

**В. А. ДЕМЧЕНКО**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
АЗС И ТЭС**



**В. А. ДЕМЧЕНКО**

# **АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ  
АСУ И ТЭС**

**Рекомендовано  
Министерством образования  
и науки Украины как учебное пособие  
(Письмо № 2/1514 от 25.04.2000 г.)**

**Одесса  
«Астропринт»  
2001**

ББК 31.46я73

Д318

УДК 621.039.1:65.011.56(075.8)

В учебном пособии изложены аналитические методы вывода уравнений динамики типовых технологических участков, аппаратов и устройств АЭС и ТЭС. Рассмотрена динамика ядерных энергетических реакторов, турбогенераторов и энергоблоков. Изложены принципы построения АСУ ТП АЭС и ТЭС, систем управления и защиты ядерных реакторов. Описаны системы управления вспомогательным оборудованием энергоблоков и принципы организации защит тепломеханического оборудования.

Учебное пособие рассчитано на студентов специальности «Автоматизированное управление технологическими процессами». Оно будет полезно студентам энергетических специальностей «Атомная энергетика» и «Тепловые электрические станции», а также эксплуатационному персоналу АЭС и ТЭС.

Ил. 115. Табл. 7. Библиогр.: 25 назв.

У навчальному посібнику викладено аналітичні методи виводу рівнянь динаміки типових технологічних ділянок, апаратів та устаткування АЕС і ТЕС. Розглянута динаміка ядерних енергетичних реакторів, турбогенераторів та енергоблоків. Викладені принципи побудови АСУ ТП АЕС та ТЕС, систем управління та захисту реакторів. Описані системи управління допоміжним устаткуванням енергоблоків та принципи організації захисту тепломеханічного устаткування.

Навчальний посібник розрахований на студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами». Він буде корисний для студентів енергетичних спеціальностей «Атомна енергетика» та «Теплові електричні станції», а також експлуатаційному персоналу АЕС та ТЕС.

Ил. 115. Табл. 7. Библиогр.: 25 назв.

Рецензенты: Ю. К. Тодорцев, д-р техн. наук, профессор.

В. Д. Гогунский, д-р техн. наук, профессор

Спонсоры издания: Южно-Украинская АЭС, КБ «Теплоэнерго»

Д  $\frac{2205000000-026}{549-2001}$  Без объявл.

ISBN 966—549—541—0

© В. А. Демченко, 2001

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Квалифицированное проектирование и эксплуатация автоматизированных систем управления атомных и тепловых электростанций требуют от разработчиков и эксплуатационного персонала основательной теоретической подготовки.

В настоящее время при подготовке специалистов по автоматизации технологических процессов на АЭС и ТЭС в Одесском государственном политехническом университете читаются, в частности, такие специальные дисциплины: “Автоматизация непрерывных технологических процессов”, “Идентификация и моделирование технологических процессов” и “Управление процессами энергоблоков”.

Предлагаемое пособие охватывает основные разделы указанных учебных дисциплин. Поводом для написания пособия послужили следующие обстоятельства. Несмотря на наличие ряда учебных пособий, студенты вузов в настоящее время испытывают определенные трудности. Так, по моделированию технологических процессов АЭС и ТЭС практически нет обобщающего и методически грамотно написанного учебника. Кроме того, некоторые учебные пособия устарели либо их вообще нет в библиотеках вузов. Вопросы моделирования некоторых аппаратов и устройств можно найти лишь в периодических изданиях, в которых излагаемые материалы мало пригодны для использования в учебном процессе.

По автоматизации технологических процессов учебные пособия написаны в 70-е - 80-е гг. За прошедшие годы системы управления на АЭС и ТЭС претерпели ряд модернизаций и усовершенствований, что пока не отражено в литературе.

Трудности экономического положения и разрыв связей между научными и производственными коллективами также не способствуют написанию новой учебной литературы.

Данное пособие является попыткой систематизировать учебный материал по указанным трем дисциплинам учебного плана и тем самым устранить в какой-то мере указанный недостаток.

В первой части рассмотрены аналитические математические модели типовых участков теплоэнергетических установок, а также основного и вспомогательного оборудования АЭС и частично ТЭС.

Во второй части пособия рассмотрены принципы построения и функции современных АСУ ТП энергоблоков АЭС, системы управления и защиты реакторов, турбогенераторов, энергоблоков с реакторами типа ВВЭР, а также вспомогательного оборудования.

Автор надеется, что это пособие будет полезно не только студентам соответствующих профессий, но и сотрудникам цеха тепловой автоматики и измерений АЭС и ТЭС.

## ЧАСТЬ 1.

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТИПОВЫХ УЧАСТКОВ, АППАРАТОВ И МАШИН

## ВВЕДЕНИЕ

Моделирование - это воспроизведение и исследование характеристик некоторого объекта на другом объекте, специально созданном для их изучения. Этот вторичный объект, отображающий свойства, связи, характеристики объекта-оригинала, существенные для решаемой задачи, называется *моделью*.

Моделирование является одним из приемов научного познания, исследования и расчета при решении вопросов проектирования и создания новых машин, в частности энергоблоков и систем управления ими. Методы проектирования лежат в основе кибернетики (теории управления) и широко используются в прикладных разделах этой науки, например, при автоматизации производственных процессов.

По способу моделирования все модели делятся на *символические* (языковые) и *вещественные* (материальные). *Вещественные модели* - это материальные объекты, т.е. установки, агрегаты. Эти модели, в свою очередь, делятся на *физические*, в которых сохраняется природа явлений объекта, и *приборные*.

*Символические модели* делятся по назначению на гносеологические (познавательные), информационные и чувственные (образные). Гносеологические модели служат для установления законов природы, информационные - для разработки методов и систем управления, чувственные - для описания чувств, эмоций, воздействий на людей.

По типу языка описания символические модели разделяются на *текстовые* (словесные), *графические* (чертежи, схемы), *математические* и *смешанные*.

По способу построения символические модели делятся на *аналитические* (теоретические), *формальные* (экспериментальные) и *комбинированные*.

*Математическое* моделирование основывается на тождественности уравнений, описывающих процессы модели и исследуемого явления.

*Аналитические* модели строятся на основе теоретического анализа физико-химических явлений, протекающих в объекте, и составлении дифференциальных или конечных уравнений сохранения вещества, энергии и импульса.

Принципиальная особенность аналитического метода заключается в том, что для составления математического описания не требуется постановка экспе-

римента на объекте, поэтому появляется возможность нахождения уравнений статики и динамики вновь проектируемых аппаратов. Кроме того, полученное таким путем математическое описание применимо для описания свойств других однотипных объектов. К недостаткам аналитических методов следует отнести невысокую точность описания свойств объектов и большую трудоемкость. Формальные модели строятся по данным экспериментальных исследований, в процессе которых устанавливаются взаимосвязи между входными воздействиями и выходными параметрами состояния объекта. При этом объект может рассматриваться как "черный ящик", о свойствах которого заранее ничего не известно. Поэтому экспериментальные модели плохо отражают внутреннюю структуру объекта. Экспериментальные методы базируются чаще всего на предположении о линейности и сосредоточенности параметров объекта, неизменности во времени его статических и динамических характеристик. Принятие таких допущений позволяет сравнительно просто описывать наблюдаемые процессы линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами и алгебраическими зависимостями. Достоинство экспериментальных методов - их относительная простота и малая трудоемкость при достаточно точном описании свойств объекта в узком "рабочем" диапазоне изменения входных и выходных координат. Основные недостатки экспериментальных методов - невозможность установления функциональной связи между входными и выходными параметрами и конструктивными, а также режимными показателями процесса, пригодность полученных уравнений только для исследуемого диапазона изменения входных и выходных координат, а также невозможность распространения полученных зависимостей для других однотипных объектов. При аналитическом выводе математических моделей необходимо знание коэффициентов теплообмена, диффузии, кинетических констант реакций, которые определяются путем постановки тонких и сложных лабораторных экспериментов. Эти коэффициенты не всегда известны, поэтому при выводе уравнений приходится вводить упрощающие допущения, что снижает точность математического описания. По этой причине достаточно часто используется комбинированный подход к построению моделей: исследователь задается основными закономерностями и структурой объекта, а численные значения параметров уравнений определяются по экспериментальным данным. В таком экспериментально-аналитическом методе сохраняются многие положительные свойства экспериментальных и аналитических методов, однако такой метод нельзя использовать для составления математического описания вновь создаваемых объектов.

Модели объектов управления относятся к классу информационных и описывают их причинно-следственные связи.

В терминах теории автоматического регулирования модель объекта - это средство получения информации о влиянии входных воздействий на выходные управляемые величины и параметры.

Таким образом, разработав математическую модель исходного объекта, можно на модели исследовать необходимые зависимости и характеристики того объекта.

Формально математическая модель представляет собой замкнутую систему уравнений, функций и соотношений, связывающих входные и выходные координаты объекта, причем, в корректно составленной модели общее число линейно независимых соотношений, уравнений и функций должно быть равно числу моделируемых параметров состояний (координат). Математическая модель объекта содержит уравнения статики и динамики. Математические выражения для установившегося во времени режима работы описывают статику объекта, а уравнения, определяющие зависимость выходных координат объекта от входных, называются *статическими характеристиками*.

Объекты могут быть стационарными и нестационарными. Уравнения статики стационарных объектов не зависят от времени, в то время как для нестационарных зависят от времени и режима работы.

Для многих промышленных объектов изменения статических характеристик во времени невелики, и такие объекты рассматриваются в первом приближении как стационарные.

Уравнения, устанавливающие зависимость изменений выходных координат объекта во времени от вариаций входных возмущающих воздействий, называются *динамическими характеристиками*. Универсальным видом описания динамической характеристики является дифференциальное уравнение (аналитическая детерминированная модель).

Используются также логические вероятностные и графические модели.

В данном пособии рассматриваются принципы построения аналитических детерминированных моделей для теплоэнергетических объектов управления. Чаще всего используются линейные аналитические математические модели, что позволяет сравнительно легко оценивать статические и динамические характеристики объекта управления в первом приближении [1, 2].

Линейная математическая модель (объекта) регулируемого аппарата (в дальнейшем аппарата) может быть представлена в виде линейного неоднородного дифференциального уравнения (ЛНДУ) с постоянными коэффициентами не более 2-3-го порядка (или системой дифференциальных уравнений 1-го порядка), а также передаточной функцией по заданному каналу, где  $e$  - вход;  $a$  - выход канала.

Дифференциальные уравнения могут быть представлены в абсолютных, относительных переменных и в приращениях. Например:

$$\Delta y' + y = Kx, \quad (B.1)$$

где  $x$  - абсолютное значение входной переменной (возмущение);

$y$  - то же для выходной переменной;

$$y' = dy / dt$$

Если известны значения переменных в номинальном режиме  $X_n, Y_n$ , то обозначив

$$\varphi = y/y_n; \mu = x/x_n,$$

можно написать уравнение (В.1) в относительных переменных

$$T\varphi' + \varphi = K\mu. \quad (B.2)$$

Уравнение (В.1) можно также записать в таком виде

$$Ty' = Kx - y. \quad (B.3)$$

В установившемся режиме  $y' = 0$ ,

$$Kx_0 - y_0 = 0.$$

При изменении режима

$$x_{20} = (x_{10} + \Delta x); \quad y_{20} = (y_{10} + \Delta y),$$

т.е.

$$Ty' = K(x_{20} - x_{10}) - (y_{20} - y_{10});$$

$$x_{20} - x_{10} = \Delta x; \quad y_{20} - y_{10} = \Delta y,$$

тогда, заменив производную дифференциалом, получим

$$T\Delta y' + \Delta y = K\Delta x. \quad (B.4)$$

Уравнение в абсолютных приращениях по аналогии с (В.2) можно записать в относительных приращениях.

Из уравнения (В.4) получают передаточную функцию

$$W_{\Delta x \rightarrow \Delta y}(S) = \frac{K}{TS + 1}. \quad (B.5)$$

Оценка свойств аппарата с помощью аналитической математической модели сводится к ее построению и вычислению коэффициентов дифференциального уравнения, где  $T$  - постоянная времени;  $K$  - коэффициент передачи.

При построении линейной математической модели объекта осуществляется, как правило, такая последовательность действий:

1. Получение априорных сведений об объекте управления (ОУ). На этом этапе составляются параметрическая и принципиальная (расчетная) схемы ОУ. Последняя отражает структуру соединения технических устройств (аппаратов).

Определяются геометрические и физические характеристики (длина, диаметр, объем, масса и т.д.) всех элементов технических устройств.

На основе знаний о технологическом процессе и параметрической схеме ОУ определяются режимные характеристики ОУ (расход, давление, температура, уровень и т.д.), каналы управления и помех.

Зная геометрические и режимные характеристики, находят теплофизические и гидравлические свойства рабочих тел и оболочки (плотность, теплоемкость, гидравлическое сопротивление и т.д.).

Если принципиальная схема ОУ получается сложной, но допускает разделение на самостоятельные элементы, производится декомпозиция ОУ, и предыдущие операции выполняются для всех подсистем (участков).

2. Анализ технологических процессов в аппарате и формулирование допущения об определяющих физических процессах, сосредоточенности или распределенности параметров объекта.

3. Запись необходимых уравнений для определяющих физических процессов: компонентные и топологические уравнения, законы сохранения, уравнения состояния рабочих тел, условия однозначности.

4. Линеаризация исходных дифференциальных уравнений и замыкающих зависимостей с использованием разложения в ряд Тейлора

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \dots$$

Так как используется запись в приращениях от какой-то точки  $X_0$ , то

$$\Delta f(x) = f'(x_0) \Delta x \dots$$

Например, перепад давления в трубопроводе  $\Delta P_{\text{л}} = KM^n$ , тогда для  $n=2$  имеем  $\Delta \Delta P_{\text{л}} = 2K\bar{M} \Delta M$ ,

где  $\Delta P'_{\text{л}}(M_0) = 2K\bar{M}$ .

5. Алгебраические преобразования линеаризованных уравнений к передаточной функции по искомому каналу с получением выражений для коэффициентов.

6. Вычисление численных значений коэффициентов передаточной функции и анализ структуры полученной передаточной функции.

В технологических процессах, как правило, приходится осуществлять управление по следующим параметрам твердых, жидких и газообразных сред: температура  $T$ ; расход  $M$ , давление  $P$ ; концентрация  $C$  и масса  $m$ , которая обычно характеризуется уровнем  $H$  среды в постоянном объеме аппарата.

Температуру обычно регулируют в теплообменных устройствах (ТУ) или системах передачи тепла (СПТ).

Расход, давление, концентрация и уровень характеризуют потоки вещества в ограниченном объеме, который назовем участком объекта управления. При моделировании автоматических систем регулирования (АСР) различают следующие основные участки:

- расхода;
- давления;
- уровня;
- концентрации.

В этом учебном пособии содержатся сведения об аналитических моделях основных участков, аппаратов, машин и энергоблоков.

# 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ СОХРАНЕНИЯ, СОСТОЯНИЯ И КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ВЫВОДЕ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ

При создании математической модели применяют системы координат Эйлера или Лагранжа. Система координат Эйлера фиксирована в пространстве. Эта система координат приводит к понятию "фиксированный объем среды". В системе координат Лагранжа начало системы координат жестко связано с конкретной материальной частицей (телом, системой), при этом система координат перемещается в пространстве. Чаще всего используется система координат Эйлера. Уравнения динамики составляются на основе трех уравнений сохранения: массы, энергии и количества движения. Все они имеют общий вид

$$\text{НАКОПЛЕНИЕ} = \text{ПРИТОК} - \text{СТОК},$$

т.е. изменение во времени массы, энергии или количества движения рассматриваемого объема определяется небалансом между притоком и стоком соответствующих потоков. Рассмотрим вывод этих уравнений.

## 1.1. Уравнение сохранения массы

Выделим в системе координат XYZ элементарный объем со сторонами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ , через который протекает поток вещества. Поток имеет сложное движение, а именно: входит в элементарный объем через все грани с одной стороны и выходит через противоположные. Уравнение сохранения формулируется так: изменение массы среды во времени равно небалансу между притоком и стоком среды, т.е.

$$\frac{dm}{dt} = M_{\text{в}} - M_{\text{в}} \quad (1.1)$$

где  $m$  - масса среды в рассматриваемом объеме, кг,

$M_{\text{в}}$ ,  $M_{\text{в}}$  - массовый расход среды на входе и выходе, кг/с.

Найдем массовый расход среды на входе по всем трем координатам

$$M_x = \rho \omega_x dydz,$$

где  $\rho$  - плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>,

$\omega_x$  - проекция вектора скорости на ось X, м/с.

Аналогично по координатам Y и Z

$$M_y = \rho \omega_y dx dz$$

$$M_z = \rho \omega_z dx dy.$$

Сток массы на координате  $x + dx$

$$M_{x+dx} = \rho \omega_x dydz + \frac{\partial(\rho \omega_x)}{\partial x} dydz dx.$$

Приращение расхода  $\Delta M_x$  по X

$$\Delta M_x = M_x - M_{x+\Delta x} = -\frac{\partial(\rho\omega_x)}{\partial x} dydzdx.$$

Аналогично можно получить

$$\Delta M_y = -\frac{\partial(\rho\omega_y)}{\partial y} dx dy dz.$$

$$\Delta M_z = -\frac{\partial(\rho\omega_z)}{\partial z} dx dy dz.$$

Суммарное накопление массы во времени

$$\Delta M_\Sigma = \frac{dm}{dt} = \Delta M_x + \Delta M_y + \Delta M_z.$$

Учитывая, что  $dm = \rho\Delta V = \rho dx dy dz$ , получим

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz = -\left[ \frac{\partial(\rho\omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\omega_z)}{\partial z} \right] dx dy dz.$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой дивергенцию вектора  $(\rho\omega)$ , поэтому полученное выражение перепишем в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\omega) = 0. \quad (1.2)$$

Рассмотрим частные случаи:

1. Для несжимаемой жидкости, когда  $\rho = \text{const}$ , получаем

$$\operatorname{div}(\omega) = 0. \quad (1.3)$$

2. Если  $\rho = f(t)$ , но не зависит от пространственных координат, имеем

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div}(\omega) = 0. \quad (1.4)$$

3. Для установившегося движения, когда расход на притоке равен расходу на стоке, т.е.  $\Delta M_\Sigma = 0$ , получаем

$$\text{и} \quad \operatorname{div}(\rho\omega) = 0 \quad (1.5)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = 0. \quad (1.6)$$

4. Для одномерной модели, когда есть распределенность параметров только по  $X$ ,

$$\frac{dp}{dt} + \frac{\partial(\rho\omega_x)}{\partial x} = 0 \quad (1.7)$$

Умножим обе части уравнения на сечение  $S$ , нормальное оси  $X$ , тогда с учетом того, что  $\rho\omega_x S = M_x$ , получаем

$$S \frac{dp}{dt} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1.8)$$

5. Модель с сосредоточенными параметрами, когда параметры зависят только от времени и не зависят от пространственных координат. Производная по  $X$  заменяется отношением разности значений функций на входе и выходе к длине канала

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\omega_y)}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho\omega_x)}{\partial z} &= 0; \\ \frac{d(\rho\omega_x)}{dx} &= \frac{\rho\Delta\omega_x}{\Delta x} = \frac{\rho(\omega_a - \omega_c)}{\Delta x} \end{aligned}$$

В этом случае получаем

$$\frac{d\rho}{dt} = - \frac{\rho(\omega_a - \omega_c)}{\Delta x} \quad (1.9)$$

Умножим обе части уравнения на сечение  $S$  и, учитывая, что  $S\Delta x = V$ , получаем

$$V \frac{d\rho}{dt} = M_c - M_a \quad (1.10)$$

где  $V$  - объем рассматриваемого элемента.

## 1.2. Уравнение сохранения энергии

Изменение энергии  $E$  рассматриваемого объема во времени равно небалансу между притоком энергии  $Q_c$  и стоком энергии  $Q_a$ , т.е.

$$\frac{dE}{dt} = Q_c - Q_a \quad (1.11)$$

При этом энергия может быть тепловая и механическая, кроме того, она может поступать в рассматриваемый объем с самим веществом и извне (внешняя) за счет конвекции, излучения и теплопроводности.

Поток тепловой энергии по координате  $X$  на входе:

$$Q_x^T = \rho\omega_x dydz \cdot e$$

где  $\epsilon$  - удельная полная энергия одного килограмма вещества, Дж/кг.

Аналогично по координатам  $Y$  и  $Z$ :

$$Q_y^T = \rho \omega_y dx dz \cdot \epsilon$$

$$Q_z^T = \rho \omega_z dx dy \cdot \epsilon$$

Потоки тепловой энергии на выходе рассматриваемого объема по трем координатам:

$$Q_{x+dx}^T = \rho \omega_x dy dz \cdot \epsilon + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \omega_x \epsilon) dx dy dz ;$$

$$Q_{y+dy}^T = \rho \omega_y dx dz \cdot \epsilon + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \omega_y \epsilon) dx dy dz ;$$

$$Q_{z+dz}^T = \rho \omega_z dx dy \cdot \epsilon + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \omega_z \epsilon) dx dy dz ;$$

Изменение потоков тепловой энергии по координатам:

$$\Delta Q_x^T = -\frac{\partial}{\partial x} (\rho \omega_x \epsilon) dx dy dz ;$$

$$\Delta Q_y^T = -\frac{\partial}{\partial y} (\rho \omega_y \epsilon) dx dy dz ;$$

$$\Delta Q_z^T = -\frac{\partial}{\partial z} (\rho \omega_z \epsilon) dx dy dz .$$

Суммарное изменение:

$$\Delta Q_{\Sigma}^T = \Delta Q_x^T + \Delta Q_y^T + \Delta Q_z^T = -\text{div}(\rho \vec{\omega} \epsilon) dx dy dz . \quad (1.12)$$

Поток механической энергии по координатам:

$$Q_x^M = P dy dz \omega_x ;$$

$$Q_y^M = P dx dz \omega_y ;$$

$$Q_z^M = P dx dy \omega_z ,$$

где  $P$  - давление среды, Па.

