, из расчета 50 мм / 4000 мм и 40 мм / 4000 мм, а надо еще домножить на 100 %. Задайте в базе данных числа 1.25 и 1.0 для zn, zv.

По аналогии с подпрограммой датчика и регулятора создайте самостоятельно подпрограмму блока управления и модели электродвигателя. В категории РК есть еще один сигнал – положение штока клапана, **pos**. Он будет вычисляться в этой последней подпрограмме, см. рис. 12.4.6. Примечание: данную субмодель нельзя будет разместить на той же плоскости, что и другие субмодели (регуляторы, например), так как имя этой субмодели должно совпадать с именем субмодели регулятора. Создайте субмодель **Блоки управления** и уже внутри нее разместите субмодель с блоком управления для К\_3\_1 и таким же именем.



Рисунок 12.4.6 Учебный БУК

Итого мы разделили контур регулирования на 4 логически автономные подпрограммы – датчик, алгоритм, регулятор, блок управления. Но по смыслу они вместе повторяют рис. 12.3.2, плюс датчик. Удалите из проекта тот регулятор, который был набран ранее.

Для датчика **LGK** в базе данных верхний предел измерения установите в 4000 мм, иначе шкала будет считаться неверно. Попробуйте запустить **Пакет.раk** на расчет и отладить новый способ регулирования для ГК.



Рисунок 12.4.7 Группа алгоритмов для регуляторов уровней в баках

#### 12.4.2 Тестирование работы регулятора

Если вы сделали все верно, то с настройками П-ветви регулятора **kp** = 1 и Д-ветви **ki** = 500, **Ti** = 1 секунда переходной процесс у вас должен получиться примерно аналогичным рис. 12.4.8.

По рис. 12.4.8 видно, что в начале расчета уровень был около 900 мм, клапан К\_3\_1 немного прикрылся регулятором, при появлении роста уровня клапан остановился. Далее он немного приоткрывался, чтобы рост уровня остановить, когда рассогласование между уставкой и показанием датчика достигло околонулевых значений.



Рисунок 12.4.8 Переходной процесс с новым регулятором для уровня в ГК
Проведем тестирование, когда уставка 1000 мм (или 25 %) меняется по следующему графику: первые 500 секунд она равна 25 %, затем за 500 секунд меняется линейно с 25 % до 30 %, потом 500 секунд равна 30 %, далее снижается с 30 % до 25 %, потом равна константе 25 %. Таким образом, мы проверим способность регулятора и самого клапана выполнять «маневр» по расходу откачивания конденсата и поддержания уровня в ГК в заданном изменяющемся во времени положении. Для этого достаточно задать блоком типа **Кусочно-линейная** со вкладки **Источники** переменную **К\_3\_1\_ust**, аналогично рис. 12.4.9, и в блоке задать следующие массивы: для времени **[0 , 500 , 1000 , 1500 , 2000 , 2500]** и для значений функции **[25 , 25 , 30 , 30 , 25 , 25]**. Если вы выведете на график значение уставки и уровня в ГК в процентах, как показано на рис. 12.4.10, то сможете увидеть переходной процесс поддержания уровня в ГК, аналогичный рис. 12.4.11.



Рисунок 12.4.10

Из совместного анализа графиков рис. 12.4.11 видно, что первые 500 секунд регулятор вел уровень к 25 % (как и в расчете ранее), затем при росте уставки появилась дифференциальная составляющая в регуляторе, и клапан прикрылся ниже 30 %, что обеспечило достаточную скорость нарастания уровня в ГК до 30 %, затем клапан вернулся в исходное положение около 48 %, и рост уровня замедлился. На 1500-й секунде расчета уставка начала снижаться, и клапан распахнулся до максимальных 95 %, однако это не дало достаточного расхода, чтобы снижать уровень с той же скоростью, с которой снижается уставка, и появилось некоторое отставание уровня от задания. Значит, это вопрос к модели клапана и/или к диа-

метру трубопровода, на котором он стоит, – по всей видимости, пропускная способность клапана недостаточна, и ее нужно увеличивать. Возможно, надо снизить коэффициент местного сопротивления на данном клапане. Но это выходит за рамки настоящей методики, можете поэкспериментировать самостоятельно.



Рисунок 12.4.11

На этом разработка регулятора для ГК в целом завершена, остальные регуляторы подготовим полностью аналогично данному, это будет уже быстрее по разработанному шаблону. Потребуется просто привязать другие регуляторы к нужным датчикам и клапанам, а также верно задать диапазоны датчиков и уставки регуляторов.

Примечание по оформлению: для каждой типовой подпрограммы, загружаемой из другого файла, или просто для части регулятора, которую мы вынесли на отдельный лист, мы использовали типовой блок **Субмодель**. При этом не изменяя ничего в его свойствах и параметрах, как было сделано для модели конденсатора или подогревателей. Но по смыслу эти субмодели разные, и, в общем-то, одинаковый смысл будет заложен в субмоделях каждого регулятора – для субмодели вычисления рассогласования, для самого регулятора и для блока управления клапаном. Поэтому крайне желательно заменить имя класса **Субмодель** (которое сейчас осталось в каждой субмодели) на какое-то другое имя, характеризующее данную субмодель по ее смыслу. Например, можно дать следующие имена класса: «RK\_eps», «RK\_pid», «RK\_buk» (внутри субмодели **Блоки управления**), или какие-то еще имена, для каждой из трех новых субмоделей.