Суммарное изменение потока механической энергии:

$$\Delta Q_{\Sigma}^M = -\text{div}(P \vec{\omega}) dx dy dz . \quad (1.13)$$

Рассмотрим левую часть уравнения (1.11)

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) dx dy dz . \quad (1.14)$$

Подставив (1.12)-(1.14) в исходное уравнение (1.11), получим

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} = -[\text{div}(\rho \vec{\omega} \epsilon) + \text{div}(P \vec{\omega})] + Q_{BH} . \quad (1.15)$$

Здесь  $Q_{BH}$  не раскрывается.

Рассмотрим частные случаи.

1. Одномерная модель при  $Q_{ВН} = 0$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho \omega_x e + P \omega_x) . \quad (1.16)$$

Удельную полную энергию  $e$  можно представить суммой внутренней, кинетической и потенциальной энергий, т.е.

$$e = U + \frac{\omega^2}{2} + g z_0 . \quad (1.17)$$

Принимая во внимание, что  $\rho \omega_x S = M_x = M$ , а энтальпия  $i = U - PV = U - \frac{P}{\rho}$ , после преобразований получаем

$$S(\rho \frac{di}{dx} - \frac{P}{dt}) = -M(\frac{\partial i}{\partial x} + \frac{\partial(\partial \omega_x)}{dt} + g \frac{\partial z_0}{\partial x}) \quad (1.18)$$

Если пренебречь изменениями кинетической и потенциальной энергий, а также давления, то получим

$$S\rho \frac{\partial i}{\partial t} = -M \frac{\partial i}{\partial x} . \quad (1.19)$$

2. Модель с сосредоточенными координатами:

$$S\rho \frac{di}{dt} = \frac{M_e i_e - M_a i_a}{\Delta x}$$

Домножив обе части уравнения на  $\Delta X$  и учитывая, что  $S\Delta x = V$ , получим

$$\text{или} \quad V\rho \frac{di}{dt} = M_e i_e - M_a i_a , \quad (1.20)$$

$$V\rho c \frac{d\theta}{dt} = M_e i_e - M_a i_a , \quad (1.21)$$

где  $c$  - удельная теплоемкость среды;

$\theta$  - температура среды.

### 1.3. Уравнение сохранения количества движения

Изменение количества движения рассматриваемого объема во времени равно сумме всех сил (тяжести, давления и трения).

$$\frac{d(m\omega)}{dt} = \sum F_s + \sum F_p + \sum F_{тр} . \quad (1.22)$$

Записав выражения для всех сил и найдя приращения, после некоторых преобразований получаем

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} = -\rho(\omega \operatorname{grad} \omega) - \operatorname{grad} P + g\rho - \mu \nabla^2 \omega, \quad (1.23)$$

где  $\nabla$  - градиент скалярного поля;  
 $\mu$  - коэффициент динамической вязкости.

Рассмотрим частные случаи.

1. Одномерная модель по координате  $X$

$$\rho \frac{\partial \omega_x}{\partial t} + \rho \omega_x \frac{\partial \omega_x}{\partial X} = \rho g \sin \alpha - \frac{\partial P}{\partial X} - \frac{\partial P_{\text{тр}}}{\partial X}, \quad (1.24)$$

где  $\alpha$  - угол оси  $X$  к горизонтали.

2. Модель с сосредоточенными параметрами.

$$\rho \frac{d\omega}{dt} = \rho g \sin \alpha + \frac{P_e - P_a}{\Delta X} - \frac{P_{\text{тр}}}{\Delta X}. \quad (1.25)$$

Если домножить обе части уравнения на длину участка  $\Delta X = L$ , то получим

$$L\rho \frac{d\omega}{dt} = L\rho g \sin \alpha + P_e - P_a - P_{\text{тр}}. \quad (1.26)$$

Если левую часть уравнения умножить и разделить на  $S$ , то с учетом того, что  $\rho S d\omega = dM$ , получим

$$\frac{L}{S} \frac{dM}{dt} = L\rho g \sin \alpha + P_e - P_a - P_{\text{тр}}. \quad (1.27)$$

Если обе части уравнения (1.25) умножить на  $S\Delta X$ , то получим другую форму записи

$$m \frac{d\omega}{dt} = mg \sin \alpha + F_{pe} - F_{pa} - F_{\text{тр}}. \quad (1.28)$$

#### 1.4. Уравнения состояния и краевые условия

Система уравнений сохранения должна быть дополнена уравнениями состояния. К таким относятся уравнения Клапейрона, Ван-дер-Ваальса и др.

При выводе уравнений динамики, кроме уравнений состояния, используются также основные уравнения процессов передачи тепла (теплопроводности, теплоотдачи), массопередачи, кинетики химических реакций и др.

Система уравнений в частных производных характеризует распределение параметров потока в любой точке пространства и времени. Для получения однозначного решения необходимо знание о координатах процесса на границах и в момент, с которого начинается решение. Учесть это возможно заданием определенных начальных и граничных (краевых) условий.

Начальные условия характеризуют распределение параметров в стационарном режиме при  $t_0$  по пространственным координатам. Обычно используют нулевые начальные условия.

Граничные условия определяют изменение параметров на границе области существования или закон взаимодействия с окружающей средой (оболочкой).

Если начальные условия - временные краевые условия, то граничные условия - пространственные краевые условия.

Граничные условия первого рода определяют распределение температуры (для термодинамических систем) по поверхности оболочки, второго рода - закон распределения теплового потока по поверхности, третьего рода - закон теплообмена между оболочкой и окружающей средой.

## **2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧАСТКА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ РАСХОДА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ [1]**

### **2.1. Обобщенная принципиальная схема участка**

Схема участка изображена на рис.2.1.

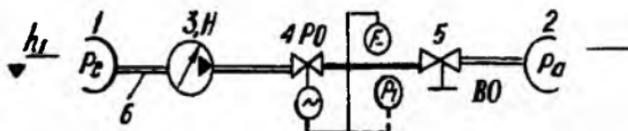


Рис.2.1. Принципиальная схема участка расхода (давления) несжимаемой среды

Априорные данные о характеристиках участка могут быть получены из проектных материалов, справочной литературы или информационных материалов, выпускаемых отраслевыми институтами.

Жидкость протекает из резервуара 1 в резервуар 2 через трубопровод б. В произвольной точке трубопровода может быть установлен клапан 5, который является возмущающим органом. Перемещение этого клапана осуществляется внешними устройствами или вручную. Помимо этого, на трубопроводе имеется регулирующий орган, функции которого может выполнять дроссельный или байпасный клапан 4, а также насос 3 с регулируемым числом оборотов.

Для моделирования необходимы следующие данные:

**Геометрические характеристики:**

а) трубопровода - диаметр,  $m$ ; длина прямых участков  $L$ ,  $m$ ; число и характер местных сопротивлений (сужение, расширение, поворот и т.д.) для подсчета суммарного значения коэффициентов потерь энергии в участке  $\sum \xi$ ;

б) регулирующего и запорного органов 4, 5. Проходное сечение в заданном режиме  $S$ ,  $m^2$ ; коэффициент расхода, условный диаметр  $d_u$ , условная пропускная способность  $K_{vu}$  (или  $C$ ).

Параметрическая схема участка может иметь 2 варианта (рис.2.2).

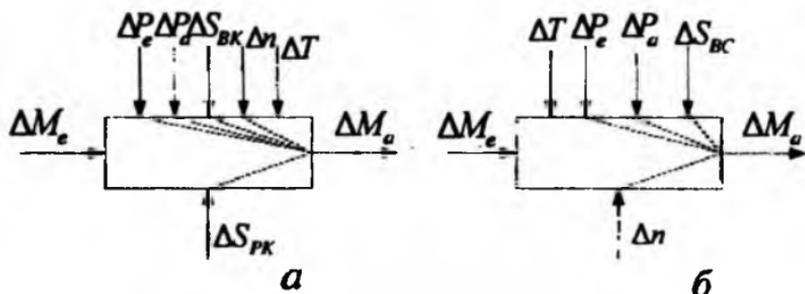


Рис.2.2. Параметрическая схема участка расхода

На рис.2.2,а показана параметрическая схема для случая, когда расход изменяется величиной сечения регулирующего клапана (дрессельное регулирование), а на рис.2.2,б - воздействием на число оборотов насоса.

**Режимные характеристики участка:**

а) характеристики рабочего тела:  $T$ ,  $^{\circ}C$ ;  $P$ ,  $Pa$ ;  $M$ ,  $kg/s$ ;

б) характеристики насоса, клапана и линии:  $H = f(M)$  при  $n = const$ ;  $\Delta P_{PK}$  - перепад на РК,  $Pa$ ;  $\Delta P_{л}$ ,  $Pa$  (рис.2.3);

в) теплофизические характеристики среды:  $\rho$  - плотность,  $kg/m^3$ ; динамическая вязкость  $\mu$ ,  $Hs/m^2$ .

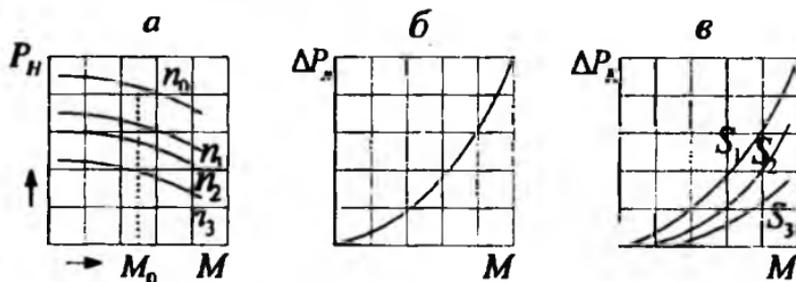


Рис.2.3. Характеристики элементов участка регулирования расхода (давления) несжимаемой жидкости

## 2.2. Физические процессы на участке

Как следует из принципиальной схемы, участок представляет собой оболочку, через которую перемещается поток несжимаемой жидкости. Подвода и отвода тепла нет (или ими можно пренебречь).

Определяющий физический процесс - механическое перемещение массы жидкости. Поскольку потери энергии (изменения давления) на таких участках, как правило, небольшие, а жидкость практически несжимаема, нет необходимости записывать уравнение сохранения массы, а также (из-за отсутствия теплообмена) закон сохранения энергии.

Поэтому основные свойства участка описываются уравнением сохранения количества движения (баланс сил).

## 2.3. Составление математической модели

Введем допущение, что участок представляет собой объект с сосредоточенными параметрами. В данном случае баланс сил  $m\dot{a} = \sum F$

$$m \frac{d\omega}{dt} = mg \sin \alpha + F_{pc} - F_{pa} - F_T, \quad (2.1)$$

ГДЕ  $m$  - МАССА ЖИДКОСТИ В СОСРЕДОТОЧЕННОМ ОБЪЕМЕ, КГ;

$\omega$  - скорость жидкости, м/с;

$F_{pc}$ ,  $F_{pa}$  - сила давления на входе и выходе, Н;

$mg \sin \alpha = F_g$  - сила тяжести, Н;

$\alpha$  - угол наклона участка к горизонту;

$F_T$  - сила трения, Н.

Сила давления на входе создается давлением в источнике и насосом.

Если пренебречь силой тяжести и перейти от баланса сил к балансу давлений, то получим

$$\frac{L}{S_{TP}} \frac{dM}{dt} = P_c + \Delta P_H - P_a - \Delta P_T, \quad (2.2)$$

ГДЕ  $\Delta P_H$ ,  $\Delta P_T$  - ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ НА НАСОСЕ И ПОТЕРИ НА ТРЕНИЕ.

В приращениях

$$\frac{L}{S_{TP}} \frac{d\Delta M}{dt} = \Delta P_c - \Delta \Delta P_H - \Delta P_a - \Delta \Delta P_T, \quad (2.3)$$

где  $L$  - суммарная длина прямых частей трубопровода на участке, м;

$S_{TP}$  - сечение трубопровода,  $m^2$ .

Потери давления на трение складываются из трех составляющих: потери в трубопроводе  $\Delta\Delta P_{TP}$ , потери в регулирующем клапане  $\Delta\Delta P_{PK}$ , потери в возмущающем (запорном) клапане  $\Delta\Delta P_{BK}$ .

Если не учитывать внешнего перепада  $P_e - P_a$ , который можно принять постоянным или не зависящим от расхода, то все остальные перепады зависят от расхода.

Для насоса эта зависимость может быть получена с помощью семейства расходных характеристик (рис.2.3,а). Так как для разных типов насосов эти характеристики существенно отличаются друг от друга, то приходится отказаться от вывода точных соотношений между напором насоса, расходом  $M$  и числом оборотов насоса  $n$ . В первом приближении достаточно установить, что перечисленные три величины связаны между собой

$$\Delta P_n = \Delta P_n(M, n). \quad (2.4)$$

Потери давления в трубопроводе определяют по упрощенному уравнению (рис.2.3,б)

$$\Delta P_n = K_n M^m. \quad (2.5)$$

При турбулентном движении обычно принимают показатель степени  $m=2$ .

Если для возмущающего органа (клапана 5) принять постоянные коэффициенты расхода, то зависимость между потерей давления в клапане  $\Delta P_{BK}$ , расходом  $M$  и проходным сечением  $S_{BK}$  выражается такой формулой

$$\Delta P_{BK} = K_{BK} \left( \frac{M}{S_{BK}} \right)^2, \quad (2.6)$$

$$K_{BK} = \frac{1}{\alpha_{BK}^2 2\rho} = \frac{\xi_{BK}}{2\rho}, \quad (2.7)$$

где  $\alpha_{BK}$  - коэффициент расхода клапана;

$\xi_{BK}$  - коэффициент сопротивления клапана.

Приняв  $S_{BK}$  в качестве независимой переменной, получим общеизвестное семейство кривых (рис.2.3,в). Аналогичная зависимость может быть получена для регулирующего клапана

$$\Delta P_{PK} = K_{PK} \left( \frac{M}{S_{PK}} \right)^2, \quad (2.8)$$

где  $S_{PK}$  - проходное сечение дроссельного клапана.

Таким образом, исходная математическая модель участка представляет собой систему нелинейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{S_{TP}} \frac{dM}{dt} &= \Delta P_* + \Delta P_H - \Delta P_{PK} - \Delta P_L - \Delta P_{BK} - \Delta P_a \\ \Delta P_H &= f(\Delta M, \Delta n) \\ \Delta P_{PK} &= K_{PK} \left( \frac{M}{S_{PK}} \right)^2 \\ \Delta P_{BK} &= K_{BK} \left( \frac{M}{S_{BK}} \right)^2 \\ \Delta P_L &= K_L M^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

#### 2.4. Линеаризация исходных уравнений

Известно, что внешний (начальный) перепад давлений не зависит от расхода  $M$ . Отклонения  $\Delta P_e$  и  $\Delta P_a$  в соответствии с этим должны рассматриваться как возмущающие воздействия.

Значение  $\Delta \Delta P_H$  находят путем дифференцирования уравнения (2.3)

$$\Delta \Delta P_* = \Delta P_{*e} - \Delta P_{*a} = \frac{\partial \Delta P_H}{\partial M} \Delta M + \frac{\partial \Delta P_*}{\partial n} \Delta n \quad (2.10)$$

Частные производные в выражении полного дифференциала определяются графическим путем из семейства нагрузочных характеристик насоса (рис.2.3,а) либо из соотношений

$$\frac{M_1}{\rho_1} = \frac{M_0}{\rho_0} \left( \frac{n_1}{n_0} \right); \quad \Delta P_{n1} = \Delta P_{n0} \left( \frac{n_1}{n_0} \right)^2 \quad (2.11)$$

Для определенных отклонений  $n_1 - n_0$  или  $M_1 - M_0$  от установившегося состояния, соответствующего точке  $P_0$ , можно сразу найти изменение развиваемого напора. Для центробежных насосов в рабочем диапазоне практически всегда  $\partial \Delta P_H / \partial M < 0$ , т.е. увеличение расхода связано с уменьшением напора. Уравнение (2.10) можно упростить

$$\Delta \Delta P_H = a_H \Delta M + \epsilon_H \Delta n; \quad a_H = \frac{\partial \Delta P_H}{\partial M}; \quad \epsilon_H = \frac{\partial \Delta P_H}{\partial n} \quad (2.12)$$

Изменение потерь на трение в трубопроводах находят дифференцированием уравнения (2.5) (при  $m = 2$ ):

$$\Delta \Delta P_L = \frac{\partial \Delta P_L}{\partial M} \Delta M = 2K_L \bar{M} \Delta M, \quad (2.13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} K_{л} &= \frac{1}{2\rho S^2_{TP}} \left( \frac{\lambda_{TP} L}{d_{TP}} + \sum \xi_{MC} \right) \\ \lambda_{TP} &= 0,11 \left( \frac{K_3}{d_{TP}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}; K_3 = 0,05 + 0,5 \text{ мм} \\ &\text{для турбулентного течения } Re > 2000 \\ Re &= \frac{\omega d_{TP}}{\vartheta}; \omega = \frac{\bar{M}}{S_{TP} \rho}; \vartheta = \frac{\mu}{\rho} \end{aligned} \right\} (2.14)$$

где  $\sum \xi_{MC}$  - сумма местных сопротивлений трубопровода;

$\lambda_{TP}$  - коэффициент трения;

$K_3$  - эквивалентная шероховатость трубы (0,05-0,5 мм);

$\vartheta, \mu$  - кинематическая и динамическая вязкости среды соответственно.

При  $Re < 2000$   $\lambda_{TP}$  вычисляется по формуле  $64/Re$ , а  $M \approx 1$ , здесь  $M$  можно считать постоянным (установившееся значение).

Обозначив  $a_{л} = 2 \cdot K_{л} \cdot \bar{M}$ , получаем

$$\Delta \Delta P_{л} = a_{л} \Delta M. \quad (2.15)$$

Изменение перепада давлений как на возмущающем, так и на регулирующем клапанах является следствием изменения расхода или перемещения клапана. В соответствии с этим путем дифференцирования (2.5) находим

$$\Delta \Delta P_{вк} = \frac{\partial \Delta P_{вк}}{\partial M} \Delta M + \frac{\partial \Delta P_{вк}}{\partial S_{вк}} \Delta S_{вк} = \frac{2K_{вк} \bar{M}}{S_{вк}^2} \Delta M - \frac{2K_{вк} \bar{M}^2}{S_{вк}^3} \Delta S_{вк}. \quad (2.16)$$

Вводя обозначения  $a_{вк} = \frac{2K_{вк} \bar{M}}{S_{вк}^2}$ ;  $b_{вк} = \frac{2K_{вк} \bar{M}^2}{S_{вк}^3}$ , получаем

$$\Delta \Delta P_{вк} = a_{вк} \Delta M - b_{вк} \Delta S_{вк} \quad (2.17)$$

и аналогично для регулирующего клапана

$$\Delta \Delta P_{рк} = a_{рк} \Delta M - b_{рк} \Delta S_{рк} \quad (2.18)$$

Так же, как это сделано для насоса, можно и для клапана по его характеристикам найти частные производные (рис.2.3,в). Обозначим

$a_{ин} = L/S_{TP}$ . Таким образом, получим линейную аналитическую модель участка расхода:

$$\left. \begin{aligned} a_{ин} \frac{d\Delta M}{dt} &= \Delta P_e + \Delta\Delta P_H - \Delta\Delta P_{PK} - \Delta\Delta P_L - \Delta\Delta P_{BK} - \Delta P_a \\ \Delta P_H &= a_H \Delta M + e_H \Delta n \\ \Delta P_{PK} &= a_{PK} \Delta M - e_{PK} \Delta S_{PK} \\ \Delta P_{BK} &= a_{BK} \Delta M - e_{BK} \Delta S_{BK} \\ \Delta P_L &= a_L \Delta M \end{aligned} \right\} (2.19)$$

## 2.5. Алгебраические преобразования исходных линейных уравнений

Если подставить найденные выражения для потерь давления в первое уравнение (2.19), то получим

$$\begin{aligned} a_{ин} \Delta M' + (a_H + a_L + a_{PK} + a_{BK}) \Delta M &= \\ = \Delta P_e - \Delta P_a + e_H \Delta n + e_{BK} \Delta S_{BK} + e_{PK} \Delta S_{PK} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Это дифференциальное уравнение первого порядка характеризует в общем виде динамические свойства системы по расходу жидкости. В отдельных частных случаях некоторые члены этого уравнения могут отсутствовать. Так, например, внешний перепад давлений может оставаться постоянным. При этом  $\Delta P_e - \Delta P_a = 0$ ; насос может работать при постоянном числе оборотов

$$e_H \cdot \Delta n = 0 \text{ или совсем отсутствовать } a_H = 0, \quad e_H \Delta n = 0.$$

Для использования уравнения (2.20) нужно конкретизировать структуру участка с учетом принятой системы регулирования.