Примечание по оформлению 2: кроме имен класса блоков, желательно также задать какое-то графическое изображение для каждого типа субмодели, чтобы и внешне они различались на схеме. Например, если вы посмотрите на рис. 12.2.2, то увидите, что графические изображения на нем отличаются у разных субмоделей. Кроме того, на субмодели (на их графические изображения) выведены наиболее важные атрибуты – имена РК, положения РК и обороты электродвигателей насосов. Такое оформление позволяет существенно ускорить отладку регуляторов и расчетной схемы в дальнейшем – чтобы оценить работу группы регуляторов, уже не требуется заходить в базу данных или в каждую субмодель, а наиболее важные параметры видны сразу на схеме группы алгоритмов.

Примечание по блоку управления двигателем и клапаном: на рис. 12.2.2 присутствуют также субмодели типового блока управления двигателем. Внутри они отличаются от БУК, конечно, но по смыслу реализуют то же самое – принимают команды типа «Пуск» и «Стоп» и вырабатывают на выходе статусы электродвигателя и его текущую частоту вращения, которая затем через базу сигналов передается в теплогидравлику.

Про графические изображения блоков и их создание вы можете подробнее почитать в справочной системе SimInTech.

Для учебного примера будет достаточно, если вы графическое изображение каждого типа субмодели зададите хотя бы одним словом, например «Epsilon», «PK» и «БУК», см. рис. 12.4.12.



Рисунок 12.4.12 Надписи на типовых субмоделях

Далее, когда будете создавать для следующего регулятора аналогичные элементы, копируйте уже размещенные на схеме субмодели, а не выбирайте «чистую» пустую субмодель из палитры блоков. Тогда у вас и имя класса, и графическое изображение автоматически сохранятся. Вообще, при разработке большого и реального (а не учебного) проекта такие субмодели подготавливаются для проекта отдельно, в виде проектной библиотеки блоков, и на протяжении проекта они постепенно дорабатываются (как правило, кем-то одним из разработчиков), а остальные участники ими пользуются как библиотечными блоками.

Например, приведем на рис. 12.4.13 внешний вид типовых подпрограмм для одного из проектов.

Алгоритмы упра	вления.								
Компонент БУК тип 1	Компонент БУЗ тип 1	Компонент БУД тип 1	Компонент Дягчик тип 1	Компонент ПК тип 1	Ko C	мпонент К тнп 1	Компонент ОК тип 1	Компонент Ввутренний регулятор	Компонент РЗ тип 1
рпи 	SWB ww	SWF	тид ул	Компонент VW3 Выбор агретата	> BART	ипонент АВР	Компонент БУВ	Компонент ITE Переключатель	Компонен VW4 Выбор агрега
Датчики вторичные 2V3	Компонент Сигнализация	Компонент Отказы S3	Компонент Ремоут RFX	Компонент Ремоут RFB	Kox Ha	ипонент кладка			

Рисунок 12.4.13 Библиотечные блоки автоматики (пример из другого проекта)

Как вы можете видеть по рис. 12.4.13, мы реализовали только типовой блок датчика, БУК и блок ПИД-регулятора, а вообще в проекте может быть и гораздо больше типовых подпрограмм, используемых многократно.

Как правило (но не обязательно), каждая такая типовая подпрограмма работает в пределах своей категории базы сигналов, обрабатывая или индивидуально, или векторно каждую из групп сигналов в пределах данной категории. Мы сделали так субмодель датчика. Блоки управления и регуляторы в нашей учебной модели совместно обрабатывают сигналы для категории РК. Таким образом, можно говорить, что каждая категория описывает (шаблонно) какой-то класс, а каждая группа сигналов является хранилищем констант, входных, внутренних и выходных переменных для конкретного экземпляра класса. Имя экземпляра класса – это имя группы сигналов. А алгоритм, по которому обрабатывается экземпляр класса, хранится в виде типовой подпрограммы. Поэтому средствами графического структурного моделирования SimInTech фактически можно реализовать объектно-ориентированный подход при разработке моделей.

При успешной работе регулятора уровня вы можете наблюдать, что периодически он включается в работу, когда регулируемый параметр выходит за границы зоны нечувствительности, и регулирующий клапан перемещается. Это приводит к изменению расхода через группу конденсатных насосов, соответственно, изменяется расход через ПНД-1, немного меняется режим конденсации в нем, что сказывается на расходе отбираемого пара из III отбора, и далее на уровень в ПНД-1 и на уровень в ДА. Эти изменения, конечно, небольшие, однако они есть. Поэтому включение в модель регулятора и его работа будут вносить возмущения в модель и параметры модели. Если в автономном режиме модель объекта мы настраивали на номинальные параметры и старались сделать так, чтобы никакие расчетные параметры модели никуда не уплывали по мере расчета, то есть чтобы модель была устойчивой, то теперь, по мере разработки регуляторов, этого добиться уже практически не получится – уровни в баках каждому из регуляторов все равно придется рано или поздно поддерживать, корректируя снижение или рост уровня открытием либо закрытием соответствующего клапана, это будет влиять на модель и на другие расчетные параметры, и модель уже не будет работать стационарно в смысле неизменности параметров. Параметры будут меняться по мере движения РК, но эти изменения будут носить (должны носить) цикличный характер, в малой окрестности от номинального значения. Если мы обнаружим, что работа какого-то регулятора вносит недопустимые возмущения в другие расчетные параметры, значит, либо в модели надо что-то корректировать (мы многое не учли в разработанной учебной модели), либо в самом проекте ПТУ что-то некорректно спроектировано. Как правило, стараются разрабатывать установку и регуляторы для нее таким образом, чтобы каждый из регуляторов максимально эффективно влиял на регулируемый параметр и минимально влиял на другие параметры и иные регуляторы. Но все равно полностью взаимное влияние устранить не получается, и важно также отслеживать устойчивость регуляторов, когда они работают совместно, чтобы регулирующие воздействия не вошли в резонанс и регуляторы не начали друг друга раскачивать, через объект.

## 12.5 РУК-1 – основной регулятор уровня в подогревателе № 1 ПНД-1

По исходным данным, для ПНД-1 уставка по уровню составляет 275 мм, с погрешностью регулирования ± 75 мм. В соответствии с этим настроим наш регулятор.

# 12.5.1 Пошаговое описание модификаций первого регулятора, как из его копии сделать другой регулятор

Для реализации РУК-1 создайте новую группу сигналов в категории РК базы данных, с именем **РУК1**.

Примечание: лучше без дефиса или подчеркивания – так как в именах групп сигналов, вообще говоря, желательно не пользоваться специальными символами, а знак подчеркивания используется в SimInTech как разделитель между именем группы сигналов и именем сигнала в этой группе. Для **K\_3\_1** мы отошли от этого правила – это допустимо, но нежелательно, чтобы однозначно отделять имя объекта и имя сигналов этого объекта по полному имени сигнала.

В этой группе сигналов появятся автоматически новые сигналы, по шаблону категории, и ими сразу можно пользоваться.

Скопируйте по очереди разработанные субмодели для вычисления рассогласования, РК и БУК. Задайте верные имена субмоделям (обязательно имя **РУК1** для двух последних субмоделей и РУК1\_Рассогласование для первой, например). Расположите субмодели напротив субмодели датчика LP1, так как работать этот регулятор будет по датчику уровня в ПНД-1.

Попробуйте схему проинициализировать (ошибок не должно быть), после чего пройдитесь по субмоделям и убедитесь, что в двух последних субмоделях сигналы приняли верные имена автоматически. В субмодели вычисления рассогласования потребуется вручную изменить имя сигнала для показаний датчика и имена двух других сигналов. В принципе, эту субмодель тоже можно было бы автоматизировать, но мы специально оставили в учебных целях и такой, ручной вариант, чтобы вы увидели разные возможности и варианты набора алгоритмов.

## 12.5.2 Краткое описание РУК-2 – дополнительного регулятора уровня конденсата в ПНД-1

В проекте данной ПТУ поддержание уровня в ПНД-1 осуществляется за счет изменения слива конденсата из подогревателя через регулирующие клапаны по двум линиям: в деаэратор с помощью сливного насоса ЭКНС через основной и в конденсатор через дополнительный регулятор.

Подключение дополнительного регулятора осуществляется автоматически по сигналу верхнего уровня в подогревателе датчика уровня, по отдельному алгоритму.

В нашей модели не реализована модель данного трубопровода и регулятора, и не будем ее делать – в учебных целях это не существенно. Но это все не сложно сделать, по аналогии с основным регулятором. Отдельные от регуляторов алгоритмы реализуются также во входо-выходных отношениях, как мы сделали модель датчика, модель подготовки рассогласования и модель самого регулятора.

## 12.5.3 Тестирование работы регулятора РУК-1

В модели ПНД-1 мы задавали объем бака равным 41 м<sup>3</sup>, а диаметр равным 2.5 м. Значит, высота такого бака равна 8.35 м = 4·41 м<sup>3</sup>/( $\pi$ ·2.5·2.5 м). Возможно, это не совсем верная величина, но бака такой высоты хватит для отладки регулятора и поддержки уровня 275мм ± 75 мм. Задайте пределы измерения в базе для датчика LP1 равными 0 и 1000 мм (пусть будет меньше, чем физический диапазон в баке, для простоты вычисления зоны нечувствительности и задания уставки). Тогда зона нечувствительности 75 мм будет равна 7.5 % от шкалы датчика. Установите это в базе данных в группе сигналов регулятора РУК1. Зону возврата установите равной 5 %. Уставку для регулятора РУК1 задайте 27.5 %.

В модели для клапана К\_32\_1 заведите в свойство **Степень открытия, %** сигнал текущего положения РК РУК1, то есть РУК1\_pos, см. рис. 12.5.1. Таким образом, регулятор РУК1 будет управлять клапаном К\_32\_1. Вообще говоря, в проекте надо стремиться, чтобы эти имена совпадали (блок управления клапаном и имя самого клапана в модели теплогидравлики), но это не обязательно и не всегда так бывает.

<i>Ф</i> Свойства <mark>К_32_1</mark>			
Свойства Параметры Общие Визуальные	слои		
Название	Имя	Формула	Значение
Номер элемента	Element		1
Степень открытия, %	State	PYK1_pos	50
Коэффициент сопротивления при 100%	KsiMin		1
Коэффициент сопротивления при 0%	KsiMax		1E10
Тип характеристики	ChType		Равнопро
🖶 Связь с базой данных			
• Оформление			

Рисунок 12.5.1 Положение клапана К\_32\_1

Задайте начальный объем воды в ПНД-1 равным 2 м<sup>3</sup>, чтобы начальный уровень в ПНД-1 был ближе к уставке.