Возможны следующие варианты (рис.2.4).

При регулировании расхода регулируемой величиной является сам расход  $M$  или его отклонение от установившегося состояния  $\Delta M$ .

В схеме рис.2.4,а насос отсутствует, перетекание жидкости происходит только за счет разности давлений в резервуарах  $P_e$  и  $P_a$ . Во всех остальных случаях к разности давлений добавляется напор, развиваемый насосом 3. Для случаев а и б регулирование осуществляется путем дросселирования потока в регулирующем клапане, в случае рис.2.4,в - с помощью изменения числа оборотов насоса. И, наконец, в случае рис.2.4,г применено регулирование с помощью байпаса. Регулирующий клапан отводит из системы избыток жидкости, подаваемой насосом.

Последовательность размещения элементов может отличаться от показанной на рис.2.4. Место измерения регулируемой величины может быть

расположено по-другому, что имеет особо важное значение при регулировании давления.

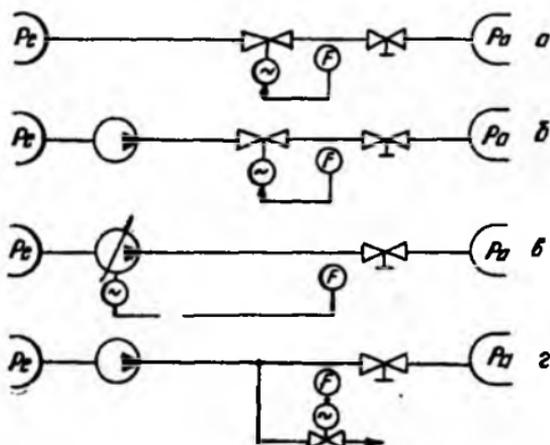


Рис.2.4. Принципиальные схемы участка при регулировании расхода (давления) несжимаемой среды

В качестве регулирующего воздействия при использовании дроссельного органа служит изменение поперечного сечения  $\Delta S_{PK}$ , при воздействии на насос - изменение числа оборотов  $\Delta n$ .  $\Delta P_a, \Delta P_n$  и  $\Delta S_{BK}$  могут играть роль возмущающих воздействий. В некоторых случаях при регулировании путем дросселирования величина  $\Delta n$  может быть также возмущающим воздействием (рис.2.4,б), например, при изменении частоты сети.

## 2.6. Динамические характеристики участка при регулировании расхода путем дросселирования или изменением напора насоса.

### 2.6.1. Регулирование расхода путем дросселирования

Если в качестве управляющего воздействия принять  $\Delta S_{PK}$  (изменение сечения клапана, регулируемое гидравлическое сопротивление) и в качестве выходного параметра  $\Delta M$ , то дифференциальное уравнение участка принимает вид

$$a_{ин} \Delta M' + (a_n + a_d + a_{BK} + a_{PK}) \Delta M = v_{PK} \Delta S_{PK} \quad (2.21)$$

Это выражение получается из уравнения (2.20), если принять, что возмущающие воздействия  $\Delta P_a, \Delta n$  и  $\Delta S_{BK}$  равны нулю. Разделив все члены уравнения на выражение в скобках, приведем его к виду

$$T_1 \Delta M' + \Delta M = K_1 \Delta S_{PK} \quad (2.22)$$

где

$$T_1 = \frac{a_{HH}}{a_H + a_L + a_{BK} + a_{PK}}; \quad (2.23)$$

$$K_1 = \frac{b_{PK}}{a_H + a_L + a_{BK} + a_{PK}}. \quad (2.24)$$

При отсутствии насоса (схема рис.2.4,а)  $a_H = 0$ .

Как следует из полученного уравнения, переходная функция представляет собой экспоненту с постоянной времени  $T_1$ .

Из уравнения (2.22) можно непосредственно получить передаточную функцию (инерционное звено 1-го порядка)

$$W_{\Delta S_{PK} \rightarrow \Delta h}(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad (2.25)$$

*Примечание.* Обычно в системах автоматического регулирования управляющее воздействие измеряется не величиной площади проходного сечения клапана  $\Delta S_{PK}$ , а его степенью открытия  $\Delta h$  (обычно в процентах), которые в линейном приближении связаны зависимостью  $\Delta S_{PK} = K_S \Delta h$ . В этом случае в (2.25) в числителе добавится множитель  $K_S$ .

### 2.6.2. Динамические характеристики участка при регулировании расхода числом оборотов насоса

При регулировании числа оборотов отсутствует регулирующий клапан, так что в уравнении (2.20)  $a_{PK}$  и  $b_{PK}$  обращаются в нуль. Приняв в качестве управляющего воздействия  $\Delta n$ , получим следующее дифференциальное уравнение:

$$a_{HH} \Delta M' + (a_H + a_L + a_{BK}) \Delta M = v_H \Delta n \quad (2.26)$$

Разделив опять правую и левую части уравнения на выражение в скобках, находим

$$T_2 \Delta M' + \Delta M = K_2 \Delta n, \quad (2.27)$$

где

$$T_2 = \frac{a_{HH}}{a_H + a_L + a_{BK}}; \quad (2.28)$$

$$K_2 = \frac{b_{PK}}{a_H + a_L + a_{BK}}. \quad (2.29)$$

Передаточная функция для этого случая имеет такой же вид, как и полученная ранее

$$W_{z_{\text{изм}}}(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1} \quad (2.30)$$

Таким образом, при регулировании расхода регулируемый участок представляет собой инерционное звено 1-го порядка. Основные параметры  $K_1, K_2$  и  $T_1, T_2$  характеризующие это звено, зависят от нагрузки. В большинстве случаев с уменьшением нагрузки постоянная времени также уменьшается. Только в тех особых случаях, когда при уменьшении нагрузки значительно уменьшаются потери давления, постоянная времени  $T_1$  возрастает.

### 3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧАСТКА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ДАВЛЕНИЯ

При регулировании давления исходят из тех же предпосылок, которые были приняты в предыдущем разделе, т.е. и в данном случае для малых отклонений справедливы зависимости, полученные в разд.2.

$$\begin{aligned} a_{\text{инн}} \Delta M' + (a_{\text{н}} + a_{\text{л}} + a_{\text{рк}} + a_{\text{вк}}) \Delta M = \\ = \Delta P_{\text{е}} - \Delta P_{\text{а}} + \sigma_{\text{н}} \Delta l + \sigma_{\text{вк}} \Delta S_{\text{вк}} + \sigma_{\text{рк}} \Delta S_{\text{рк}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Однако регулируемой величиной теперь служит не  $M$ , а давление  $P_x$ , изменяющееся вдоль трубопровода. Для схемы измерения давления, представленной на рис.2.1, следует

$$P_x = P_{\text{е}} + \Delta P_{\text{н}} - \Delta P_{\text{рк}} - \alpha \Delta P_{\text{л}} - \beta \Delta P_{\text{инн}}, \quad (3.2)$$

где  $\beta$  - отношение полной длины трубопровода к длине до точки измерения давления,  $\alpha$  - доля сопротивления трубопровода до точки измерения давления;

$\alpha \Delta P_{\text{л}}$  - падение давления на участке трубопровода от резервуара 1 до места измерения;

$\beta \Delta P_{\text{инн}}$  - падение давления вследствие ускорения на том же участке.

Учитывая сказанное в разд.2, перепишем выражение (3.2) для малых отклонений

$$\begin{aligned} \bar{P}_e + \Delta P_e = \bar{P}_x + \Delta P_x + \Delta \bar{P}_x - a_n \Delta M + v_n \Delta n - \\ - \alpha \Delta \bar{P}_x - a_n \Delta M - \Delta \bar{P}_{PK} - a_{PK} \Delta M + v_{PK} \Delta S_{PK} - \beta a_{nn} \Delta M \end{aligned} \quad (3.3)$$

Вычтя из (3.3) уравнение статики, получим

$$\beta a_{nn} \Delta M' + (a_n + \alpha a_n + a_{PK}) \Delta M = \Delta P_e - \Delta P_x + v_n \Delta n + v_{PK} \Delta S_{PK} \quad (3.4)$$

Из уравнений (3.1) и (3.4) можно исключить  $\Delta M$  и его производную и найти дифференциальное уравнение, связывающее  $P$  с регулирующим воздействием ( $\Delta S_{PK}$  для дроссельного регулирования и  $\Delta n$  для регулирования числа оборотов), а также с внешними возмущениями. Преобразования проведем для упрощенной схемы рис 3.1.

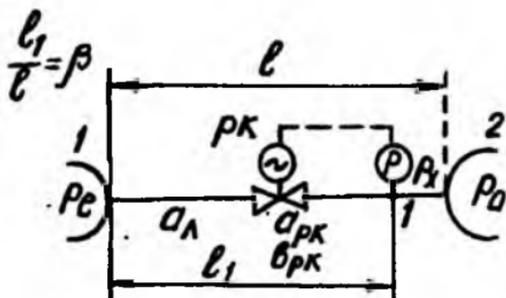


Рис.3.1. Схема простейшего участка регулирования давления.

Рассмотрим случай, когда насоса и возмущающего клапана нет, а  $P_a$  и  $P_e$  остаются неизменными. Тогда из уравнения (3.1) следует

$$a_{nn} \Delta M' + (a_n + a_{PK}) \Delta M = v_{PK} \Delta S_{PK} \quad (3.5)$$

Далее для этого случая получаем из (3.4)

$$\beta a_{nn} \Delta M' + (\alpha a_n + a_{PK}) \Delta M = v_{PK} \Delta S_{PK} - \Delta P_x \quad (3.6)$$

Умножив (3.5) на  $\beta$  и вычтя его из (3.6), получим

$$\{(\alpha - \beta) a_n + (1 - \beta) a_{PK}\} \Delta M = (1 - \beta) v_{PK} \Delta S_{PK} - \Delta P_x \quad (3.7)$$

При дальнейшем дифференцировании необходимо учитывать, что  $\Delta P_x$  и  $\Delta M$  зависят от  $\Delta S_{PK}$ . Находим

$$\left\{ (\alpha - \beta) a_{л} + (1 - \beta) a_{PK} \right\} \Delta M' = (1 - \beta) v_{PK} \Delta S_{PK}' - \Delta P_x'. \quad (3.8)$$

Подставив в (3.6) значения  $\Delta M$  и  $\Delta M'$ , найденные из (3.7) и (3.8), и произведя несложные преобразования, находим

$$\frac{a_{ин}}{a_{л} + a_{PK}} \Delta P_x' + \Delta P_x = (1 - \beta) v_{PK} \frac{a_{ин}}{a_{л} + a_{PK}} \Delta S_{PK}' + (1 - \alpha) v_{PK} \frac{a_{л}}{a_{л} + a_{PK}} \Delta S_{PK}. \quad (3.9)$$

Здесь  $a_{ин} / (a_{л} + a_{PK})$  представляет собой постоянную времени (см. (2.21)). Введя обозначения

$$T_3 = \frac{a_{ин}}{a_{л} + a_{PK}}; \quad K_3 = (1 - \alpha) \frac{a_{л}}{a_{л} + a_{PK}}, \quad (3.10)$$

упростим (3.9)

$$T_3 \Delta P_x' + \Delta P_x = (1 - \beta) v_{PK} T_3 \Delta S_{PK}' + v_{PK} K_3 \Delta S_{PK}. \quad (3.11)$$

Из дифференциального уравнения следует, что динамические свойства участка при регулировании давления имеют другой, более благоприятный с точки зрения регулирования характер, чем при регулировании расхода. Уравнения, кроме самих величин, содержат также и их производные.

На основании (3.10) можно записать передаточную функцию (интегрирующее звено)

$$W_3(S) = v_{PK} \frac{K_3 + (1 - \beta) T_3 S}{T_3 S + 1} = K_4 \frac{T_4 S + 1}{T_3 S + 1}, \quad (3.12)$$

где  $T_4 = \frac{(1 - \beta) T_3}{K_3}; \quad K_4 = v_{PK} K_3.$

### 3.1. Пример расчета динамических характеристик участка расхода

Рассчитать коэффициенты передаточной функции регулируемого участка - "расход мазута в котел".

*Исходные данные для расчета.*

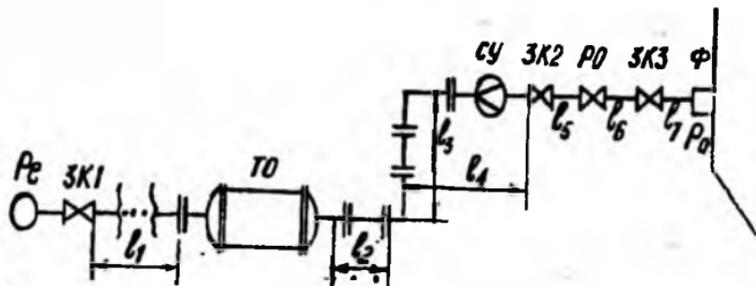


Рис.3.2. Принципиальная схема участка.

От трубопровода мазутонасосной, в которой поддерживается давление  $P_e$ , через запорный клапан ЗК1 мазут поступает в теплообменник ТО, а затем по трубопроводу - к механической форсунке Ф. На трубопроводе к форсунке имеются сужающее устройство СУ, два запорных клапана ЗК2 и ЗК3 (возмущающий клапан), регулирующий орган РО.

Трубопровод имеет 2 поворота на  $90^\circ$ .

*Геометрические характеристики элементов участка.*

Внутренний диаметр трубопровода  $d_{TP}=0,075$  м.

Длина прямых участков:

$$l_1=22 \text{ м} \qquad l_4=5 \text{ м} \qquad l_7=2 \text{ м}$$

$$l_2=3 \text{ м} \qquad l_5=0,5 \text{ м}$$

$$l_3=7 \text{ м} \qquad l_6=0,5 \text{ м}$$

Регулирующий клапан типа МКС

$D_y = 0,05 \text{ м}$ ,  $S_{po}^{\max} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ,  $\xi_{PK} = 15,7$  (отнесено к входному сечению клапана),  $K_{vy} = 25$ .

Запорные клапаны 2 и 3  $d_y = 0,08 \text{ м}$ ,  $\xi_{3K} = 4$ .

*Режимные характеристики.*

Рабочее тело - мазут кременчугский М 100.

$$M = 2,61 \text{ кг/с}, t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

Давление мазута  $P_e=2,4$  МПа;  $P_a=2,0$  МПа.

Теплофизические свойства рабочего тела, гидравлические характеристики участка (3)

$$\rho_{20^\circ\text{C}} = 941 \text{ кг/м}^3$$

$$\nu = 4,7$$

$$\xi_{кл} = 4$$

$$\xi_{расш} = 1$$

$$\xi_{то} = 73$$

$$\xi_{пов} = 1,4$$

$$\xi_{су} = 3$$

$$\xi_{\phi} = 3$$

Определение производных геометрических характеристик

Длина линии  $\sum l_i = 22 + 3 + 7 + 5 + 0,5 + 0,5 + 2 = 40 \text{ м}$ .

Сечение трубопровода

$$S_{\pi} = \frac{3,14 \cdot 0,075^2}{4} = 4,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Сечение регулирующего органа

$$S_{\rho o} = \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Сечение запорного органа

$$S_{\text{зк}} = \frac{3,14 \cdot 0,08^2}{4} = 5,02 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

$$S_{\text{зк}}^2 = 2,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4; \quad S_{\text{зк}}^3 = 1,27 \cdot 10^{-7} \text{ м}^6$$

$$S_{\rho o}^2 = 3,84 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4; \quad S_{\rho o}^3 = 7,53 \cdot 10^{-9} \text{ м}^6$$

$$S_{\pi}^2 = 19,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Определение необходимых теплофизических характеристик

Вязкость мазута

$$\eta = 0,079(\text{ВУ}) \left[ 1 - \frac{1}{(\text{ВУ})^3} \right] = 0,353 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 35,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$\rho_{80} \approx \rho_{20} = 941 \text{ кг/м}^3$$

Определение сопротивления линии

Режим течения жидкости в трубопроводе

$$\text{Re} = \frac{V \cdot l}{\eta} = \frac{M \cdot D}{\rho S_{\pi} \eta} = \frac{2,61 \cdot 0,075}{941 \cdot 4,41 \cdot 10^{-3} \cdot 0,353 \cdot 10^{-4}} = 1341.$$

Поскольку  $\text{Re} < 2000$ ,  $\lambda$  надо определять по формуле ламинарного течения

$$\lambda_{\text{тр}} = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{1341} = 0,048$$

$$\xi_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{d} = 0,048 \frac{40}{0,075} = 25,6$$

$$\xi_{\pi} = 2\xi^3 + \xi_{\text{то}} + 2\xi_{\text{пов}} + \xi_{\text{вр}} + \xi_{\text{су}} + \xi_{\text{тр}} + \xi_{\phi} = 120,4.$$

Определение коэффициентов, характеризующих потери в линии и клапанах

$$K_{pk} = \frac{\xi_{po}}{2\rho} = \frac{15,7}{2 \cdot 941} = 8,6 \cdot 10^{-3} \frac{M^3}{KГ}$$

$$K_{нк} = \frac{\xi_{нк}}{2\rho} = \frac{4}{2 \cdot 941} = 2,2 \cdot 10^{-3} \frac{M^3}{KГ}$$

$$K_n = \frac{\xi}{2\rho S_n^2} = \frac{120,4}{2 \cdot 941 \cdot 19,44 \cdot 10^{-6}} = 3,4 \cdot 10^3 \frac{1}{KГ \cdot M}$$

Определение коэффициентов дифференциального уравнения участка

$$a_{nn} = \frac{l}{S_n} = \frac{40}{4,41 \cdot 10^{-3}} = 9,1 \cdot 10^3 \frac{1}{M}$$

$$a_{pk} = \frac{2K_{po} \bar{M}}{S_{po}^2} = \frac{2 \cdot 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2,61}{3,84 \cdot 10^{-5}} = 11,7 \cdot 10^3; \frac{M^3/KГ \cdot KГ/c}{M^4} = \frac{1}{M \cdot c}$$

$$a_{нк} = \frac{2K_{нк} \bar{M}}{S_{нк}^2} = \frac{2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2,61}{2,55 \cdot 10^{-5}} = 0,45 \cdot 10^3 \frac{1}{M \cdot c}$$

$$a_n = 2K_n \bar{M} = 2 \cdot 3,4 \cdot 10^3 \cdot 2,61 = 18,9 \cdot 10^3 \frac{1}{M \cdot c}$$

$$b_{pk} = \frac{2K_{po} \bar{M}^2}{S_{po}^3} = \frac{2 \cdot 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2,61^2}{7,53 \cdot 10^{-9}} = 15,6 \cdot 10^6; \frac{M^3/KГ \cdot KГ^2/c}{M^6} = \frac{KГ}{M^3 \cdot c^2}$$

Коэффициент передачи

$$K_1 = \frac{b_{pk}}{a_n + a_{pk} + a_{нк}} = \frac{15,6 \cdot 10^6}{8,9 \cdot 10^3 + 0,45 \cdot 10^3 + 11,7 \cdot 10^3} = 0,73 \cdot 10^3 \frac{KГ}{c \cdot M^2}$$

$$T_1 = \frac{a_{nn}}{a_n + a_{pk} + a_{нк}} = \frac{9,1 \cdot 10^3}{21,2 \cdot 10^3} = 0,43c$$

Таким образом, аналитическая математическая модель участка в форме передаточной функции по каналу - "изменение сечения клапана - расход"

$$W_{\Delta S_{po} \rightarrow \Delta M}(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} = \frac{0,73 \cdot 10^3}{0,43s + 1}$$

или в виде дифференциального уравнения

$$T_1 \Delta M + \Delta M = K_1 \Delta S_{pk}$$

$$0,43 \Delta M + \Delta M = 0,73 \cdot 10^3 \Delta S_{pk}$$

#### 4. МОДЕЛИ УЧАСТКА РАСХОДА ТВЕРДЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В технологии получения тепла и электроэнергии широко применяются технические устройства для измерения расхода (дозирования) и перемещения кусковых, зернистых и пылевидных материалов.

Главной особенностью этого участка является отсутствие сплошности потока, поэтому в качестве регулирующего органа приходится использовать дозаторы, а для перемещения вещества применять специальные транспортирующие средства.

В качестве дозаторов применяют питатели (лопастные, тарельчатые, шнековые, скребковые и др.), а перемещение таких материалов осуществляется ленточными, скребковыми, шнековыми транспортерами, пневмо- и гидро- транспортом.

В некоторых случаях дозирующие и транспортирующие функции совмещаются. Таким образом, математическая модель участка в общем случае представляет совокупность моделей дозатора и транспортирующего средства. Такие участки встречаются при регулировании расхода сыпучих или жидких сред с разрывом потока (управление расходом топлива в котел или концентрацией веществ в химводоочистке).

##### 4.1. Модель дозатора (питателя)

Расход вещества через питатель зависит от скорости перемещения вещества и его массы на единице длины пути, называемой наполнением  $\mu$ ,

$$M = \mu \omega, \quad (4.1)$$

т.е. на расход вещества влияют два параметра.