Больше никаких пока модификаций в модель теплогидравлики делать не надо. Чтобы не было сильного математического «удара» при старте модели, лучше начальное положение для РУК1 в базе данных задать не 50 %, а 67 % (сколько у вас было задано константой для К\_32\_1). Сохраните проект и базу данных.



Рисунок 12.5.2 Уровни в баках модели

Запустите на расчет пакет. Убедитесь, что клапан управляется из алгоритма для регулятора РУК1. Оцените, насколько верно идет процесс регулирования. Внесите необходимые корректировки в значения коэффициентов усиления в регуляторе – попробуйте это проделать самостоятельно, по аналогии с регулятором уровня в ГК. Коэффициенты для регулятора в ГК, в принципе, должны подойти и для этого регулятора.

На рис. 12.5.2 и 12.5.3 представлен режим длительной работы модели ПТУ, с включенными двумя регуляторами уровня для ГК и ПНД-1. Для ГК программа изменения уставки во времени выключена. По графикам уровней видно, что в этих двух баках уровень поддерживается на заданном положении, а параметры ПТУ не сильно отошли от номинальных значений. Возможно, сниженный

уровень в ПНД-1 усилил в модели процесс конденсации, даже при снижении расхода конденсата через ПНД-1, и там нужно скорректировать поправочный коэффициент. Можете проделать это самостоятельно.



Рисунок 12.5.3 Некоторые параметры регуляторов РУГК и РУК1



Рисунок 12.5.3 (окончание)

По графикам видно, что РУК1 начинает относительно часто перемещать клапан – возможно, для него надо изменить либо быстродействие, либо коэффициенты регулятора. На данный момент можно сказать, что заданный уровень он держит, но не совсем оптимальным способом.

# 12.6 РУК-3 – регулятор уровня конденсата в подогревателе № 2 ПВД-2

По описанию ПТУ, поддержание регулируемого параметра осуществляется за счет изменения слива конденсата из ПВД-2 в ДА через регулирующий затвор. По схеме это получается клапан **K\_33\_1**.

Поскольку он стоит на сливе, то регулятор и вычисление рассогласования для него будут такими же точно, как для ГК и ПНД-1 (с точностью до задания уставок, зоны нечувствительности и имен сигналов). Если бы регулирующий клапан стоял на подводе воды (греющего пара), то рассогласование пришлось бы вычислять с обратным знаком – потому что для увеличения уровня в этом случае надо открывать регулятор, а не закрывать. В более полноценных регуляторах это настраивается отдельным свойством, которое может называться как «регулятор до себя» или «регулятор после себя» – и этой настройкой можно менять знак регулятора.

### 12.6.1 Реализация и тестирование работы РУК-3

По аналогии с РУК-1 (уровень в ПНД-1) выполните те же самые шаги, которые мы делали при разработке предыдущего регулятора.

Исходные (проектные) данные для регулятора: уставка по уровню 0,48 м, погрешность регулирования ± 75 мм. Максимальный измеряемый уровень по датчику пусть будет тоже 1000 мм, как и для ПНД-1.

Значит, уставка равна 48 %, зона нечувствительности будет 7.5 %, и можно принять 5%-ную зону возврата. Имя категории в базе данных пусть будет РУКЗ для регулятора.

Через базу данных вам надо задать уставку, зону нечувствительности и зону возврата, скорректировать шкалу датчика, в субмоделях для РУКЗ корректно прописать имена субмоделей и все входные и выходные сигналы там, где не сделана автоматизация. После этого в модели теплогидравлики необходимо привязать положение клапана К 33 1 к сигналу РУКЗ роз.

Результат действий сравните с рис. 12.6.1 и 12.6.2.



Рисунок 12.6.1

N≏	Группы сигналов	Группа	Сводная				
1	K_3_1	N♀	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение
2	РУК1	1	pos	Положение РК, %	Веществен	68	69.65
3	РУКЗ	2	eps	Рассогласование, %	Веществен		5.987906
		3	ust	Уставка, %	Веществен	48	48
		4	kreg	Общий коэффициент усиления	Веществен	1	1
		5	kp	Коэффициент усиления П-ветви	Веществен	1	1
		6	ki	Коэффициент усиления И-ветви	Веществен	0	0
		7	kd	Коэффициент усиления Д-ветви	Веществен	250	250
		8	zn	Зона нечувствительности, %	Веществен	7.5	7.5
		9	zv	Зона возврата, %	Веществен	5.0	5
		10	Тd	Постоянная времени Д-ветви, с	Веществен	1	1

#### Рисунок 12.6.2

Если вы зададите коэффициенты регулятора такими же, как и для ПНД-1, то после первого запуска на расчет можете наблюдать автоколебания (или дребезг) РК для ПВД-2 – он будет перемещаться вперед-назад практически без остановки. Можно по изменению выходного сигнала ПИД-регулятора (перед релейным звеном) в РУКЗ проследить, что это происходит из-за сильного изменения Д-составляющей. Для ПВД-2, в отличие от ПНД-1, задана меньшая площадь проходного сечения бака (внутренний диаметр бака равен 2.0 м вместо 2.5 м) и больший диаметр на трубопроводе слива (150 мм вместо 80 мм). Из этих геометрических характеристик очевидно, что зависимость уровня в ПВД-2 гораздо сильнее связана с положением РК, чем у ПНД-1. Значит, регулирующий клапан здесь имеет больший вес, чем у ПНД-1, и его надо делать либо менее быстродействущим, либо снижать коэффициент у Д-ветви. Попробуйте самостоятельно перенастроить РУКЗ, чтобы добиться лучшего качества регулирования и переходного процесса.

На рис. 12.6.2 представлен промежуточный вариант настроек РУКЗ – мы снизили в два раза коэффициент для Д-ветви и задали его равным 250. Скорее всего, лучше еще его снизить, чтобы исключить большинство колебаний, связанных с относительно более сильным изменением уровня в ПВД-2 при движении РК.

Пример таких колебаний приведен на рис. 12.6.3 (график получен при перенастройке регулятора, и колебания имеют разный период и амплитуду).



Рисунок 12.6.3 Колебания регулятора РУКЗ при его настройке

Другой вариант корректировки регулятора – снижение скорости перемещения РК. Для этого в модель надо добавлять еще одну константу в категорию РК, характеризующую время хода, и использовать ее в модели БУК в интеграторе с ограничением для задания другого коэффициента усиления, отвечающего за время хода клапана.

Пример такой реализации приведен на рис. 12.6.4 и 12.6.5. Если вы будете делать так же, то для предыдущих регуляторов надо поставить 100 секунд время хода, чтобы их подпрограммы не изменились. Для РУКЗ можно задать 150 или 200 секунд.

3 PVK3	1	pos	положение нк, %	веществен	90	69.4/5
3 1913	2	eps	Рассогласование, %	Веществен		16.820892
	3	ust	Уставка, %	Веществен	48	48
	4	kreg	Общий коэффициент усиления	Веществен	1	1
	5	kp	Коэффициент усиления П-ветви	Веществен	1	1
	6	ki	Коэффициент усиления И-ветви	Веществен	0	0
	7	kd	Коэффициент усиления Д-ветви	Веществен	250	250
	8	zn	Зона нечувствительности, %	Веществен	7.5	7.5
	9	zv	Зона возврата, %	Веществен	5.0	5
	10	Td	Постоянная времени Д-ветви, с	Веществен	L	1
	11	yb01	Открыть рег	Двоичное		Нет
	12	yb02	Закрыть рег	Двоичное		⊿да
	13	topn	Время хода клапана, с	Веществен	200	200





Рисунок 12.6.5 Модификация подпрограммы БУК

После таких исправлений регулятор станет более устойчивым, но менее быстродействующим.

## 12.7 РУК-4 – регулятор уровня конденсата в подогревателе № 3 ПВД-3

РУК-4 очень похож на РУК-3, так как подогреватели высокого давления здесь практически идентичные. Но РУК-4 своим перемещением будет оказывать воздействие не только на уровень в ПВД-3, но и на уровень в ПВД-2, куда сливается конденсат из ПВД-3. Значит, надо проследить, чтобы регулятор РУК-4

не сильно оказывал воздействие на РУК-3. Возможно, РУК-4 надо сделать еще более медленным, по сравнению в РУК-3.

Исходные данные для регулятора такие же, как и для РУК-3: уставка 0,48 м, погрешность регулирования ± 75 мм. Осуществите все самостоятельно, сделав группу сигналов **РУК4** и задействовав в модели клапан с именем **K\_34\_1**.

### 12.7.1 Реализация и тестирование работы РУК-4

После корректной реализации четвертого регулятора уровня, в принципе, все уровни в баках не должны теперь «уплывать» с течением времени, кроме ДА, и можно модель запустить на более длительный расчет, по сравнению с предыдущими тестами. В деаэраторе можно поддерживать уровень при помощи изменения расхода подпитки непосредственно в процессе моделирования. Результат одного из таких расчетов приведен на рис. 12.7.1



Рисунок 12.7.1 Работа четырех регуляторов уровня

По рисунку видно, что периодически те или иные регуляторы вступают в работу, что дает изменение тренда по уровню в соответствующем баке. При дальнейшей настройке регуляторов и некоторой их модификации, в принципе, можно добиться лучшего качества регулирования, при котором регулятор будет выводить в ноль производную от уровня, и тогда при стационарной работе ПТУ регуляторы вообще перестанут двигаться, занимая оптимальное положение для поддержания уровня в пределах зоны нечувствительности.

Для этого, скорее всего, придется тем или иным образом задействовать И-ветвь регуляторов. Также можно изменить способ выдачи воздействия на регулирующий клапан, чтобы выдаваемые импульсы были разной ширины, например в зависимости от текущей величины рассогласования.

#### 12.8 РУД-1 – РЕГУЛЯТОР УРОВНЯ В ДЕАЭРАТОРЕ АТМОСФЕРНОМ

По исходным данным, пределы регулирования данного регулятора составляют 2070–3570 мм, максимальная температура 70 °C. Регулятор включает два контура – сброса и подпитки, регулирующий клапан шиберного типа установлен на трубопроводе Ду65 для контура подпитки и сброса.

В модели у нас пока что не реализованы данные контура, и уровень в ДА мы «держим» вспомогательными блоками типа **Подпитка**, вручную задавая и корректируя там расход.