Если регулирование расхода осуществляется изменением скорости перемещения вещества, то

$$M_a = \bar{\mu} \omega_e \quad (4.2)$$

или в приращениях  $\Delta M_a = \bar{\mu} \Delta \omega_e$ ,

тогда

$$W_{\Delta \omega_e \rightarrow \Delta M_a}(s) = \bar{\mu} = K \quad (4.3)$$

Если регулирование расхода осуществляется за счет наполнения, то все изменения наполнения на входе точно повторяются на выходе по истечении времени перемещения дозы в питателе  $\tau$

$$\mu_a = \mu_e(t - \tau)$$

В этом случае

$$M_a = \bar{\omega} \mu_e = \bar{\omega} \mu_e(t - \tau)$$

а

$$\Delta M_a = \bar{\omega} \Delta \mu_c (t - \tau)$$

Передаточная функция дозатора

$$W(S) = \bar{\omega} e^{-\tau S} \quad (4.4)$$

#### 4.2. Модель процесса транспортировки материала

Для этого объекта входной и выходной величинами являются расходы вещества. При транспортировке с постоянной скоростью очевидно, что

$$W_{\Delta M_c \rightarrow \Delta M_a}(S) = e^{-\tau S}$$

Если транспортирование осуществляется с переменной скоростью, то меняется наполнение

$$\mu_c = \frac{\bar{M}_c}{\omega} \quad (4.5)$$

При этом время транспортировки находится решением интегрального уравнения

$$l = \int_0^{\tau} \omega dt, \quad \omega = \omega(t),$$

где  $\tau$  служит неизвестной величиной;

$l$  - длина отрезка пути.

При известном  $\tau$  находится

$$\mu_a(t) = \mu_c(t - \tau),$$

т.е.

$$M_a = \mu_a(t) \omega(t) = \mu_c(t - \tau) \omega(t)$$

Линеаризация выражения (4.5) выполняется следующим образом:

$$\mu_c = \frac{\bar{M}_c}{\bar{\omega} + \Delta\omega} = \frac{\bar{M}_c (\bar{\omega} - \Delta\omega)}{(\bar{\omega} + \Delta\omega)(\bar{\omega} - \Delta\omega)} = \bar{M}_c \frac{\bar{\omega} - \Delta\omega}{\bar{\omega}^2 - \Delta\omega^2} \approx \frac{\bar{M}_c}{\bar{\omega}} \left( 1 - \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \right),$$

если пренебречь составляющей высокого порядка  $\Delta\omega^2$ .

Для небольших  $\Delta\omega$   $\tau = \text{const}$ , тогда

$$\mu_a(t) = \mu_c(t - \tau) = \frac{\bar{M}_c}{\omega} \left( 1 - \frac{1}{\bar{\omega}} \Delta\omega(t - \tau) \right);$$

$$M_a = \frac{\bar{M}_c}{\omega} \left( 1 - \frac{1}{\bar{\omega}} \Delta\omega(t - \tau) \right) (\bar{\omega} + \Delta\omega(t)).$$

Если оставить только линейные составляющие, то

$$\Delta M_n = \frac{\bar{M}_\varepsilon}{\omega} (\Delta\omega(t) - \Delta\omega(t - \tau)),$$

а

$$W_{\Delta\omega \rightarrow \Delta M_n}(S) = \frac{\bar{M}_\varepsilon}{\omega} (1 - e^{-\tau s}) = \bar{\mu} (1 - e^{-\tau s}). \quad (4.6)$$

Кривая разгона такого транспортного устройства показана на рис.4.1.

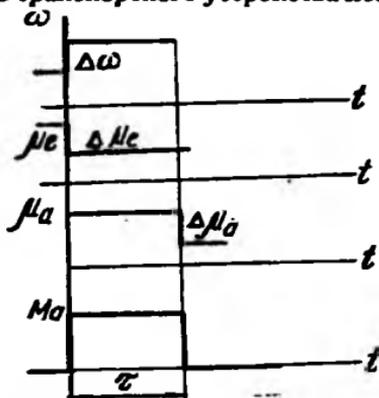


Рис.4.1. Динамические характеристики транспортного устройства с постоянным наполнением на входе и переменной скоростью

## 5. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧАСТКА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ДАВЛЕНИЯ (РАСХОДА) СЖИМАЕМОЙ СРЕДЫ

В энергетических установках часто возникает необходимость регулировать расход или давление в системе, по которой протекает газ или пар. Структурная схема участка в этом случае отличается лишь тем, что вместо насоса устанавливается машина сжатия (компрессор, вентилятор, дымосос) или расширения (турбина).

Варианты схем регулирования расхода (давления) аналогичны случаю несжимаемой жидкости (рис.2.4). Регулирование в случаях рис.2.4,а,б осуществляется дросселированием основного потока, а в случае рис.2.4,г - дросселированием ответвляемого потока. В установках, соответствующих схеме 2.4,в, регулирование происходит путем воздействия на компрессор (изменением скорости его вращения или положения лопаток).

На рис.5.1 показан случай, когда задача регулирования решается с помощью машины, в которой происходит расширение пара (паровая машина или паровая турбина).

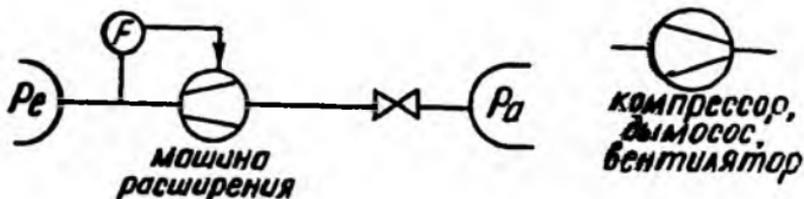


Рис.5.1. Схема регулирования расхода (давления) сжимаемой среды

Для всех вариантов, показанных на рис.2.4, могут существовать различные граничные условия. На входе и выходе регулируемой системы можно принудительно, с помощью внешних средств поддерживать (например, постоянным) давление или расход. Возможные при этом модификации схем различны.

Для представления динамических свойств такого участка ограничимся выводом общего выражения передаточных функций отдельных элементов. На основании этих уравнений нетрудно определить передаточную функцию для любого конкретного случая.

### 5.1. Вывод уравнений элемента регулируемого участка

Особенностью участка является то, что расход среды в каждом сечении может быть различным из-за сжимаемости среды. Изменение давления приводит к изменению плотности среды и ее массы. Эффект аккумуляции среды проявляется не только в больших емкостях, но и в самом трубопроводе. Зависимость между давлением и плотностью описывается уравнениями термодинамического состояния

Будем считать, что изменения давления обусловлены трением в трубопроводах, дросселированием в клапанах, а также сжатием и расширением в машинах.

*Баланс рабочего вещества.*

Уравнение сохранения массы

$$\frac{dm}{dt} = M_e - M_a \quad (5.1)$$

При этом разность между расходами вещества на входе и на выходе аккумулируется в системе. Так как в установившемся режиме  $\overline{M}_e = \overline{M}_a$ , то

$$\frac{d\Delta M}{dt} = \Delta M_e - \Delta M_a \quad (5.2)$$

*Изменение состояния.* В первом приближении можно считать, что при хорошем теплообмене процессы протекают изотермически, при плохом - адиабатически. Практически первый случай встречается при медленном изменении состояния, второй - при быстром. Часто происходящие явления

нельзя отнести ни к первому, ни ко второму случаю, т.е. имеет место политропический процесс.

Для граничного случая изотермического процесса справедливо

$$PV = RT = K \quad (5.3)$$

Отсюда для плотности получаем

$$\rho = \frac{1}{V} = \frac{P}{K}$$

Если через  $V$  обозначить объем среды, находящейся в системе, то количество вещества в системе определяется выражением

$$m = V \cdot \rho = \frac{VP}{K} \quad (5.4)$$

Полученное выражение устанавливает связь между количеством вещества  $m$  и давлением  $P$ . Изменение наполнения, вызванное изменением давления, можно найти, продифференцировав (5.4)

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\partial m}{\partial P} \frac{dP}{dt} = \frac{V}{K} \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{m}{P} \frac{dP}{dt} \quad (5.5)$$

Для малых отклонений давления отношение  $m/P$  можно считать практически постоянным.

Тогда

$$\frac{m}{P} = \frac{\bar{m}}{\bar{P}} \cdot \frac{\bar{M}}{\bar{P}} = T_n \frac{\bar{M}}{\bar{P}} \quad (5.6)$$

$T_n$  выражено в единицах времени и может рассматриваться как постоянная времени изотермического процесса;  $\bar{M}$  - произвольная базовая величина. В качестве такой величины удобно принять расход в установившемся состоянии. Масса вещества в системе с изменением во времени давления связана с уравнением

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_n \frac{dP}{dt} \quad (5.7)$$

Адиабатический процесс описывается уравнением

$$P \varrho^\chi = K \quad (5.8)$$

Как и ранее, найдем выражение для плотности

$$\rho = \frac{1}{V} = \left(\frac{P}{K}\right)^{\frac{1}{\chi}}$$

для массы вещества, находящегося в системе,

$$m = V\rho = V \left(\frac{P}{K}\right)^{\frac{1}{\chi}} \quad (5.9)$$

Продифференцировав (5.9), получим

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V P^{\frac{1-\chi}{\chi}}}{K^{\chi}} \frac{dP}{dt} = \frac{V}{\chi} \left(\frac{P}{K}\right)^{\frac{1}{\chi}} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{m}{\chi P} \frac{dP}{dt} \quad (5.10)$$

В этом выражении при малых отклонениях  $m$  и  $P$  можно подставить их значения в установившемся состоянии. Учитывая, что

$$\frac{m}{\chi P} = \frac{m}{\chi \bar{M}} \cdot \frac{\bar{M}}{P} = T_a \cdot \frac{\bar{M}}{P}, \quad (5.11)$$

находим из (5.10)

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\bar{M}}{P} T_a \frac{dP}{dt} \quad (5.12)$$

Здесь  $T_a$  - постоянная времени адиабатического процесса;

$\bar{M}$  - произвольная базовая величина.

Сравнивая (5.6) и (5.11), устанавливаем, что

$$T_a = \frac{T_n}{\chi} \quad (5.13)$$

Как видно, постоянные времени обоих процессов отличаются на величину коэффициента  $\chi$ . Для рабочих сред, используемых в паросиловых установках,  $\chi$  имеет следующие значения:

- для газа - 1,4;
- для перегретого пара - 1,3;
- для насыщенного или слегка влажного пара - 1,14.

Уже упоминалось, что на практике процесс изменения состояния представляет собой среднее между изотермическим и адиабатическим, поэтому при практических расчетах более целесообразно использовать среднее значение между  $T_n$  и  $T_a$

$$T_r = \frac{T_n + T_a}{2} = \frac{(1+\chi)m}{2\chi \bar{M}} = \alpha \frac{m}{\bar{M}} \quad (5.14)$$

Для указанных выше величин  $\chi$  величина  $\alpha$  принимает такие значения:

- для газа - 0,85;
- для перегретого газа - 0,9;
- для насыщенного или влажного пара - 0,95.

Окончательно получаем

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\bar{M}}{P} T_r \frac{dP}{dt} \quad (5.15)$$

*Баланс механической энергии* (уравнения сохранения количества движения). Поскольку потери на ускорение в переходных режимах не учитываются (из-за малой плотности среды), то можно записать баланс давлений (в приращениях)

$$\Delta P_c - \Delta \Delta P_n + \Delta \Delta P_n = \Delta \Delta P_n + \Delta \Delta P_{PK} + \Delta \Delta P_{BK}. \quad (5.16)$$

Приращение давления на насосе (см. (2.10))

$$\Delta \Delta P_n = -a_n \Delta M + v_n \Delta l. \quad (5.17)$$

Для регулирующего клапана (см. (2.16))

$$\Delta \Delta P_{PK} = a_{PK} \Delta M - v_{PK} \Delta S_{PK}. \quad (5.18)$$

Для сжимаемой среды может быть два вида истечения — докритическое и закритическое.

Для докритических перепадов

$$\Delta P_{PK} = K_{PK} \frac{M^2}{S_{PK}^2}. \quad (5.19)$$

Для сверхкритических перепадов противодавление не оказывает влияние на величину расхода, поэтому

$$\Delta P_{PK} = K_{PK} \frac{M}{S_{PK}}. \quad (5.20)$$

Тогда коэффициенты  $a_{PK}$  и  $v_{PK}$ :

- для докритического истечения

$$a_{PK} = \frac{2K_{PK}\bar{M}}{\bar{S}_{PK}^2}; \quad (5.21)$$

$$v_{PK} = -\frac{2K_{PK}\bar{M}^2}{\bar{S}_{PK}^3}; \quad (5.22)$$

- для закритического истечения

$$a_{PK} = \frac{K_{PK}}{S_{PK}}; \quad (5.23)$$

$$v_{PK} = -\frac{K_{PK}\bar{M}}{\bar{S}_{PK}^2}. \quad (5.24)$$

Аналогичные уравнения можно записать для возмущающего клапана.

Приращение потерь в линии

$$\Delta \Delta P_n = 2K_n \bar{M} \Delta M. \quad (5.25)$$

Однако, как уже упоминалось, расход среды  $M$  в различных сечениях трубопровода может быть различным из-за эффекта аккумуляции среды. Если эффект аккумуляции мал, например, при наличии в трубопроводе диафрагмы, можно в качестве значения  $\bar{M}$  принять установившееся значение. В общем случае это неправомерно.

В действительности участок расхода сжимаемой среды более точно описывается уравнениями с распределенными параметрами.

Для упрощения задачи поступим следующим образом. Разделим весь участок на ряд ячеек, длина которых мала и ограничена (рис.5.3, а)

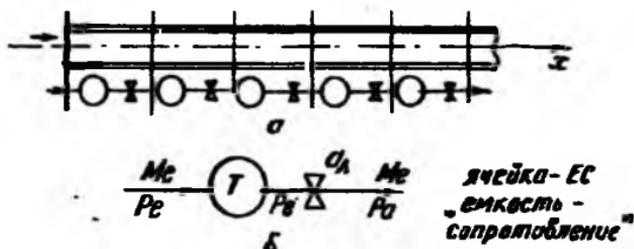


Рис.5.2. Схема замены длинного трубопровода на ячейки типа ЕС

Каждая такая ячейка может быть описана как объект с сосредоточенными параметрами, т.е. каждая ячейка представляется двумя элементами: одним, имеющим перепад давлений, равный перепаду на заменяемом элементе, и не обладающим способностью аккумуляции, и другим, имеющим аккумулирующую способность заменяемого элемента с перепадом давления, равным нулю (рис.5.3,б).

Математическое описание ячейки:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{M}}{P_e} T_r \Delta P_e' &= \Delta M_a - \Delta M_e \\ a_r \Delta M_a &= \Delta P_e - \Delta P_a \end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

Первое уравнение системы (5.26) отражает эффект аккумуляции, второе – потери давления.

Или в таком виде, продифференцировав второе уравнение и подставив его в первое:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{M}}{P_c} T_r \Delta P'_c + \frac{1}{a_n} \Delta P_c &= \Delta M_c + \frac{1}{a_n} \Delta P_a \\ a_n T_r \frac{\bar{M}}{P_c} \Delta M'_a + \Delta M_a &= \Delta M_c - \frac{\bar{M}}{P_c} T_r \Delta P'_a \end{aligned} \right\} (5.27)$$

Лучшее приближение к действительности можно получить, заменив систему несколькими емкостями и дросселями (рис.5.4).

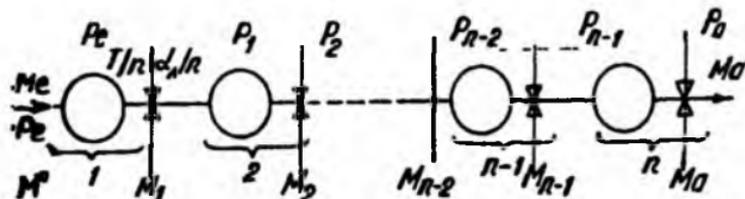


Рис.5.3. Расчетная схема для длинного трубопровода

Если для заменяющей системы, состоящей из  $n$  элементов, постоянную времени каждой емкости принять равной  $T_n = T_r/n$  и коэффициент сопротивления для каждого элементарного дросселя  $a_n = a_n/n$ , то получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \text{1-й член} \quad & \begin{cases} T_n \frac{\bar{M}}{P_c} \Delta P'_c + \frac{1}{a_n} \Delta P_c = \Delta M_c - \frac{1}{a_n} \Delta P_1 \\ a_n T_n \frac{\bar{M}}{P_c} \Delta M'_1 + \Delta M_1 = \Delta M_c - T_n \frac{\bar{M}}{P_c} \Delta P'_1 \end{cases} \\ \text{2-й член} \quad & \begin{cases} T_n \frac{\bar{M}}{P_1} \Delta P'_1 + \frac{1}{a_n} \Delta P_1 = \Delta M_1 - \frac{1}{a_n} \Delta P_2 \\ a_n T_n \frac{\bar{M}}{P_c} \Delta M'_2 + \Delta M_2 = \Delta M_1 - T_n \frac{\bar{M}}{P_c} \Delta P'_2 \end{cases} \\ \dots & \\ \text{(n-1) член} \quad & \begin{cases} T_n \frac{\bar{M}}{P_{n-2}} \Delta P'_{n-2} + \frac{1}{a_n} \Delta P_{n-2} = \Delta M_{n-2} - \frac{1}{a_n} \Delta P_{n-1} \\ a_n T_n \frac{\bar{M}}{P_{n-2}} \Delta M'_{n-1} + \Delta M_{n-1} = \Delta M_{n-2} - T_n \frac{\bar{M}}{P_{n-2}} \Delta P'_{n-1} \end{cases} \\ \text{n-й член} \quad & \begin{cases} T_n \frac{\bar{M}}{P_{n-1}} \Delta P'_{n-1} + \frac{1}{a_n} \Delta P_{n-1} = \Delta M_{n-1} - \frac{1}{a_n} \Delta P_a \\ a_n T_n \frac{\bar{M}}{P_{n-1}} \Delta M'_a + \Delta M_a = \Delta M_{n-1} - T_n \frac{\bar{M}}{P_{n-1}} \Delta P'_a \end{cases} \end{aligned} \right\} (5.28)$$

Для относительно небольших потерь давления в качестве базовых значений  $\bar{P}_e, \bar{P}_1, \bar{P}_2, \dots, \bar{P}_{n-2}, \bar{P}_{n-1}$  можно принять среднее давление  $\bar{P} = 0,5(\bar{P}_e + \bar{P}_n)$ . Тогда все соответствующие коэффициенты в этих выражениях становятся равными друг другу. Путем исключения промежуточных переменных величин  $\Delta M_1, \Delta M_2$  и  $\Delta P_1, \Delta P_2$  система уравнений (5.28) может быть сведена к двум уравнениям, аналогичным (5.27), не содержащим дополнительные члены высоких порядков. К сожалению, эти уравнения быстро усложняются по мере увеличения  $n$ . Это можно видеть, если принять  $n=2$

$$\frac{a_n \left(\frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r\right)^2}{16} \Delta P_e'' + \frac{3 \bar{M}}{4 \bar{P}} T_r \Delta P_e' + \frac{1 \cdot \Delta P_e}{a_n} = \frac{a_n \left(\frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r\right)}{8} \Delta M_e' + \Delta M_e + \frac{1}{a_n} \Delta P_e \quad (5.29)$$

$$\frac{a_n^2 \left(\frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r\right)^2}{16} \Delta M_e'' + \frac{3 a_n}{4 \bar{P}} \bar{M} T_r \Delta M_e' + \Delta M_e = - \left[ \frac{a_n \left(\frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r\right)^2}{8} \Delta P_e'' + \frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r \Delta P_e' \right] \quad (5.30)$$

Сопоставление полученных выражений показывает, что коэффициенты при членах  $\Delta P_e'$  и  $\Delta M_e'$  в (5.27) совпадают с соответствующими коэффициентами систем (5.29), (5.30), т.е. разбивка системы на элементы не оказывает на эти коэффициенты влияния. Это утверждение остается справедливым для любого произвольного разбиения. С другой стороны, можно показать, что значения коэффициентов при  $\Delta P_e'$  и  $\Delta M_e'$  зависят от  $n$ :

$$\sum_{i=1}^n x \cdot \frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^n x \cdot \frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r$$

Для очень мелкого деления получаем

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x}{n^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(n-1)}{2n^2} = \frac{1}{2},$$

т.е. коэффициенты при  $\Delta P_e'$  и  $\Delta M_e'$  стремятся к предельным значениям

$$\frac{1}{2} \frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r \quad \text{и} \quad \frac{a_n}{2} \frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r.$$

Если пренебречь высшими производными, появившимися вследствие весьма мелкого деления, то для очень большого  $n$  получаются следующие приближенные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{a_n} \Delta P_n &= \frac{\bar{M}}{2\bar{P}} T_r \Delta P'_n + \frac{1}{a_n} \Delta P_n - \Delta M_n \\ a_n \frac{\bar{M}}{2\bar{P}} T_r \Delta M'_n + \Delta M_n &= \Delta M_n - \frac{\bar{M}}{\bar{P}} T_r \Delta P'_n \end{aligned} \right\} \quad (5.31)$$

По своей структуре эти уравнения аналогичны системе для одной емкости и одного сопротивления (уравнения (5.27)), однако они дают лучшее приближение к действительным процессам в трубопроводах. Это показано на числовом примере в [1].

Таким образом, для системы, по которой протекает сжимаемая среда, нельзя получить в общем виде аналитическое выражение передаточной функции. В соответствии с разд.5 в каждом конкретном случае следует написать уравнения отдельных элементов и исключить из полученной таким путем системы уравнений промежуточные параметры. Ниже в качестве иллюстрации приведены математические модели двух простых конкретных участков.

## 5.2. Примеры вывода уравнений динамики

### 5.2.1. Модель участка регулирования подачи газа в котел [1]

Принципиальная схема участка показана на рис.5.5,а. Расход газа измеряется в определенном сечении газопровода и сравнивается с его заданным значением. Формируемый в результате этого управления сигнал воздействует на регулирующий клапан РК. Газ поступает из коллектора К, в котором поддерживается постоянное давление  $P_1$ , и через регулирующий клапан, трубопровод, запорный клапан и горелку Г подается во второй аккумулятор (топку), где поддерживается постоянное давление  $P_2$ . Чтобы не усложнять расчетов, примем, что регулирующий орган расположен вблизи коллектора, возмущающий клапан - непосредственно у горелки. Таким образом, отрезок трубопровода, который нужно учитывать при расчетах, заключен между регулирующим и возмущающим органами. Следовательно, в качестве исходной может быть принята система, показанная на рис.5.5,б.

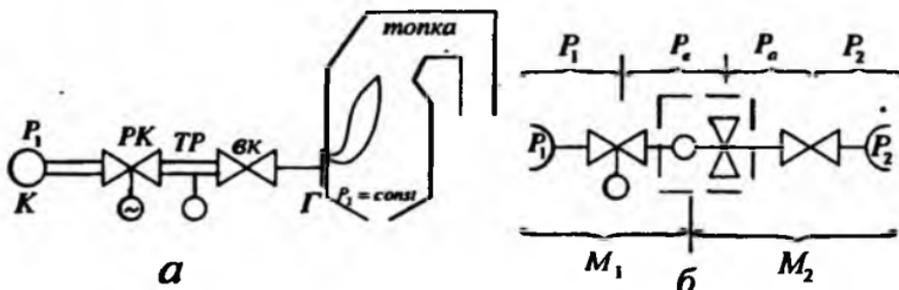


Рис.5.4. Участок регулирования расхода газа в котел

Используя выведенные выше зависимости, можно написать выражения передаточных функций для отдельных элементов системы:

- для регулирующего клапана (при докритических перепадах давлений)

$$\Delta P_1 - \Delta P_c = a_{pk} \Delta M_1 - v_{pk} \Delta S_{pk}, \quad (5.32)$$

причем  $\Delta P_1 = 0$ ;

- для трубопровода

$$\frac{\bar{M}}{2P} T_r \Delta P'_c + \frac{1}{a_n} \Delta P_c = \Delta M_1 - \frac{1}{a_n} \Delta P_a \quad (5.33)$$

и

$$a_n \frac{\bar{M}}{P} T_r \Delta M'_2 + \Delta M_2 = -\frac{\bar{M}}{P} T_r \Delta P'_a + \Delta M_1 \quad (5.34)$$

(см. уравнения (5.31)),

- для возмущающего органа (докритический перепад давлений)

$$\Delta P_2 - \Delta P_a = a_{vk} \Delta M_2 - v_{vk} \Delta S_{vk}, \quad (5.35)$$

где  $\Delta P_2 = 0$ .

В этой системе обыкновенных дифференциальных уравнений  $\Delta S_{pk}$  представляет собой входную величину (регулирующее воздействие);  $\Delta M_2$  - выходную величину (регулируемая величина);  $\Delta S_{vk}$  - внешнее возмущающее воздействие;  $\Delta M_1, \Delta P_c$  и  $\Delta P_a$  - промежуточные параметры, не представляющие интереса в данном случае. При решении системы их следует исключить.

Исключение этих параметров и преобразование системы в одно уравнение - довольно простая, хотя и трудоемкая операция. Математические выкладки, связанные с преобразованием, опущены.

После выполнения необходимых действий

$$a_2 \Delta M''_2 + a_1 \Delta M'_2 + a_0 \Delta M_2 = e_1 \Delta S'_{pk} + e_0 \Delta S_{pk} + z_2 \Delta S''_{vk} + z_1 \Delta S'_{vk} + z_0 \Delta S_{vk},$$

где

$$\begin{aligned} a_2 &= \left[ a_{pk} a_n (a_n + 2a_{vk}) \right] c^2; & c &= \left( \frac{\bar{M}}{2P} T_r \right) \\ a_1 &= 2a_{pk} a_n + 2a_{pk} a_{vk} + 2a_{vk} a_n + a_n^2; \\ a_0 &= a_{pk} + a_{vk} + a_n; \\ e_1 &= a_n v_{pk} c; & e_0 &= v_{pk}; & z_0 &= v_{vk}; \end{aligned} \quad (5.36)$$

$$z_1 = 2(a_{pk} + a_n) v_{nk} c; \quad z_2 = 2v_{nk} a_{pk} a_n c^2,$$

получаем передаточную функцию для регулируемого участка, у которого  $\Delta S_{pk}$  - входная величина,  $\Delta M_2$  - выходная

$$W_{\Delta S_{pk} \rightarrow \Delta M_2}(s) = \frac{e_1 s + e_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (5.37)$$

для внешнего возмущения

$$W_{\Delta S_{pk} \rightarrow \Delta M_2}(s) = \frac{z_2 s^2 + z_1 s + z_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (5.38)$$

### 5.2.2. Модель участка регулирования давления в топке котла [1]

Типичным примером такой системы является система регулирования давления в топочной камере парового котла. Поток газа поступает через горелки в топку, а оттуда через газоходы попадает на всас дымососа, который выбрасывает газы в окружающую среду (рис.5.6,а). Это регулируемый участок, в котором задан расход на притоке, а давление в определенной точке поддерживается путем воздействия на сток.

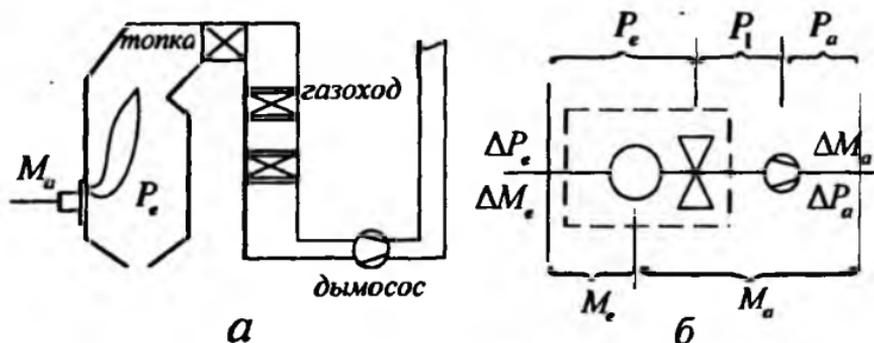


Рис.5.5. Участок регулирования давления

Примем следующие упрощения: положим, что газоход после дымососа очень короткий и что обратная реакция давления в топке на расход газа пренебрежимо мала. Предположим далее, что аккумулирующая емкость топки и газоходов сосредоточена в одном объеме, а дросселирующая способность газоходов и поверхностей нагрева - в одной точке. Регулирование осуществляется путем воздействия на число оборотов дымососов. С учетом перечисленных допущений регулируемый участок может быть заменен упрощенной системой (5.6,б).

Регулируемой величиной является давление в топке или его отклонение  $\Delta P_c$  от заданного значения, входной величиной (регулирующим воздействием) - число оборотов дымососа или изменение числа оборотов  $\Delta n$ . В качестве внешнего возмущения примем расход газа на притоке  $M_e$  (или его изменение  $\Delta M_e$ ).

Уравнения динамики отдельных элементов упрощенной системы находят, используя выражения, полученные ранее. Для аккумулирующего объема согласно (5.26)

$$\frac{\bar{M}}{P} T_r \Delta P_c' = \Delta M_e - \Delta M_n; \quad (5.39)$$

для дросселя (докритический перепад) согласно (5.26)

$$a_n \Delta M_n = \Delta P_c - \Delta P_n; \quad (5.40)$$

на основании (5.17) для дымососа

$$a_n \Delta M_n - v_n \Delta n = \Delta P_1 - \Delta P_n. \quad (5.41)$$

В этом выражении вследствие постоянства давления на выходе (атмосферное давление)  $\Delta P_n$  обращается в нуль.

Если исключить  $\Delta P_1$  и  $\Delta M_n$ , не интересующие нас в данном случае, то получим дифференциальное уравнение регулируемого участка

$$(a_n + a_n) \frac{\bar{M}}{P} T_r \Delta P_c' + \Delta P_c = (a_n + a_n) \Delta M_e - v_n \Delta n. \quad (5.42)$$

Отсюда можно получить передаточные функции для регулирующего воздействия и внешнего возмущения.

Для регулирующего воздействия имеем

$$W_{\Delta n \rightarrow \Delta P_c}(S) = \frac{-v_n}{(a_n + a_n) \frac{\bar{M}}{P} T_r S + 1} = \frac{-K_5}{T_5 S + 1}. \quad (5.43)$$

Для внешнего возмущения

$$W_{\Delta M_e \rightarrow \Delta P_c}(S) = \frac{a_n + a_n}{(a_n + a_n) \frac{\bar{M}}{P} T_r S + 1} = \frac{K_6}{T_6 S + 1}. \quad (5.44)$$

Это передаточная функция инерционного звена первого порядка. Его постоянная времени - коэффициент при  $\Delta P_c'$  в уравнении (5.42).

Если в качестве регулирующего органа используется направляющий аппарат дымососа или дросселирующая заслонка, то (5.41) примет вид

$$a_{\text{рж}} \Delta M_a - b_{\text{рж}} \Delta S_{\text{рж}} = \Delta p_1^{\text{р}} - \Delta p_a^{\text{р}} \quad (5.45)$$

с соответствующим изменением коэффициентов в (5.43) и (5.44).

Таким образом, математическое описание участка расхода или давления сжимаемой среды представляет собой дробнорациональную передаточную функцию различного порядка (5.37), (5.38), (5.43) и др.

В большинстве случаев это простые типовые звенья или их сочетания.

## 6. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УЧАСТКА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ УРОВНЯ СРЕДЫ В ЕМКОСТИ

В предыдущих разделах была подробно рассмотрена методика получения аналитической линейной модели участка расхода и давления. Для последующих расчетов ограничимся более краткими выкладками, останавливаясь подробнее на исходных и конечных выражениях.

Как указывалось выше, в большинстве отраслей промышленности и в энергетике используют резервуары, где надо поддерживать заданный уровень. Типичными средами в большинстве случаев являются однородные и многофазные жидкости. Свойства участков при этом существенно различны.

### 6.1. Модель участка уровня однородной жидкости

При регулировании уровня в резервуарах задача заключается в приведении в соответствие расходов на притоке и на стоке с тем, чтобы уровень оставался неизменным (рис.6.1,а), определяющим будет процесс накопления среды в резервуаре (в соответствии с законом сохранения массы).

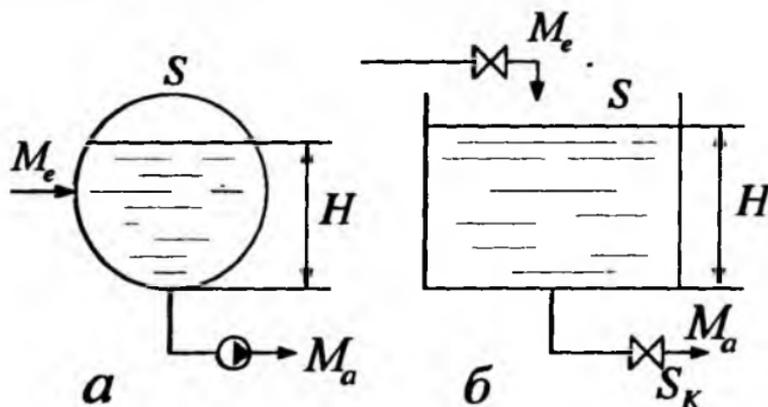


Рис.6.1. Бак с регулируемым уровнем

Расходы на притоке и на стоке ( $M_e, M_a$ ) и изменения количества жидкости в резервуаре связаны такой зависимостью (в приращениях):

$$\frac{dm}{dt} = \Delta M_e - \Delta M_a. \quad (6.1)$$

Перерасчет изменения массы в изменение объема  $\Delta V$  проводится с помощью плотности

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt}. \quad (6.2)$$

Объем вещества, заполняющего резервуар, можно определить по геометрическим размерам последнего; если резервуар не имеет форму призмы, то площадь зеркала  $S$  является функцией высоты. Так что в общем случае

$$V = \int_0^H S dH \quad (6.3)$$

и при постоянном  $S$

$$V = S \cdot H. \quad (6.4)$$

Для малых изменений уровня  $\Delta H$  соответствующее изменение наполнения составляет

$$dm = \rho dV \approx \rho S \Delta H. \quad (6.5)$$

Учитывая (6.1), (6.4) и (6.5), получаем

$$\rho S \Delta H' = \Delta M_e - \Delta M_a, \quad (6.6)$$

откуда

$$\Delta H' = \frac{1}{\rho S} \Delta M_e - \frac{1}{\rho S} \Delta M_a.$$

Передаточные функции

$$W_{\Delta M_e \rightarrow \Delta H}(s) = \frac{K}{S}; W_{\Delta M_a \rightarrow \Delta H}(s) = -\frac{K}{S}, \quad (6.7)$$

где

$$K = \frac{1}{\rho S}.$$

Из (6.7) видно, что это передаточная функция интегрального звена. По аналогии со звеном 1-го порядка можно привести ее к виду, выделив условные постоянную времени  $T$  и коэффициент передачи, так как это звено статическое.

Выбрав базовые величины  $\bar{H}$  и  $\bar{M}$ , преобразуем левую часть (6.6):

$$\rho S \Delta H' = \left( \frac{\rho S H_0}{M_0} \right) \frac{M_0}{H_0} \Delta H' = \frac{M_0}{H_0} T \Delta H'.$$

Дробь в скобках выражается в единицах времени, тогда

$$\frac{M_0}{H_0} T \Delta H' = \Delta M_e - \Delta M_a \quad (6.8)$$

Из последнего уравнения можно получить передаточные функции в виде

$$W_{\Delta M_e \rightarrow \Delta H}(s) = \frac{K_1}{TS}, W_{\Delta M_a \rightarrow \Delta H}(s) = -\frac{K_1}{TS} \quad (6.9)$$

где  $K_1 = H_0 / M_0$  - условный коэффициент передачи в единицах  $м \cdot с \cdot кг^{-1}$ .

Часто бывает целесообразно в качестве  $M_0$  и  $H_0$  использовать значения расхода и уровня, соответствующие установившемуся состоянию  $M_e = M_a = \bar{M}$  и  $\bar{H}$ . Для призматического резервуара  $T$  приобретает тогда значение времени наполнения до номинального уровня

$$T = \frac{\rho S \bar{H}}{\bar{M}} \quad (6.10)$$

Однако эта зависимость не сохраняется, если, например, на стоке имеется регулирующий клапан и величина стока зависит от положения уровня (рис.6.1,б). При этом для свободного слива имеем

$$M_a = \alpha \rho S_k \sqrt{2gH} \quad (6.10,а)$$

где  $\alpha$  - коэффициент расхода клапана.

Так как  $M_a = f(S_k, H)$ , то после линеаризации получаем

$$\Delta M_a = \alpha \rho \sqrt{2g\bar{H}} \Delta S_k + \alpha \rho S_k \sqrt{\frac{g}{2\bar{H}}} \Delta H \quad (6.11)$$

После подстановки значения  $\Delta M_a$  в (6.6) и преобразования к стандартному виду получаем

$$T \Delta H' + \Delta H = K_3 \Delta M_e - K_4 \Delta S_k \quad (6.12)$$

где 
$$T = \frac{S}{\alpha S_k} \sqrt{\frac{2\bar{H}}{g}}, K_3 = \frac{\sqrt{2\bar{H}}}{\alpha \rho S_k \sqrt{g}}, K_4 = -\frac{2\bar{H}}{S_k}$$

Соответствующие передаточные функции таковы:

$$W_{\Delta M_e \rightarrow H}(s) = \frac{K_3}{TS + 1} \quad (6.13)$$

$$W_{\Delta S_k \rightarrow H}(s) = \frac{-K_4}{TS + 1} \quad (6.14)$$

Таким образом, рассматриваемая система является статической, а переходный процесс протекает по аperiodическому закону с постоянной времени  $T$ .

Рассмотрим, как изменяется сток  $M_a$  при изменении притока  $M_e$ .

В этом случае из (6.11) при  $\Delta S_K = 0$  имеем

$$\Delta M_a = \alpha \rho S_K \sqrt{\frac{g}{2H}} \Delta H = \frac{\Delta H}{K_3} \quad (6.15)$$

$$\text{и } \Delta H = K_3 \Delta M_a,$$

$$\text{откуда} \quad \Delta H' = K_3 \Delta M_a'. \quad (6.16)$$

Подставив (6.15) и (6.16) в (6.12) при  $\Delta S_K = 0$ , получаем

$$T \Delta M_a' + M_a = \Delta M_e. \quad (6.17)$$

Соответствующая передаточная функция выглядит так:

$$W_{\Delta M_e \rightarrow \Delta M_a}(s) = \frac{1}{TS + 1}. \quad (6.18)$$

В общем случае, когда перепад на клапане слива определяется не только уровнем  $H$ , но и разностью давления  $\Delta P$ ,

$$M_a = \alpha S_K \sqrt{2\rho(\rho g H + \Delta P)}, \quad (6.19)$$

а (6.12) принимает вид

$$T \Delta H' + \Delta H = K_3 \Delta M_e - K_5 \Delta S_K, \quad (6.20)$$

$$\text{где} \quad K_5 = \frac{2(\rho g L + \Delta P)}{S \rho g}.$$

Остальные коэффициенты сохраняют прежнее значение.

## 6.2. Модель участка регулирования уровня неоднородной жидкости

Измерять и регулировать уровень двухфазной среды приходится в барабанных парогенераторах АЭС и ТЭС, барабан-сепараторах реакторов типа РБМК, в корпусных кипящих реакторах, в испарителях, компенсаторах давления и других устройствах.

Уровень — важнейший параметр, поскольку определяет надежность и безопасность работы всей установки.

В таких устройствах теплоноситель существует в виде двух фаз — водяной и паровой. Подвод или отвод теплоты к такому теплоносителю не изменяет его температуру, а приводит лишь к испарению воды или конденсации пара; при этом существенно изменяется плотность пароводяной смеси. Температура

двухфазной смеси равна температуре насыщения и определяется давлением среды. При изменении давления происходит испарение или конденсация пара.

Барабанные парогенераторы АЭС и ТЭС, несмотря на общность протекающих в них процессов, имеют некоторые отличительные особенности.

В барабанных парогенераторах АЭС с ВВЭР питательная вода второго контура энергоблока кипит непосредственно в барабане за счет трубной системы, через которую прокачивается горячий теплоноситель первого контура.

В ПГ ТЭС кипение воды осуществляется в подъемных (экранных) трубах, пароводяная смесь поступает в барабан, где происходит разделение пара и воды, при этом питательная вода возвращается в экранные трубы по специальным опускным необогреваемым трубам. Эти и другие особенности конструкции приводят к существенному отличию плотности пароводяной смеси в барабанах парогенераторов ТЭС и АЭС. Ниже приведена методика расчета динамики уровня двухфазной смеси для двух указанных типов ПГ.

### 6.2.1. Модель участка регулирования уровня в барабанном ПГ АЭС

Рассмотрим методику расчета динамики уровня пароводяной смеси, которая предполагает знание из статического теплогидравлического расчета среднего по ПГ объемного паросодержания  $\phi$  [8].

Расчетная схема изображена на рис. 6.2.

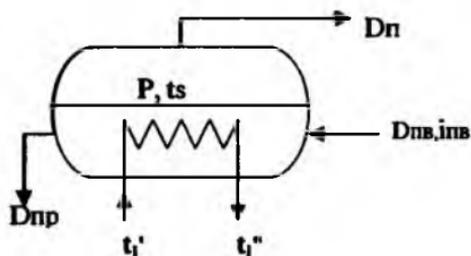


Рис.6.2. Расчетная схема ПГ

В парогенераторе объемом  $V$  находятся в состоянии насыщения вода и пар с массой  $Gв$  и  $Gп$  соответственно. При этом часть пара находится под зеркалом испарения.

Подвод теплоты осуществляется теплоносителем первого контура с начальной температурой  $t_2''$  и конечной  $t_1'$ .

Питательная вода расходом  $Dпв$  поступает в ПГ недогретой до состояния насыщения и имеет энтальпию  $iпв$ .

Для описания динамики ПГ воспользуемся уравнениями сохранения массы, энергии и объема.