Вы можете самостоятельно реализовать регулятор уровня в деаэраторе, заменив подпитку водой еще одним трубопроводом и установив там регулирующий клапан. Затем добавить еще один регулятор и настроить его на регулирование расхода подпитки в деаэратор. При этом надо будет при вычислении рассогласования взять другой знак, так как регулирующий клапан будет находиться на линии подачи воды, а не слива, как на других реализованных регуляторах.

В данном подразделе продемонстрируем другой способ – сделаем ручной регулятор – и еще одну возможность SimInTech по созданию «ручного» регулирования той или иной части схемы. Идея в следующем: добавить глобальный сигнал в проект (например, с именем **G\_gp\_da**), который приравнять к расходу подпитки в ДА (в нашем случае в номинальном режиме расход греющего пара на ДА равен +5.6/3.6 кг/с). Далее в блоке подпитки поставить переменную **Ggp\_da**, а при помощи двух кнопок «плюс» и «минус» реализовать ручное изменение этой переменной на некоторую малую величину, например +0.001 или –0.001 кг/с, при однократном нажатии на каждую кнопку.

Разместите на расчетной схеме, рядом с блоком подпитки греющего пара, два объекта типа «кнопка» из панели графических примитивов, см. рис. 12.8.1 и 12.8.2. Задайте этим кнопкам режим работы «без фиксации» (показано на рис. 12.8.2). Имена у кнопок задайте как **B1** и **B2**. Подпишите кнопки словами или знаками «–» и «+». Перейдите в скрипт проекта и напишите там скрипт, как показано на рис. 12.8.3.



Рисунок 12.8.1 Размещение кнопок на схеме

<i>🧐</i> Свойства : B2					
Общие Визуальные слои					
Название	Имя	Формула	Значение		
Имя объекта	Name		B2		
Тип элемента	ClassName		Button		
Подсказка	Hint				
Блокировать подсказку	HideHintOnEdit		Пнет		
Видимость при выполн	Visible		⊿да		
Координаты точек	Points		[(-320 , 72),(		
Ссылка	Instance				
Ссылка при редактиров	EditInstance		Пнет		
Действие для вывода с	InstanceMode		Двойной ще		
Ярлык	Tag	0			
Шаблон автозаполнения	Template				
Номер решателя	Layer		0		
Скрипт инициализации	OnInitScript				
Скрипт исполнения объ	OnRunScript				
Скрипт уничтожения об	OnDestroyScript				
Блокировать изменени	LockSizes		Пнет		
Указатель в пределах о	MouseIn		Пнет		
Ширина	Width		32		
Высота	Height		32		
Кнопка нажата	Down		Нет		
Растровое изображение	RasterImage		20202020		
Фиксация	Fixed		Нет		

Рисунок 12.8.2 Фиксация и имя кнопок

Скрипт означает следующее: пока нажата кнопка, увеличиваем или уменьшаем величину переменной **G\_gp\_da**, и в соответствии с этим изменяется расход в подпитке для ДА. Также ограничиваем диапазон изменения переменной G\_gp\_da некоторыми разумными пределами.

В блоке подпитки пропишите эту же переменную, см. рис. 12.8.4.

```
var G_gp_da = +5.6/3.6;

if (B1.Down) then begin

G_gp_da = G_gp_da - 0.001;

end;

if (B2.Down) then begin

G_gp_da = G_gp_da + 0.001;

end;

G_gp_da = max(G_gp_da, 0.0);

G_gp_da = min(G_gp_da, 20.0/3.6);
```

Рисунок 12.8.3 Скрипт для кнопок

Теперь, запустив модель на расчет, вы сможете кнопками управлять расходом подпитки греющего пара в ДА и, таким образом, менять режим его работы, исполняя роль регулятора давления в ДА и частично уровня. Нажатие кнопок в режиме расчета следует осуществлять, переведя предварительно расчетную схему в режим индикации (см. рис. 12.8.5), потому что в обычном режиме редактирования однократное нажатие на кнопку приведет к выделению блока на схеме.

🏟 Свойства : InputFlow_14											
Свойства Параметры Общие Порты Визуальные слои											
Название			Им	я		Формула	Знач	чение			
Расход, к	г/с		G			G_gp_da	1.5	555556			
Температура, °С						T_02	139	.55381			
Определяющее свойств				finePara	m		Тем	пература			
Максимальное противод				nax			100	00000			
Концентра	ация пассивн	ых	<b>C</b> _	passive_	tracer		[]				

Рисунок 12.8.4 Задание переменной подпитки для ДА

Точно таким же образом можно оперативно менять и другие граничные и начальные условия – можно повесить такие же кнопки на расход охлаждающей воды в ГК, на параметры свежего пара на турбину и т. д.

#### 🦃 TK-35-38.prt

Вид	Масштаб	Режим: Индикация		_								
	🥫 🖹 🚽	Теплогидравлика	~		-		٩		N	П		
			Индикация/Редактирование									
				•		t h[қ	[°С Дж,	]=97 /кг]	7.94 =41	2 10.45		

Рисунок 12.8.5 Переключение режимов индикации и редактирования

Представленный способ работает таким образом, что пока вы нажимаете кнопку, переменная будет либо постоянно увеличиваться, либо постоянно уменьшаться, и иногда бывает трудно «поймать» нужную величину расхода. Поэтому мы установили маленькую величину 0.001 кг/с, на которую инкрементируется расход в подпитке. Есть и немного другой способ, дискретного изменения: если в скрипте внутри условия прописать Button.Down = 0, то есть из скрипта отпустить кнопку, тогда каждое нажатие будет отжимать кнопку и инкрементирование будет происходить 1 раз. Пример скрипта см. на рис. 12.8.6.