Уравнение сохранения массы вещества в ПГ

$$\frac{d(G_B + G_n)}{dt} = D_{пв} - D_{пп} - D_n. \quad (6.21)$$

Уравнение сохранения энергии

$$\frac{d(G_B \cdot i' + G_n \cdot i'')}{dt} = D_{пв} \cdot i_{пв} - D_n \cdot i'' - D_{пп} \cdot i' + Q_{вн}, \quad (6.22)$$

где  $Q_{вн}$  – внешний подвод теплоты от первого контура.

Поскольку суммарный объем воды и пара постоянен, то можно записать

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{G_B}{\rho'} + \frac{G_n}{\rho''} \right) = 0. \quad (6.23)$$

При этом величины  $i'$ ,  $i''$ ,  $\rho'$  и  $\rho''$  являются функциями давления. Дифференцируя левые части уравнений (6.21), (6.22) и (6.23) как сложные функции, получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{dG_B}{dt} + \frac{dG_n}{dt} &= D_m - D_{пп} - D_n \\ i' \frac{dG_B}{dt} + G_B \frac{di'}{dP} \frac{dP}{dt} + i'' \frac{dG_n}{dt} + G_n \frac{di''}{dP} \frac{dP}{dt} &= D_m i_{пв} - D_n i'' - D_{пп} i' + Q_{вн} \\ \frac{1}{\rho'} \frac{dG_B}{dt} + \frac{G_B}{(\rho')^2} \frac{d\rho'}{dP} \frac{dP}{dt} + \frac{1}{\rho''} \frac{dG_n}{dt} + \frac{G_n}{(\rho'')^2} \frac{d\rho''}{dP} \frac{dP}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} (6.24)$$

Разрешая систему (6.24) относительно  $\frac{dG_B}{dt}$ ,  $\frac{dG_n}{dt}$  и  $\frac{dP}{dt}$ , получим

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\frac{1}{\rho'} (D_{пп} - D_n) + \frac{1}{\rho''} D_n + \frac{1}{r} \left( \frac{1}{\rho''} - \frac{1}{\rho'} \right) \cdot [Q_{вн} - D_{пп} (i' - i'')]}{\frac{G_B}{(\rho')^2} \frac{d\rho'}{dP} + \frac{G_n}{(\rho'')^2} \frac{d\rho''}{dP} + \frac{1}{r} \left( \frac{1}{\rho''} - \frac{1}{\rho'} \right) \cdot \left( G_B \frac{di'}{dP} + G_n \frac{di''}{dP} \right)} \quad (6.25)$$

$$\frac{dG_B}{dt} = D_{пп} - D_n - D_z \quad (6.26)$$

$$\frac{dG_n}{dt} = D_z - D_n, \quad (6.27)$$

$$Dz = \frac{1}{r} \left[ Q_{вв} - \left( Gg \frac{di'}{dP} + Gn \frac{di''}{dP} \right) \frac{dP}{dt} - Dnr(i' - inn) \right], \quad (6.28)$$

где  $Dz$  - количество генерируемого пара в ПГ пара;

$r = i'' - i'$  - теплота парообразования.

В установившемся режиме  $Dg=Dn$ , как видно из (6.25) и (6.26), при несоблюдении энергетического и материального баланса давление и масса воды в ПГ изменяются по интегральному закону.

Однако обычно при повышении давления увеличивается расход пара из ПГ, поэтому давление изменяется по экспоненциальному закону, т.е. ПГ описывается апериодическим звеном.

Поскольку масса воды изменяется по интегральному закону, то соответствующим образом изменяется и уровень воды.

Если ПГ заполнен водой в состоянии насыщения, то объем воды под зеркалом испарения

$$Vв = Gg / \rho'. \quad (6.29)$$

При изменении этого объема происходит изменение уровня воды  $\Delta H$ , тогда

$$\Delta Vв = F_3 \Delta H, \quad (6.30)$$

где  $F_3$  - площадь зеркала испарения.

Разделив левую и правую части (6.30) на  $\Delta t$  и переходя к пределу при  $\Delta t > 0$ , получим

$$F_3 \frac{dH}{dt} = \frac{d(\Delta Vв)}{dt} = \frac{1}{\rho'} \frac{dGg}{dt} - \frac{Gg}{(\rho')^2} \frac{d\rho' dP}{dt}. \quad (6.31)$$

Так как плотность воды  $\rho'$  слабо зависит от давления, последним слагаемым в (6.31) можно пренебречь,

$$\text{тогда} \quad F_3 \frac{dH}{dt} = \frac{1}{\rho'} \frac{dGg}{dt}. \quad (6.32)$$

Однако когда вода в ПГ кипит, то уровень воды определяется не только объемом воды, но и объемом пара  $Vn$ , находящегося под зеркалом испарения.

Тогда (6.30) запишется в виде

$$F_3(1 - \varphi)\Delta H = \Delta Vв + \Delta Vn, \quad (6.33)$$

где  $\varphi$  - объемное паросодержание.

Значения  $\varphi$  и  $Vn$  оценивают на основании теплогидравлических расчетов.

Для определения  $Vn$  а переменных режимах можно воспользоваться уравнением

$$T \frac{dVn}{dt} + Vn = \frac{T}{\rho^*} Dz - \frac{T}{\rho^*} Vn \frac{d\rho^*}{dP} \frac{dP}{dt}. \quad (6.34)$$

Постоянную времени  $T$  можно определить по формуле

$$T = \frac{Vn \cdot \rho^*}{D_{\text{но}}}, \quad (6.35)$$

где индекс  $\theta$  относится к номинальному режиму.

Раскроем величину  $Q_{\text{вн}}$  в (6.28).

Для установившегося режима

$$Q_{\text{вв}} = D_{\text{тн}} C_p (t_1' - t_1''), \quad (6.36)$$

где  $D_{\text{тн}}$  – расход через ПГ теплоносителя первого контура;

$t_1', t_1''$  – температура теплоносителя на входе и выходе ПГ соответственно;

$C_p$  – удельная теплоемкость теплоносителя.

Указанные величины определяются из статического расчета.

Температура на входе в ПГ  $t_1'$  равна температуре теплоносителя на выходе из реактора. Можно допустить, что температура  $t_1''$  на выходе из греющих труб близка к температуре насыщения  $t_2$  второго контура ПГ. С достаточной точностью можно считать, что приращение температуры  $\Delta t_1''$  равно приращению температуры  $t_2$ . Тогда из (6.36) при постоянном расходе  $D_{\text{тн}}$  имеем

$$\Delta Q_{\text{вв}} = D_{\text{тн}} C (\Delta t_1' - \Delta t_1'') \approx D_{\text{тн}} C (\Delta t_1' - \Delta t_2). \quad (6.37)$$

Отклонение

$$\Delta t_2 = \frac{dt_s}{dP} \Delta P, \quad (6.38)$$

где  $dt_s/dP$  – производная температуры насыщения по давлению, определяемая по термодинамическим таблицам;

$\Delta P$  – отклонение давления от давления насыщения в номинальном режиме.

Уравнение (6.37) не учитывает тепловую инерцию теплоносителя и стенок труб (методика такого расчета изложена в разд. 9). Для ее приближенной оценки расчет можно вести по эквивалентной температуре  $t_{23}$ , закон изменения которой приближенно учитывает запаздывание теплового потока при изменении температуры теплоносителя и определяется из уравнения

$$\bar{T}_2 \frac{dt_{23}}{dt} + t_{23} = t_1', \quad (6.39)$$

где  $\bar{T}_2$  – эквивалентная постоянная времени греющих труб ( $\bar{T}_2 = (3+4)c$ )

С учетом (6.39) и (6.38) получим

$$\Delta Q_{\text{вн}} = D_{\text{тн}} C_p (\Delta t_{23} - \frac{dt_s}{dP} \Delta P). \quad (6.40)$$

Для полноты описания в (6.25) следует учесть влияние давления  $P$  на подводимое тепло  $Q_{вн}$  (см.(6.40)) и на расход пара Дп.

Расход пара из ПГ

$$D_{п} = D_{п0} \frac{P_T}{P_{T0}} Z, \quad (6.41)$$

где  $P_T, P_{T0}$  — текущее и номинальное давление пара перед турбиной;  
 $Z$  — перемещение сервомотора регулирующих клапанов турбины (в номинальном режиме  $Z=1$ ).

При этом предполагается, что изменения давления пара перед турбиной и в ПГ одинаковы, т.е.  $\Delta P_T = \Delta P$ .

Линеаризуя (6.41), получим

$$\Delta D_{п} = D_{п0} \frac{\Delta P_T}{P_{T0}} + D_{п0} \Delta Z. \quad (6.42)$$

Переходя в числителе уравнения (6.25) к отклонениям и подставляя (6.37) и (6.42), после преобразований получим (при  $i_{мв} = const$ )

$$T_{п} \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P = -K_1 \Delta Z + K_2 \Delta i_{23} - K_3 \Delta D_{пв} - K_4 \Delta D_{пр}, \quad (6.43)$$

где

$$\begin{aligned} T_{п} &= B_0 \frac{\rho' \rho''}{\rho' - \rho''} \cdot \frac{1}{A}; \\ K_1 &= \frac{\rho'}{\rho' - \rho''} \cdot \frac{D_{п0}}{A}; \\ K_2 &= \frac{1}{r} \cdot \frac{D_{пг} C_p}{A}; \\ K_3 &= \left( \frac{i' - i_{пв}}{r} - \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right) \cdot \frac{1}{A}; \\ K_4 &= \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \cdot \frac{1}{A}; \\ A &= \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \cdot \frac{D_{п0}}{P_{T0}} + \frac{1}{r} \cdot D_{тг} C_p \frac{dts}{dP} \end{aligned}$$

$B_0$  — знаменатель в (6.25).

Величины  $D_{пв}$  и  $D_{пр}$  слабо влияют на давление.

Таким образом, динамика ПГ по уровню пароводяной смеси описывается системой уравнений (6.26), (6.28), (6.32), (6.33), (6.34), (6.40).

После линеаризации получаем следующую систему дифференциальных уравнений в отклонения:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\Delta G_{\#}}{dt} &= \Delta D_{nm} - \Delta D_{nr} - \Delta D, \\
 F_2(1-\varphi)\Delta H &= \Delta V_{\#} + \Delta V_n \\
 \frac{d\Delta V_{\#}}{dt} &= \frac{1}{\rho'} \frac{dG_{\#}}{dt} \\
 T \frac{d\Delta V_n}{dt} + \Delta V_n &= \frac{T}{\rho^*} \Delta D_r - \frac{T}{\rho^*} \Delta V_n \frac{d\rho^*}{dP} \frac{dP}{dt} \\
 D_r &= \frac{1}{r} \left[ \Delta Q_{\#n} - \Delta D_{nm}(i' - i_{\text{нво}}) + D_{nm} \Delta i_{nm} - \left( \Delta V_{\#} \rho' \frac{di'}{dP} + V_n \rho^* \frac{di''}{dP} \right) \frac{d\Delta P}{dt} \right] \\
 \Delta Q_{\#n} &= D_{rn} C_r (\Delta t_{23} - \frac{dt_{23}}{dP} \Delta P) \\
 T_2 \frac{d\Delta t_{23}}{dt} + \Delta t_{23} &= \Delta t' \\
 T_n \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P &= -K_1 \Delta Z + K_2 \Delta t_{23} - K_3 \Delta D_{nm} - K_4 \Delta D_{nr}
 \end{aligned} \right\} (6.44)$$

Характер переходных процессов по уровню воды будет рассмотрен далее.

### 6.2.2. Модель участка регулирования уровня воды в барабанном ПГ ТЭС

Рассмотрим барабан котла с присоединённой к нему циркуляционной системой (рис.6.3).

В нормальных эксплуатационных условиях система барабан-испаритель заполнена водой при температуре кипения, в которой содержатся пузырьки пара (последних особенно много в подъемных обогреваемых трубах). Весовое содержание пара по сравнению с жидкостной компонентой смеси пренебрежимо мало, чего, однако, нельзя сказать об объемном паросодержании

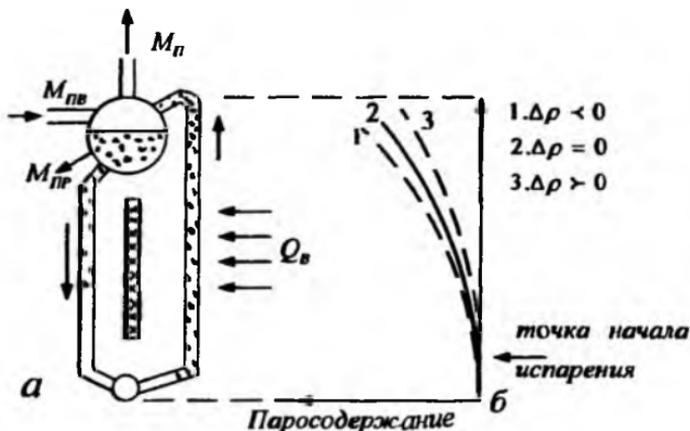


Рис.6.3. Схема циркуляционной системы котла

Паросодержание, в свою очередь, зависит от различных факторов. Во-первых, на него влияет подвод тепла, т.е. нагрузка котла. Помимо этого, оно зависит от изменения давления в барабане, а при переохлажденной воде, поступающей в барабан, - от изменения температуры и расхода воды. При повышении давления в барабане часть тепла, воспринятого в испарительной поверхности нагрева, расходуется на увеличение теплосодержания водяного объема рабочей среды, т.е. на ее дополнительный подогрев. Парообразование в кипящих трубах начинается позже и уменьшается, в соответствии с этим падает и содержание пара в испарительной системе и барабане. Это приводит к падению уровня при неизменном весовом заполнении. Аналогичное явление происходит, если, например, мгновенно увеличится поступление недогретой воды в барабан, причем при определенных условиях это может вызвать дополнительное изменение давления. Таким образом, возникает известный парадокс - увеличение подачи питательной воды приводит к понижению уровня.

При выводе исходных уравнений модели примем следующие допущения:

1. Температура воды в опускных трубах близка к температуре насыщения, хотя парообразование в них отсутствует.
2. При подаче в барабан кипящей питательной воды (экономайзер кипящего типа) расход пара в питательной воде пренебрежимо мал по сравнению с расходом пара, выделяющегося в экранах и барабане.
3. Потоки массы и энергии с продувкой пренебрежимо малы по сравнению с остальными потоками.
4. Температура металлических поверхностей барабана и труб в динамике и статике равна температуре насыщения.

Для дальнейшего вывода приняты такие обозначения.

Объем системы  $V$ , занимаемый водой и паром, включает объемы барабана  $V_B$ , опускных труб  $V_0$  и экранов  $V_Э$ .

$$\text{Тогда } V = V_B + V_0 + V_Э . \quad (6.45)$$

В установившемся состоянии в соответствии с принятым допущением в опускных трубах находится только вода, часть объема барабана выше зеркала испарения заполнена насыщенным паром, а экранные трубы и часть объема барабана ниже зеркала испарения  $V_{WB}$  заполнены кипящей пароводяной смесью, объем которой  $V_K$

$$\bar{V}_K = \bar{V}_{WB} + \bar{V}_Э . \quad (6.46)$$

Каждая из этих величин может быть определена по конструктивным характеристикам парогенератора при заданном начальном значении уровня в барабане  $\bar{H}$ .

В установившемся состоянии объем, занимаемый водой в барабане и трубной системе  $\bar{V}_w$ , складывается из объема опускных труб и части объема пароводяной смеси, занимаемой водой,  $\bar{V}_{wk}$

$$\bar{V}_w = V_0 + \bar{V}_{wk} . \quad (6.47)$$

При этом объем пара в барабане и трубной системе  $V_D$  включает объем пара над зеркалом испарения в барабане  $V_{DB}$  и суммарный объем паровых каналов кипящей пароводяной смеси в барабане и экранах  $V_{DK}$

$$\bar{V}_D = \bar{V}_{OB} + \bar{V}_{DK} . \quad (6.48)$$

Очевидно, что

$$\bar{V}_K = \bar{V}_{wk} + \bar{V}_{DK} ; \quad (6.49)$$

$$V = \bar{V}_w + \bar{V}_D . \quad (6.50)$$

Для последующих динамических расчетов необходимо знать объемы кипящей воды  $V_{wk}$  и паровых каналов  $V_{DK}$  для различных установившихся состояний. Обычно эти величины определяются по результатам гидродинамического расчета контура циркуляции парогенератора.

При отсутствии результатов гидродинамического расчета величины  $V_{wk}$  и  $V_{DK}$  можно определить приближенно, задаваясь значением кратности циркуляции  $K_{ц}$ . При этом по формуле Ледингга предварительно определяют при заданной величине давления  $P$  среднюю плотность пароводяной смеси

$$\rho_m = \bar{\rho}_m \cdot K_p , \quad (6.51)$$

где

$$\bar{\rho}_m = \frac{1}{\frac{1}{\rho'} + \frac{1}{2K_{ц}} \left( \frac{1}{\rho''} + \frac{1}{\rho'} \right)} \quad (6.52)$$

$$K_p = \frac{\ln \left( \frac{2\rho'}{\bar{\rho}_m} - 1 \right)}{2 \left( 1 - \frac{\bar{\rho}_m}{\rho'} \right)} . \quad (6.53)$$

В установившемся состоянии при давлении  $\bar{P}$  объем паровых каналов  $V_{DK}$  определяют, исходя из объема  $\bar{V}_K$ , занимаемого кипящей пароводяной смесью,

$$\bar{V}_{DK} = \bar{V}_K \frac{\rho' - \rho_m}{\rho' - \rho''}, \quad (6.54)$$

а объем кипящей воды

$$\bar{V}_{WK} = \bar{V}_K - \bar{V}_{DK}.$$

Аналогичный расчет для вычисления  $V_{WK}$  и  $V_{DK}$  проводится для других значений давления  $P$ .

Математическую модель исследуемого объекта образуют уравнения материального и энергетического баланса рабочей среды (пара и пароводяной смеси) и статические зависимости связи переменных параметров.

#### *Уравнение энергетического баланса пароводяного объема*

В пренебрежении диссипативными потерями изменение во времени суммарной энтальпии массы пароводяного объема равно небалансу между притоком и стоком энергоресурсов

$$\frac{di_v}{dt} = i_{ПВ} - i_D + Q, \quad (6.55)$$

а в отклонениях от установившегося состояния

$$\frac{di_v}{dt} = \Delta i_{ПВ} - \Delta i_D + Q. \quad (6.56)$$

Здесь  $i_v$  - энтальпия суммарного объема воды, пара и металлических поверхностей труб и барабана;

$i_{ПВ}$  - поток энергии с питательной водой на входе в барабан;

$i_D$  - поток энергии с паром;

$Q$  - суммарный тепловой поток, передаваемый от газов к стенкам экранов (тепловосприятие экранов).

Линеаризуем входящие в это уравнение зависимости.

Массовая энтальпия пароводяного объема и металлических поверхностей труб и барабана:

$$i_v = V_w \rho' i' + V_D \rho'' i'' + m_M c_M \theta_M = V \rho' i' + V_w (\rho'' - \rho' i'') + m_M c_M \theta_M, \quad (6.57)$$

где  $m_M$  - масса труб и барабана;

$c_M$  - удельная теплоемкость металла;

$\theta_M$  - температура металла.

При этом

$$V_D = V - V_w.$$

С достаточной достоверностью можно считать, что температура металла следует без отставания за температурой пароводяной смеси, т.е. температурой насыщения  $\theta_M = \theta'$ .