В этом варианте величину инкрементирования можно поставить и побольше – тогда вы сможете более четко изменять регулируемую величину – строго дозированными порциями. Иногда такой вариант предпочтительнее «аналогового» первого способа ручного регулирования.

### 12.9 Оценка полученной комплексной модели

Полученная комплексная математическая модель ПТУ охватывает практически все стадии и шаги, которые необходимо выполнить при разработке полноценной (а не учебной) модели динамики подобного рода. Единственное, что мы не выполнили, – это дальнейшие стадии разработки модели, на которых проводится ее проверка и доработка для корректного моделирования переходных режимов, а также стационарных режимов работы ПТУ, отличных от номинального. Эти стадии проводятся итерационно, оценивая каждый раз тот или иной переходной режим и по необходимости внося корректировки в модель. Также в составе модели не разработан пульт управления, который, вообще говоря, можно реализовать в SimInTech совместно с проектом автоматики.

Учитывая принятые допущения и упрощения (см. подраздел 1.2), а также некоторые ограничения расчетного кода HS, можно сказать, что модель не на 100 % точно моделирует процессы, которые могут происходить и происходят в реальной ПТУ, однако в пределах границ применимости модели она достаточно хорошо описывает динамику объекта.

На базе данной модели можно в дальнейшем реализовать недостающие в модели части ПТУ (несмоделированные потребители пара, группу эжекторов и др.), а также недостающие регуляторы и получить более завершенную модель турбины, на которой возможно моделирование как стационарных процессов с небольшими отклонениями параметров от них, так и переходные режимы работы ПТУ. В перспективе такая модель может стать всережимной, описывающей поведение установки во всех режимах нормальной эксплуатации.

При добавлении в модель возможностей различного рода отказов оборудования (протечки, течи, отказы насосов и арматуры, изменение граничных условий – таких как температура окружающего воздуха, изменение параметров свежего пара, и др.) можно проанализировать поведение установки и алгоритмической части АСУ ТП при различных сценариях.

Модель можно наращивать в части парогенерирующего блока – добавить модель парогенератора или группы парогенераторов и анализировать уже совместно работу ПТУ и парогенератора.

Под словами, что модель «достаточно хорошо описывает динамику объекта», понимается верность описания динамических характеристик объекта, пригодная для использования модели минимум в двух целях: а) выполнить поверочные расчеты работы объекта в динамических режимах эксплуатации, которыми можно дополнительно подтвердить выбранные проектные решения, либо по результатам расчетов предложить те или иные изменения конструкторам установки; б) отработать на модели динамики алгоритмическую часть АСУ ТП и интерфейсы пультов управления объектом. Если алгоритмы управления и регулирования разработаны «вслепую», без модели объекта, и никаким способом не проверены, то потребуется существенное время при пусконаладочных работах для проверки, доводки и настройки всех алгоритмов и регуляторов. Модельно-ориентированное проектирование позволяет заранее исключить большинство ошибок в алгоритмах и регуляторах, настроить в первом приближении регуляторы на модели, и такой способ дает возможность сильно сократить время и количество ошибок при пусконаладке.

В части алгоритмов и регуляторов подобного рода динамическая модель ПТУ позволяет оценить качество переходных процессов, настроить регуляторы (хотя бы в первом приближении подобрать коэффициенты и другие настройки регуляторов) и проверить их совместную работу. Конечно, настройки регуляторов на реальном объекте придется корректировать еще раз. Но модель позволяет хотя бы в каком-то приближении понять динамику объекта управления.

#### 12.9.1 О реализованных регуляторах

Представленные в настоящей методике регуляторы можно отнести к классу ПД-регуляторов, поскольку И-ветвь мы ни разу не задействовали. Выход регуляторов – импульсный. Но это не единственный вариант регулирования – в литературе и в различных установках существует множество идей, подходов и реализаций схем регулирования.

Зона нечувствительности, которая реализована в представленных регуляторах, не совсем верно отрабатывает заданные пределы и зону возврата, т. к. Д-ветвь добавляет свой сигнал и заставляет регулятор срабатывать несколько ранее или позже пересечения рассогласованием зоны нечувствительности, а не точно на ее границе.

Благодаря тому что на выходе регулятора формируется всегда сигнал больше или меньше, равный +1 и –1, то двигатель, смоделированный интегратором, в нашей модели движется всегда с постоянной скоростью. Можно было бы реализовать и более сложный закон регулирования, когда скорость перемещения РК зависела бы от величины рассогласования.

Существуют регуляторы с переменной зоной нечувствительности, иногда релейный блок ставят до регулятора, чтобы он не выдавал никаких воздействий и не накапливал на интеграторе никакой суммы, если регулируемый параметр находится в пределах трубки. Часто используется обратная связь по положению регулирующего клапана, различные режимы работы регулятора. Некоторые регуляторы работают сразу по нескольким датчикам, или управляют несколькими регулирующими клапанами. В литературе существует много описаний и реализаций различных регуляторов, и для каждого вида объекта лучше подходит тот или иной тип.