Так как

$$\rho' = f(P), \rho'' = f(P), i' = f(P), i'' = f(P), \theta' = f(P),$$

$$\text{то} \quad i_v = f(v_w, P).$$

Тогда, линеаризуя (6.57), получаем

$$\Delta i_v = \left\{ V \left[ \frac{d(\rho' i'')}{dP} \right] + v_w \left[ \frac{d(\rho' i' - \rho'' i'')}{dP} \right] + m_{\text{м.с.м.}} \left( \frac{d\theta'}{dP} \right) \right\} \Delta P + (\rho' i' - \rho'' i'') \Delta v_w. \quad (6.58)$$

Массовая энтальпия потока питательной воды

$$I_{\text{ГВ}} = M_{\text{ГВ}} i_{\text{ГВ}} \quad (6.59)$$

Учитывая, что

$$i_{\text{ГВ}} = f(P, \theta_{\text{ГВ}})$$

и

$$\Delta i_{\text{ГВ}} = \left( \frac{\partial i_{\text{ГВ}}}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left( \frac{\partial i_{\text{ГВ}}}{\partial \theta_{\text{ГВ}}} \right)_0 \Delta \theta_{\text{ГВ}}, \quad (6.60)$$

линеаризация (6.59) приводит к виду

$$\Delta I_{\text{ГВ}} = \bar{M}_{\text{ГВ}} \left( \frac{\partial i_{\text{ГВ}}}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \bar{M}_{\text{ГВ}} \left( \frac{\partial i_{\text{ГВ}}}{\partial \theta_{\text{ГВ}}} \right)_0 \Delta \theta_{\text{ГВ}} + \bar{i}_{\text{ГВ}} \Delta M_{\text{ГВ}}. \quad (6.61)$$

Массовая энтальпия отводимого из барабана потока пара

$$I_D = M_D i'' \quad (6.62)$$

Учитывая, что  $i'' = f(P)$ , (6.62) после линеаризации предстает в виде

$$\Delta I_D = \bar{M}_D \left( \frac{\partial i''}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \bar{i}'' \Delta M_D. \quad (6.63)$$

После подстановки (6.58), (6.61) и (6.63) а (6.56), пренебрегая ввиду малости слагаемым, обуславливающим наличие самовыравнивания в объекте, и учитывая, что в установившемся состоянии равновесия  $\bar{M}_{\text{ГВ}} = \bar{M}_D$ , окончательно уравнение энергетического баланса для пароводяного объема можно записать в виде

$$a_1 \frac{d\Delta P}{dt} + a_2 \frac{d\Delta V_w}{dt} = v_1 \Delta M_{\text{ПВ}} + v_2 \Delta \theta_{\text{ПВ}} - v_3 \Delta M_D + Q, \quad (6.64)$$

где

$$a_1 = \left\{ V \left[ \frac{d(\rho'' i'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_w \left[ \frac{d(\rho' i' - \rho'' i'')}{dP} \right]_0 + m_{\text{м.с.м.}} \left( \frac{d\theta'}{dP} \right)_0 \right\} \quad (6.65)$$

$$a_2 = \bar{\rho}' \bar{i}' - \bar{\rho}'' \bar{i}'' \quad (6.66)$$

$$v_1 = \bar{i}_{\text{ПВ}} \quad (6.67)$$

$$v_2 = \bar{M}_{\text{ПВ}} \left( \frac{\partial i_{\text{ПВ}}}{\partial \theta_{\text{ПВ}}} \right)_0 \quad (6.68)$$

$$v_3 = \bar{i}'' \quad (6.69)$$

*Уравнения материального баланса пароводяного объема барабана*

Изменение во времени суммарной массы воды и пара в барабане и трубах парогенератора определяется небалансом между притоком питательной воды и расходом пара из барабана

$$\frac{dm_v}{dt} = M_{\text{ПВ}} - M_D, \quad (6.70)$$

а в отклонениях от установившегося состояния

$$\frac{d\Delta m_v}{dt} = \Delta M_{\text{ПВ}} - \Delta M_D. \quad (6.71)$$

Масса суммарного объема пароводяной смеси  $V_D = V - V_w$

$$m_v = V_w \rho' + V_D \rho'' = V \rho'' + V_w (\rho' - \rho''). \quad (6.72)$$

Так как  $\rho'' = f(P)$  и, значит,  $m_v = f(P, V_w)$ , линеаризация (6.72) дает

$$\Delta m_v = \left\{ V \left[ \frac{d(\rho'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_w \left[ \frac{d(\rho' - \rho'')}{dP} \right]_0 \right\} \Delta P + (\bar{\rho}' - \bar{\rho}'') \Delta V_w. \quad (6.73)$$

Подстановка (6.73) в (6.70) позволяет получить уравнение материального баланса пароводяного объема в виде

$$a_3 \frac{d\Delta P}{dt} + a_4 \frac{d\Delta V_w}{dt} = \Delta M_{\text{ПВ}} - \Delta M_D, \quad (6.74)$$

где

$$a_3 = \left\{ V \left[ \frac{d(\rho'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_w \left[ \frac{d(\rho' - \rho'')}{dP} \right]_0 \right\} \quad (6.75)$$

$$a_4 = \bar{\rho}' - \bar{\rho}'' \quad (6.76)$$

*Уравнение материального баланса парового объема барабана*

Изменение во времени массы насыщенного пара над поверхностью пароводяной смеси в барабане определяется небалансом между "съемом" пара с поверхности пароводяной смеси  $M_{DБ}$  и расходом пара из барабана

$$\frac{dm_{DБ}}{dt} = M_{DН} - M_{D} \quad (6.77)$$

В отклонениях от установившегося состояния равновесия

$$\frac{d\Delta m_{DБ}}{dt} = \Delta M_{DН} - \Delta M_{D} \quad (6.78)$$

Масса пара в барабане

$$m_{DБ} = V_{DБ} \cdot \rho'' \quad (6.79)$$

Так как  $\rho'' = f(P)$ , а  $V_{DБ} = f(H)$ , то значит,  $m_{DБ} = f(P, H)$ .

Линеаризация последнего выражения дает (в пренебрежении изменения площади зеркала испарения при изменении уровня)

$$\Delta m_{DБ} = \bar{V}_{DБ} \left( \frac{d\rho''}{dP} \right)_0 \Delta P - F \bar{\rho}'' \Delta H \quad (6.80)$$

После подстановки (6.80) в (6.77) уравнение материального баланса парового объема барабана имеет вид

$$a_5 \frac{d\Delta P}{dt} - a_6 \frac{d\Delta H}{dt} = \Delta M_{DН} - \Delta M_{D}, \quad (6.81)$$

где

$$a_5 = \bar{V}_{DБ} \left( \frac{d\rho''}{dP} \right)_0 \quad (6.82)$$

$$a_6 = F \bar{\rho}'' \quad (6.83)$$

### *Основные статические зависимости*

Для замыкания системы дифференциальных уравнений математической модели объекта установим основные статические зависимости между регулируемым параметром - уровнем пароводяной смеси и объемами, занимаемыми водой и паром.

В установившемся состоянии равновесия суммарный объем пароводяной смеси складывается из объемов воды и находящегося в ней насыщенного пара

$$\bar{V}_{WD} = \bar{V}_W + \bar{V}_{DK} \quad (6.84)$$

В отклонениях от установившегося состояния

$$\Delta V_{WD} = \Delta V_W + \Delta V_{DK} \quad (6.85)$$

Пренебрегая изменением площади зеркала испарения  $F$  при изменении уровня  $H$ , можно записать

$$F\Delta H = \Delta V_{WD} \quad (6.86)$$

и из (6.85) и (6.86)

$$\Delta H = v_4 \Delta V_W + v_5 \Delta V_{DK}, \quad (6.87)$$

где 
$$e_4 = e_5 = \frac{1}{F} \quad (6.88)$$

В последнем выражении отклонение объема воды  $\Delta V_W$  является промежуточной величиной, и при последующем совместном решении (6.88) с уравнениями материального и энергетического баланса оно может быть исключено.

Отклонение объема паровых каналов  $\Delta V_{DK}$  может быть определено из следующих соображений.

В установившемся состоянии существует определенная зависимость между объемом паровых каналов  $\bar{V}_{DK}$  и давлением  $P$ , расходом пара с поверхности зеркала испарения  $M_{DH}$  и уровнем  $H$

$$V_{DK} = V_{DK}(P, M_{DH}, H).$$

Линеаризуя это выражение в области начального состояния, характеризующегося установившимися значениями  $\bar{P}$ ,  $\bar{M}_{DH}$  и  $\bar{H}$  запишем

$$\Delta V_{DK} = v_6 \Delta P + v_7 \Delta M_{DH} + v_8 \Delta H, \quad (6.89)$$

где

$$e_6 = \left( \frac{\partial V_{DK}}{\partial P} \right)_0 \quad (6.90)$$

$$e_7 = \left( \frac{\partial V_{DK}}{\partial M_{DH}} \right)_0 \quad (6.91)$$

$$e_8 = \left( \frac{\partial V_{DK}}{\partial H} \right)_0 \quad (6.92)$$

Значения частных производных, входящих в (6.89):

а) частная производная  $\left(\frac{\partial V_{DK}}{\partial P}\right)_0$ .

Предварительно по (6.54) определяются значения  $V_{DK}(\bar{P})$  при давлении  $P = \bar{P}$ , соответствующем установившемуся состоянию, и  $V_{DK}(\bar{P} + \Delta P)$  при большом приращении давления  $\Delta P$ .

Значение частной производной

$$\left(\frac{\partial V_{DK}}{\partial P}\right)_0 = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \left[ \frac{V_{DK}(\bar{P} + \Delta P) - V_{DK}(\bar{P})}{\Delta P} \right]; \quad (6.93)$$

б) частная производная  $\left(\frac{\partial V_{DK}}{\partial M_{DH}}\right)_0$ .

Обработка большого числа результатов измерений, выполненных на барабанных парогенераторах [3], позволила установить характер взаимной зависимости безразмерных величин  $V_{DK}/V_{DK}(M_D = 100\%)$  и  $M_D/M_D = 100\%$ , которая приблизительно представляет собой параболу (рис.6.3).

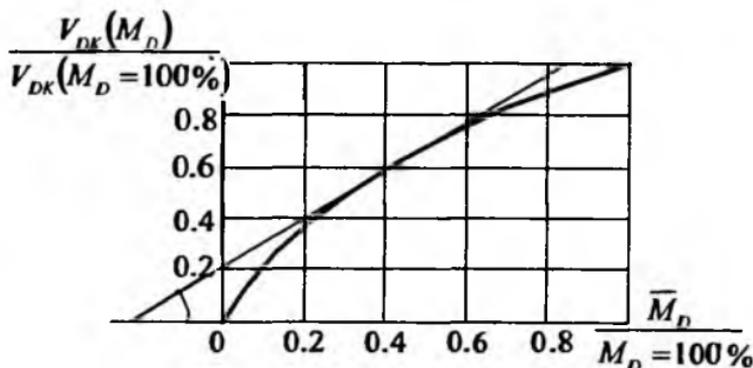


Рис.6.4. Зависимость относительного объема паровых каналов от относительной нагрузки парогенератора

Учитывая, что в состоянии равновесия  $\bar{M}_D = \bar{M}_{DH}$ , эти кривые справедливы и для  $M_{DH}$ .

Частная производная  $\left(\frac{\partial V_{DK}}{\partial M_{DK}}\right)_0$  представляет собой тангенс угла наклона

касательной, проведенной к кривой  $\frac{V_{DK}(M_D)}{V_{DK}(M_D = 100\%)} = f\left(\frac{M_D}{M_D = 100\%}\right)$  в

точке, соответствующей установившемуся состоянию равновесия,

характеризуемому значением  $\frac{M_D}{M_D = 100\%}$ ;

в) частная производная  $\left(\frac{\partial V_{DK}}{\partial H}\right)_0$ .

Величина этой производной характеризует площадь паровых каналов на поверхности зеркала испарения. Для вычисления значения этой производной необходимо при небольшом отклонении  $\Delta H$  определить изменение объема барабана ниже уровня пароводяной смеси  $\Delta V_{WB}$ , затем по (6.92) найти соответствующее изменение  $\Delta V_K$ , а по (6.77) - соответствующее изменение  $\Delta V_{DK}$ .

Значение частной производной

$$\left(\frac{\partial V_{DK}}{\partial H}\right)_0 = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \left[ \frac{V_{DK}(\Delta H)}{\Delta H} \right]. \quad (6.94)$$

*Система дифференциальных уравнений*

Уравнения (6.65), (6.74), (6.81), (6.87) и (6.89) образуют математическую модель барабанного парогенератора как объекта регулирования давления и уровня.

Полученная система уравнений справедлива как для случая подачи в барабан недогретой до температуры насыщения воды, так и для случая частичного испарения ее в экономайзере.

Для случая частичного испарения воды в экономайзере

$$\begin{aligned} \Delta \theta_{пв} &= 0; \\ v_1 &= \bar{i}_{пв} = \bar{i}' \end{aligned}$$

*Передаточные функции аппарата*

Преобразуем систему уравнений, исключив из нее промежуточные величины  $\Delta V_{DK}$ ,  $\Delta V_w$  и  $\Delta M_{MB}$ .

Подстановка в (6.64) значения  $\Delta V_{DK}$  из (6.89)

$$\Delta H = v_4 \Delta V_w + v_5 v_6 \Delta P + v_3 v_7 \Delta M_{DH} + v_5 v_8 \Delta H,$$

а из (6.81) значения  $\Delta M_{DH}$  дает

$$\Delta H = v_4 \Delta V_w + v_5 v_6 \Delta P + v_3 v_7 a_5 \frac{d\Delta P}{dt} - v_3 v_7 a_6 \frac{d\Delta h}{dt} + v_3 v_7 M_D + v_5 v_8 \Delta H.$$

После подстановки из последнего выражения значения  $\Delta V_{IV}$  в (6.65) и (6.74) уравнения динамики уровня и давления пароводяного тракта принимают вид

$$\begin{aligned} a_1 \frac{d\Delta P}{dt} - a_2 b_6 \frac{d\Delta P}{dt} - a_2 b_7 a_5 \frac{d^2 \Delta P}{dt^2} + a_2 \left( \frac{1}{b_4} - b_8 \right) \frac{d\Delta H}{dt} + a_2 b_7 a_6 \frac{d^2 \Delta h}{dt^2} = \\ = b_1 \Delta M_{IV} + b_2 \Delta \theta_{IV} - b_3 \Delta M + a_2 b_7 \frac{d\Delta M_D}{dt} + \Delta Q \\ a_3 \frac{d\Delta P}{dt} - a_4 b_6 \frac{d\Delta P}{dt} - a_4 b_7 a_5 \frac{d^2 \Delta P}{dt^2} + a_4 \left( \frac{1}{b_4} - b_8 \right) \frac{d\Delta H}{dt} + a_4 b_7 a_6 \frac{d^2 \Delta H}{dt^2} = \\ \Delta M_{IV} - \Delta M_D + a_4 b_7 \frac{d\Delta M_D}{dt} \end{aligned}$$

Решение этих уравнений в операторной форме позволяет получить приведенные ниже передаточные функции рассматриваемого участка по следующим каналам:

#### 1. "Расход питательной воды - уровень"

$$W(s) = \frac{1}{\Delta M_{IV} \rightarrow \Delta h} \cdot \frac{B_1 s + B_0}{A_1 s + A_0}, \quad (6.95)$$

где

$$\begin{aligned} B_1 &= a_5 b_7 (a_4 b_1 - a_2), \\ B_0 &= a_1 - a_3 b_1 + a_4 b_1 b_6 - a_2 b_6 \\ A_1 &= a_6 b_7 (a_1 a_4 - a_2 a_3), \\ A_0 &= \left( \frac{1}{b_4} - b_8 \right) (a_1 a_4 - a_2 a_3). \end{aligned} \quad (6.96)$$

#### 2. "Расход отбираемого из барабана пара - уровень"

$$W(s) = \frac{1}{\Delta M_D \rightarrow \Delta h} \cdot \frac{B_3 s + B_2}{A_1 s + A_0},$$

где

$$\begin{aligned} B_3 &= b_7 (a_1 a_4 - a_2 a_3 - a_4 a_5 b_3 + a_2 a_5), \\ B_2 &= a_3 b_3 - a_4 b_3 b_6 - a_1 + a_2 b_6. \end{aligned}$$

#### 3. "Температура питательной воды - уровень"

$$W(s) = \frac{1}{\Delta \theta_{IV} \rightarrow \Delta h} \cdot \frac{B_7 s + B_4}{A_1 s + A_0}, \quad (6.97)$$

где

$$\begin{aligned} B_7 &= a_4 a_3 b_2 b_7 \\ B_4 &= b_2 (a_4 b_6 - a_3). \end{aligned}$$

#### 4. "Тепловосприятие экранов - уровень"

$$W(S) = \frac{1}{\Delta Q \rightarrow \Delta h} \cdot \frac{B_7 S + B_6}{S \cdot A_1 S + A_0}, \quad (6.98)$$

где

$$B_7 = a_4 a_5 B_7$$

$$B_6 = a_4 B_6 - a_3.$$

Отсюда видно, что передаточные функции по всем четырем каналам имеют одинаковый вид и представляют собой произведение интегрального и интегриродифференцирующего звеньев.

Для моделирования удобно такого вида передаточную функцию, например (6.95), представить в виде суммы передаточных функций инерционного и интегрального звеньев:

$$W(S) = \frac{K_1}{TS + 1} + \frac{K_2}{S},$$

где

$$K_1 = \frac{B_1 - B_0 \frac{A_1}{A_0}}{A_0}.$$

$$K_2 = \frac{B_0}{A_0}.$$

$$T = \frac{A_1}{A_0}.$$

Характер переходных функций по рассмотренным каналам изображен на рис.6.5.

Следует заметить, что для парогенераторов АЭС указанные модели также можно использовать, но зависимость относительного объема паровых каналов от относительной нагрузки парогенератора будет другой в силу отличий парогенератора АЭС от барабанного котла.

Как видно из приведенных кривых, наличие пара под зеркалом испарения приводит к тому, что увеличение подвода теплоты к ПГ оказывает двойное влияние на уровень воды. С одной стороны, происходит уменьшение уровня из-за испарения воды и соответствующего уменьшения объема воды в ПГ; с другой - происходит увеличение объема пара под зеркалом испарения из-за увеличения его генерации. Суммарное действие этих эффектов приводит к кратковременному увеличению уровня, так называемому «набуханию» уровня, затем уровень уменьшается по интегральному закону. Аналогичный характер изменения уровня наблюдается при увеличении расхода пара, когда давление в барабане уменьшается, генерация пара возрастает и уровень воды временно увеличивается с последующим уменьшением по интегральному закону.

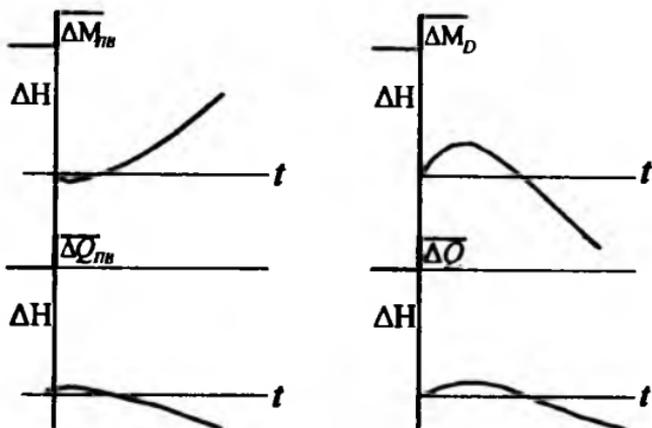


Рис.6.5. Изменение уровня в барабане котла под действием возмущений

При изменении подачи в барабан недогретой до состояния насыщения питательной воды происходит уменьшение генерации пара, кратковременное снижение уровня с последующим его увеличением из-за увеличения объема воды в барабане.

При изменении расхода в ПГ насыщенной питательной воды набухания не происходит, так как при этом не изменяется генерация пара.

## 7. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЧАСТКА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕЩЕСТВА

При регулировании концентрации вещества в фиксированном объеме типы участков различаются по следующим признакам:

1. Вид основного вещества - *носителя* (например газ или жидкость) и *вещество*, концентрацию которого в носителе необходимо измерять (регулировать). Так, при сжигании топлива приходится регулировать концентрацию кислорода в отходящих газах, а в процессах водоподготовки - концентрацию веществ в воде и паре.

2. По регулируемому воздействию на концентрацию вещества в емкости: смешение с основным потоком (рис.7.1, а), разделение от основного потока (рис.7.1, б).

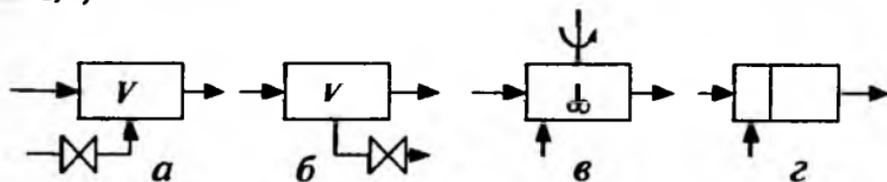


Рис.7.1. Типы участков регулирования концентрации

При этом добавляемый поток в системах со смешением может быть или концентрированным, или наоборот разбавленным по отношению к основному потоку.

При регулировании путем разделения обычно происходит деление суммарного потока на две составляющие, из которых одна часто представляет собой практически чистый носитель, а другая - регулируемое вещество с относительно большой концентрацией.

3. По типу физических процессов, протекающих в емкости: "полное перемешивание" (рис.7.1,в), "чистый перенос" (рис.7.1,г), сочетание двух первых типов.

При создании аналитических линейных математических моделей участка концентрации обычно принимают допущение о том, что химические реакции, идущие, как правило, одновременно с процессами смешения, разделения и транспортировки, протекают значительно быстрее.

Поэтому вместо кинетических реакций с достаточной для практики точностью можно использовать уравнение равновесия и не учитывать инерции, обусловленной химическими процессами.

### 7.1. Общая модель участка

Параметрическая схема участка показана на рис.7.2.

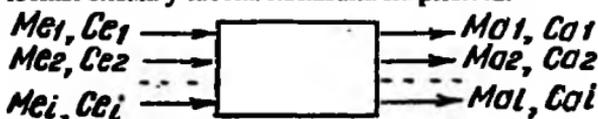


Рис.7.2. Входные и выходные потоки вещества на участке концентрации

Если принять допущение, что количество основного носителя на участке постоянно, то уравнение сохранения количества вещества запишется в такой форме:

$$m \frac{dC_m}{dt} = M_{e1}C_{e1} + M_{e2}C_{e2} + \dots - M_{a1}C_{a1} - M_{a2}C_{a2} - \dots, \quad (7.1)$$

где  $M_{ei}, M_{ai}$  - расход  $i$ -го носителя на входе и выходе соответственно;

$C_{ei}, C_{ai}$  - концентрация вещества в  $i$ -м носителе на входе и выходе соответственно;

$m$  - масса носителя на участке;

$C_m$  - средняя концентрация вещества на участке.