Для сравнения приведем две расчетные схемы типового ПИ- и ПИДрегуляторов из других проектов, на рис. 12.9.1 и 12.9.2. По рисункам видно, что типовая подпрограмма регулятора может быть намного сложнее, чем в учебной методике.



Рисунок 12.9.1 Типовой ПИ-регулятор (пример из другого проекта)



Рисунок 12.9.2 Типовой ПИД-регулятор (пример из другого проекта)

Таким образом, регуляторы в учебной модели являются упрощенной версией реальных регуляторов, однако на качественном уровне повторяют все ключевые процессы, происходящие в контурах регулирования реальных технических объектов.

Полученное стационарное состояние, с включенными в работу регуляторами, позволяет неограниченно долго держать «номинальное» состояние. Пример графика с 5-часовым расчетом по данной модели приведен на рис. 12.9.3. Без регуляторов такой расчет получить или не удалось бы вообще, или пришлось бы еще более тщательно подбирать вручную положения PK, так чтобы уровни в баках менялись несущественно.



Рисунок 12.9.3 Уровни в баках на протяжении 5 часов расчета

По рис. 12.9.3 видно, что наибольшее количество изломов имеет график уровня в ПВД-2 (синяя линия). Может сложиться впечатление, что регулятор работает как-то не так. Однако примерно половина этих изломов имеет причину в работе регулятора уровня для ПВД-3 (черная линия). Каждое срабатывание регулятора для ПВД-3 приводит к изменению расхода слива из ПВД-3, который является входящим расходом в ПВД-2. Следовательно, каждое такое перемещение РК у регулятора уровня в ПВД-3 приводит к изменению тенденции уровня как в ПВД-3, так и в ПВД-2, что оказывает влияние на график.

Также по рис. 12.9.3 можно увидеть, что чем медленнее меняется уровень (меньше первая производная и меньше сигнал на Д-ветви регулятора), тем

дальше от заданной уставки регулятор позволяет отклониться уровню. Это видно на черной линии – три верхних излома, находящихся выше 0.5 м, имеют все более и более высокий уровень и меньший наклон графика, достигая почти 0.55 м у третьего излома. Так влияет введение Д-ветви в регулятор – снижает действительную зону нечувствительности регулятора, если ее ставить на выходе сумматора регулятора.

Само полученное состояние, возможно, несколько сместилось по расходам пара из отборов, потому что уровни в подогревателях стали ниже, чем были до ввода в работу регуляторов. И модель требует дальнейшей корректировки в части теплообмена в ПНД и ПВД. Но это регулярный итерационный процесс при разработке сложной модели, который не требует еще одного пошагового описания. Да и сами баки подогревателей смоделированы не вполне корректно (из-за отсутствия проектных данных по их геометрии), поэтому дальнейшее уточнение модели требует уже другого, более тщательного количественного подхода и наличия иной информации.



На этом методика по созданию в среде SimInTech комплексной модели ПТУ и некоторых из ее регуляторов завершена.

Пользуясь умениями, которые можно почерпнуть из настоящей методики, вы сможете реализовать и более полную комплексную модель ПТУ и ее алгоритмической части или модель динамики какого-либо другого теплофизического объекта.



- 1. *Королев В. И.* Теплорасходная диаграмма пара и конденсата для анализа режимов использования теплофикационных паротурбинных установок / В. И. Королев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. Т. 10. № 5. С. 1025–1039. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1025-1039.
- 2. Паротурбинная установка ТК-35/38-3,4. Технические условия ИРЕЦ 624121.001ТУ.
- 3. Изделие ТК-35/38-3,4. Схема тепловая принципиальная.
- 4. Справочная система среды SimInTech, раздел «Методики работы TPP Методика создания модели турбины в SimInTech».
- 5. Справочная система среды SimInTech, раздел «Начало работы Пошаговые руководства создания комплексной модели – Комплексная модель на основе теплогидравлической расчетной схемы».

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.a-planeta.ru. Оптовые закупки: тел. (499) 782-38-89. Электронный адрес: books@alians-kniga.ru.

#### Щекатуров Александр Михайлович Корсаков Александр Романович

#### Методика моделирования динамики паротурбинной установки ТК-35/38-3,4 на базе кода HS

Главный редактор Мовчан Д. А. dmkpress@gmail.com Зам. главного редактора Сенченкова Е. А. Корректор Синяева Г. И. Верстка Луценко С. В. Дизайн обложки Мовчан А. Г.

> Формат 70×100 1/16. Гарнитура «PT Serif». Печать цифровая. Усл. печ. л. 19,66. Тираж 200 экз.

Веб-сайт издательства: www.dmkpress.com



Ссылка на дополнительные материалы книги

В книге подробно рассмотрено создание модели паротубинной установки на базе теплогидравлического кода HS (специализированного модуля SimInTech). Этот процесс показан на примере моделирования динамики одной из небольших паротубинных установок (ПТУ). Также приводится пошаговое описание разработки модели датчика, исполнительного механизма и регуляторов для комплексной модели на примере регуляторов уровня в подогревателях, в деаэраторе и в главном конденсаторе.

Несмотря на то что акцент в методике сделан на конкретной тубине, книга будет полезна всем, кто хочет самостоятельно разработать динамическую модель для другой паротурбинной установки, газовой турбины, турбоагрегата или теплофизического объекта.