При этом, естественно, соблюдается условие непрерывности потока:

$$M_{e1} + M_{e2} + \dots - M_{a1} - M_{a2} - \dots = 0, \quad (7.2)$$

В установившемся состоянии, когда  $dC_m/dt = 0$ , справедливо соотношение

$$\overline{M}_{e1}\overline{C}_{e1} + \overline{M}_{e2}\overline{C}_{e2} + \dots - \overline{M}_{a1}C_{a1} - \overline{M}_{a2}C_{a2} - \dots = 0. \quad (7.3)$$

Из последнего соотношения можно найти среднюю концентрацию на притоке и стоке.

$$C_e = \frac{\overline{M}_{e1}\overline{C}_{e1} + \overline{M}_{e2}\overline{C}_{e2} + \dots}{M}; \quad C_a = \frac{\overline{M}_{a1}\overline{C}_{a1} + \overline{M}_{a2}\overline{C}_{a2} + \dots}{M}, \quad (7.4)$$

где  $M$  - суммарный поток на входе и выходе, при этом

$$\overline{M}C_e - \overline{M}C_a = 0; \quad \overline{C}_e = \overline{C}_a = \overline{C}_m. \quad (7.5)$$

Количество регулируемого вещества в емкости для установившегося состояния

$$m_p = mC_m. \quad (7.6)$$

В переходном режиме из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta m_p = m(\overline{C}_{m1} - \overline{C}_{m2}) = \int_1^2 MC_e dt - \int_1^2 MC_a dt = \int_1^2 M(C_e - C_a) dt. \quad (7.7)$$

Таким образом, общее математическое описание участка концентрации с учетом принятых допущений составляют уравнения (7.1)-(7.4).

В самом простом случае двух потоков участок смешения описывается уравнениями (рис. 7.3,а):

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dC_m}{dt} &= M_{e1}C_{e1} + M_{e2}C_{e2} - M_a C_a \\ M_{e1} + M_{e2} - M_a &= 0 \\ M_{e1}C_{e1} + M_{e2}C_{e2} - M_a C_a &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (7.8)$$

где  $M_{e1}$  - поток основного носителя;

$M_{e2}$  - поток регулирующий.

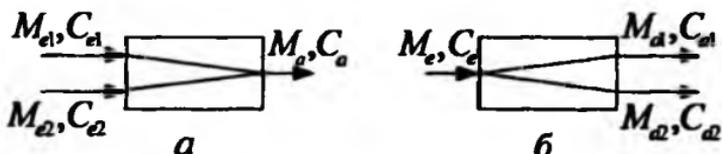


Рис. 7.3. Параметрические схемы двухкомпонентных систем

Участок разделения соответственно (рис. 7.3,б):

$$m \frac{dC_m}{dt} = M_e C_e - M_{e1} C_{e1} - M_{e2} C_{e2} \left. \begin{array}{l} M_e - M_{e1} - M_{e2} = 0 \\ \bar{M}_e \bar{C}_e - \bar{M}_{e1} \bar{C}_{e1} - \bar{M}_{e2} \bar{C}_{e2} = 0 \end{array} \right\} \quad (7.9)$$

где  $M_{e2}$  - поток регулирующий.

Как было показано выше, в зависимости от процесса изменения концентрации в объеме  $St$  различают полное перемешивание и чистый перенос. Очевидно, что "чистый перенос" имеет место лишь для участка, где регулирование идет за счет смешения потоков.

## 7.2. Аналитическая математическая модель участка типа «чистый перенос»

Концентрация на выходе участка через время (время транспортировки) перемещения массы точно копирует изменение концентрации на входе, т.е.

$$C_a = C_e(t - \tau), \quad (7.10)$$

где 
$$\tau = \frac{m}{M_{e1} + M_{e2}} = \frac{m}{M_a}.$$

Для случая двух потоков

$$C_e = \frac{M_{e1} C_{e1} + M_{e2} C_{e2}}{M_{e1} + M_{e2}} = C_e(t) \quad (7.11)$$

Уравнение (7.11) в линейном приближении записывается так:

$$\Delta C_e = a_1 \Delta M_{e1} + a_2 \Delta M_{e2} + v_1 \Delta C_{e1} + v_2 \Delta C_{e2}, \quad (7.12)$$

где

$$a_1 = \frac{\bar{M}_{e2} (\bar{C}_{e1} - \bar{C}_{e2})}{(\bar{M}_{e1} + \bar{M}_{e2})^2}; \quad v_1 = \frac{\bar{M}_{e1}}{\bar{M}_{e1} + \bar{M}_{e2}}$$

$$a_2 = \frac{\bar{M}_{e1} (\bar{C}_{e2} - \bar{C}_{e1})}{(\bar{M}_{e1} + \bar{M}_{e2})^2}; \quad v_2 = \frac{\bar{M}_{e2}}{\bar{M}_{e1} + \bar{M}_{e2}}.$$

Обычно один из входных потоков, например  $M_{e2}$ , является носителем с незначительной концентрацией регулируемого вещества  $C_{e2}$  и, наоборот, поток  $M_{e1} \ll M_{e2}$ , но имеет высокую концентрацию вещества, т.е.

$C_{e1} \gg C_{e2}$ . В этом случае коэффициенты  $a_1$ ,  $v_1$  в (7.12) существенно упрощаются, например:

$$a_1 \cong \frac{C_{e1}}{M_{e1} + M_{e2}}.$$

В рассматриваемом примере коэффициент  $a_2$  отрицательный, поскольку с увеличением потока  $M_2$  концентрация вещества на выходе  $C_a$  уменьшается.

Линейное приближение уравнения (7.10)

$$\Delta C_a = \Delta C_e (t - \tau), \quad (7.13)$$

тогда

$$W_{\Delta C_e \rightarrow \Delta C_a}(s) = e^{-s\tau}.$$

Из (7.12) видно, что можно записать четыре различных передаточных функции по каналам  $\Delta M_{e1}, \Delta C_{e1}, \Delta M_{e2}$  и  $\Delta C_{e2}$ .

Так, по каналу  $\Delta M_{e2}$  при  $C_{e2} = const$

$$W_{\Delta M_{e2} \rightarrow \Delta C_a}(s) = a_2 e^{-s\tau}. \quad (7.14)$$

Это, как известно, передаточная функция звена транспортного запаздывания.

### 7.3. Аналитическая математическая модель участка типа «полное перемешивание»

В этом случае (рис.7.3,а) происходит полное перемешивание потока как в продольном, так и в поперечном направлениях. Следовательно, концентрация в каждый момент времени в любой точке системы равна средней концентрации  $C_m$ . При регулировании *смешиванием* это справедливо и для стока:  $C_a = C_m$ .

В этом случае

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dC_a}{dt} + M_a C_a &= M_{e1} C_{e1} + M_{e2} C_{e2} \\ M_a &= M_{e1} + M_{e2} \\ C_e &= \frac{M_{e1} C_{e1} + M_{e2} C_{e2}}{M_{e1} + M_{e2}} \end{aligned} \right\} \quad (7.15)$$

Подставим второе уравнение системы (7.15) в первое,

тогда

$$TC'_a + C_a = \frac{M_{e1}}{M_{e1} + M_{e2}} C_{e1} + \frac{M_{e2}}{M_{e1} + M_{e2}} C_{e2}, \quad (7.16)$$

где

$$T = \frac{m}{M_a} = \frac{m}{M_{e1} + M_{e2}}.$$

В линейном приближении с учетом третьего уравнения (7.15):

$$T \Delta C'_a + \Delta C_a = \Delta C_e, \quad (7.17)$$

где по аналогии с (7.12)

$$\Delta C_e = a_1 \Delta M_{e1} + a_2 \Delta M_{e2} + b_1 \Delta C_{e1} + b_2 \Delta C_{e2}. \quad (7.18)$$

Передаточная функция для (7.17)

$$W_{\Delta C_e \rightarrow \Delta C_a}(s) = \frac{1}{TS + 1}, \quad (7.19)$$

т.е. такой участок имеет динамические свойства инерционного звена первого порядка.

Коэффициент передачи по четырем возможным каналам численно равен коэффициентам в уравнении (7.18).

При регулировании *разделением потоков*:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dC_m}{dt} &= M_e C_e - M_{a1} C_{a1} - M_{a2} C_{a2} \\ M_e - M_{a1} - M_{a2} &= 0 \\ M_e C_e - M_{a1} C_{a1} - M_{a2} C_{a2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.20)$$

Считая, что  $C_m = C_{a1}$ , получим дифференциальное уравнение в приращениях

$$\begin{aligned} m \frac{dC_{a1}}{dt} &= \bar{C}_e \Delta M_e + \bar{M}_e \Delta C_e - \bar{C}_{a1} \Delta M_{a1} - \\ &\quad - \bar{M}_{a1} \Delta C_{a1} - \bar{C}_{a2} \Delta M_{a2} - \bar{M}_{a2} \Delta C_{a2}. \end{aligned} \quad (7.21)$$

Это уравнение можно преобразовать к виду (7.17)

$$T \Delta C_{a1} + \Delta C_{a1} = \Delta^* C_e \quad (7.22)$$

$$T = \frac{m}{M_{a1}}.$$

Здесь  $\Delta^* C_e = a_1 \Delta M_e - a_2 \Delta M_{a2} - a_3 \Delta M_{a1} - v_1 \Delta C_e - v_2 \Delta C_{a2}$

фиктивная концентрация на входе, а коэффициенты

$$a_1 = \frac{\bar{C}_e}{M_{a1}}; \quad a_2 = \frac{\bar{C}_{a2}}{M_{a1}}; \quad a_3 = \frac{\bar{C}_{a1}}{M_{a1}}; \quad v_1 = \frac{\bar{M}_e}{M_{a1}}; \quad v_2 = \frac{\bar{M}_{a2}}{M_{a1}}.$$

В этом случае имеем

$$W_{\Delta C_e \rightarrow \Delta C_{a1}}(s) = \frac{1}{TS + 1}. \quad (7.23)$$

#### 7.4. Примеры моделей участков концентрации

*Пример 1.* Регулирование содержания кислорода в уходящих газах парового котла.

Схема участка приведена на рис. 7.4.

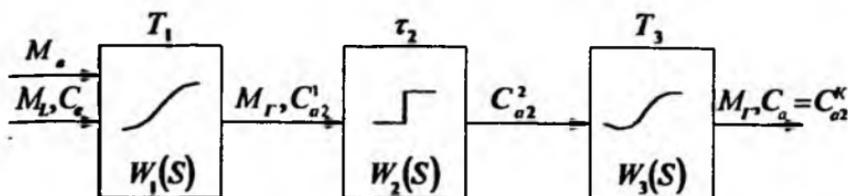


Рис.7.4. Эквивалентная схема участка регулирования

Эквивалентную параметрическую схему такого участка можно представить в виде трех типовых звеньев: топка (зона горения) - полное перемешивание; транспортный участок радиационного теплообмена в топке - чистый перенос; газодод пароперегревателя, экономайзера, воздухоподогревателя, дымосос - полное перемешивание.

Тогда

$$W_{\Delta C_a \rightarrow \Delta C_a}(s) = \frac{e^{-\tau_2 s}}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)} \quad (7.24)$$

В качестве входной концентрации регулирующего потока  $M_L$  (расход горячего воздуха) принимается содержание в нем кислорода (21%). Вторым потоком, поступающим в участок, является расход топлива  $M_B$ . Таким образом, нужно знать связь между изменением входной концентрации  $\Delta C_a$  и входными потоками, а также коэффициентом избытка воздуха.

Из теории топочных процессов известны соотношения

$$\left. \begin{aligned} M_L &= \alpha \cdot L_0 M_B \\ \frac{CO_2}{21} + \frac{C_{CO_2}}{K} &= 1 \\ \alpha &= \frac{K}{C_{CO_2}} \end{aligned} \right\} \quad (7.25)$$

где  $L_0$  - теоретически необходимый расход воздуха для сжигания единицы топлива;

$K$  - максимальная теоретически достижимая концентрация  $C_{CO_2}$  для заданного топлива.

Обе эти величины имеются в справочной литературе. Из (7.25) получаются очевидные соотношения

$$C_{O_2} = 21 - \frac{21}{\alpha};$$

$$\frac{M_L}{L_0 M_B} = \alpha.$$

После линеаризации получаем

$$\Delta C_{O_2} \frac{21}{M_L \bar{\alpha}} \Delta M_L - \frac{21}{M_B \bar{\alpha}} \Delta M_B.$$

Таким образом, передаточные функции по входным воздействиям

$M_B$  и  $M_L$  следующие:

$$W_{M_L-C_{O_2}}(S) = \frac{21}{M_L \bar{\alpha}} \cdot \frac{e^{-\tau_2 s}}{(T_1 S + 1)(T_3 S + 1)} \quad (7.26)$$

$$W_{M_B-C_{O_2}}(S) = -\frac{21}{M_B \bar{\alpha}} \cdot \frac{e^{-\tau_2 s}}{(T_1 S + 1)(T_3 S + 1)} \quad (7.27)$$

Постоянные времени  $T_1$ ,  $\tau_2$ ,  $T_3$  в (7.24) можно вычислить, имея тепловой расчет котла.

По физической сущности сумма постоянных времени  $T = T_2 + \tau_2 + T_3$  равна среднему времени прохода дымовых газов через систему от топки до места замера концентрации  $O_2$ .

Хорошее приближение можно получить, если принять

$$T_1 = \tau_2 = T_3 = \frac{T}{3}.$$

**Пример 2.** Регулирование рН питательной воды в системе регенерации турбоустановки.

Как правило, на ТЭС поддерживают слегка щелочную реакцию питательной воды, что достигается добавкой какой-либо щелочи, например аммиака или гидразина. Поступление гидразина в поток питательной воды осуществляется после конденсатора (рис.7.5).

Гидразин перемешивается с конденсатом и через регенеративные подогреватели поступает в бак деаэратора. Можно допустить, что от места дозирования до бака деаэратора происходит лишь слабое перемешивание по сравнению со скоростью потока в трубопроводе.

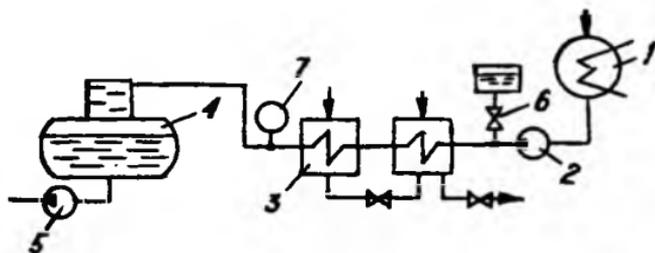


Рис. 7.5. Схема участка регулирования рН питательной воды:

- 1 - конденсатор; 2 - конденсатный насос;  
 3 - регенеративный подогреватель; 4 - деаэрактор;  
 5 - питательный насос; 6 - регулирующий клапан для добавки гидразина;  
 7 - датчик

Тогда модель участка будет представлять собой произведение передаточных функций "чистый перенос" и "полное перемешивание" с управлением типа "смещение" (7.21)

$$W_{\Delta C_e \rightarrow \Delta C_a}(s) = \frac{e^{-st}}{TS + 1}$$

где  $T$  - постоянная времени бака деаэрактора, с (см. 7.16);  
 $t$  - время прохождения потока от места дозирования до бака, с.

Связь между рН химически очищенной воды и содержанием гидразина можно аппроксимировать функцией

$$pH = 8,8 + 0,0753 \cdot C - 4,39 \cdot 10^{-3} \cdot C^2 - 1,53 \cdot 10^{-4} \cdot C^3$$

Обозначим  $C_e$  - концентрацию гидразина в конденсате после смешения;  $C_{e1}$  - содержание гидразина в добавляемом растворе, а  $C_{e2}$  - содержание гидразина в питательной воде. Так как расход концентрированного гидразина  $M_{e1}$  гораздо меньше расхода питательной воды  $M_{e2}$ , т.е.

$$M_{e1} \ll M_{e2},$$

$$M_{e1} C_{e1} = (M_{e1} + M_{e2}) C_e \approx M_{e2} C_e$$

$$C_e = C_{e1} \frac{M_{e1}}{M_{e2}}$$

$$\Delta C_e = \frac{C_{e1}}{M_{e2}} \Delta M_{e1} - \frac{C_{e1} \bar{M}_{e1}}{M_{e2}^2} \Delta M_{e2}$$

Тогда  $\Delta M_{e1}$  будет регулирующим каналом, а  $\Delta M_{e2}$  - возмущающим.

Соответствующие передаточные функции :

$$W_{M_{e1}-C_{e1}}(s) = \frac{\bar{C}_{e1}}{\bar{M}_{e2}} \cdot \frac{e^{-\tau s}}{TS+1}$$

$$W_{M_{e2}-C_{e2}}(s) = -\frac{\bar{C}_{e1}\bar{M}_{e1}}{\bar{M}_{e2}^2} \cdot \frac{e^{-\tau s}}{TS+1}$$

Пример 3. Регулирование солевого содержания котловой воды. Схема участка показана на рис.7.6.

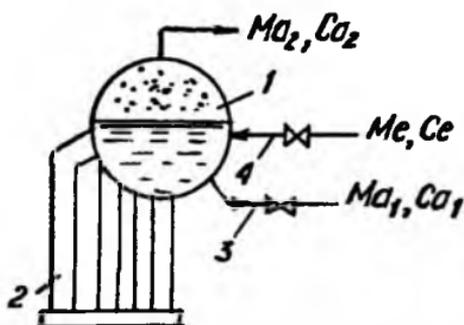


Рис.7.6. Схема участка регулирования солевого содержания котловой воды:  
1 - барабан; 2 - испаритель; 3 - продувка; 4 - питательная вода

Предельная концентрация солей в котловой воде определяется химическим составом солей, давлением и конструкцией циркуляционной системы котла.

В качестве средства, поддерживающего солевого содержание в процессе эксплуатации в заданных пределах, используется непрерывная продувка. В барабане котла идет интенсивное перемешивание сред. Значит, участок представляет собой "полное перемешивание" с разделением потоков (пар практически не должен содержать солей, т.е.  $C_{a2} = 0$ ).

Исходные уравнения запишутся так:

$$m \frac{dC_{a1}}{dt} = M_e C_e - M_{a1} C_{a1}$$

$$m \frac{dC_{a1}}{dt} + M_{a1} C_{a1} = M_e C_e$$

$$\frac{m}{M_{a1}} \frac{dC_{a1}}{dt} + C_{a1} = \frac{M_e C_e}{M_{a1}}$$

Обозначим

$$\frac{M_e C_e}{M_{a1}} = C_e^*; \quad \frac{m}{M_{a1}} = T,$$

тогда

$$T \frac{dC_{a1}}{dt} + C_{a1} = C_e^*$$

Здесь следует обратить внимание на то, что постоянная времени  $T$  определяется как время прохода не для суммарного расхода (см. (7.17)), а только для  $M_{a1}$ .

В приращениях

$$\frac{T d\Delta C_{a1}}{dt} + \Delta C_{a1} = \Delta C_e^*$$

С учетом того, что  $C_e = f(M_e, M_{a1}, C_e)$ , получаем

$$T \frac{d\Delta C_{a1}}{dt} + \Delta C_{a1} = a_1 \Delta M_e + a_2 \Delta M_{a1} + b_1 \Delta C_e,$$

где 
$$a_1 = \frac{\bar{C}_e}{\bar{M}_{a1}}; a_2 = -\frac{\bar{M}_e \bar{C}_e}{\bar{M}_{a1}^2} = -\frac{M_{a1} C_{a1}}{\bar{M}_{a1}^2} = -\frac{\bar{C}_{a1}}{\bar{M}_{a1}}; b_1 = \frac{\bar{M}_e}{\bar{M}_{a1}}.$$

Соответственно можно записать передаточные функции по каждому из трех каналов.

Концентрация солей в продувочной воде (из уравнения статики)

$$C_{a1} = \frac{\bar{M}_e \bar{C}_e}{\bar{M}_{a1}}$$

## 8. Математические модели участка смешения жидкостей по температуре смеси

Динамику смешения потоков жидкости с различными расходами и температурой (энтальпией) рассмотрим на примере регенеративного пароводяного подогревателя, в котором смешиваются потоки сконденсировавшегося пара из отбора турбины и конденсата пара из последующего подогревателя (либо охладителя дренажа (рис 8.1)).

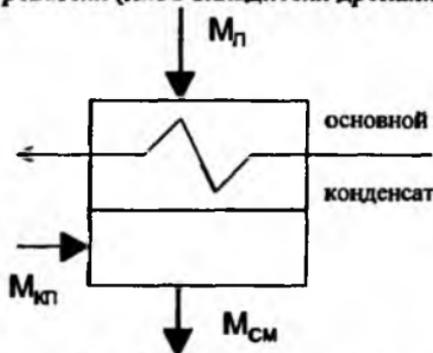


Рис. 8.1. Расчетная схема

При выводе уравнения динамики примем допущения:

- в корпусе подогревателя происходит полное перемешивание потоков;
- уровень воды двух смешиваемых потоков остаётся во времени неизменным (стабилизируется автоматическим регулятором).

Воспользуемся уравнением сохранения энергии

$$m \frac{dh_{CM}}{dt} = M_{\Pi} h_{\Pi} + M_{КП} h_{КП} - M_{CM} h_{CM}, \quad (8.1)$$

где  $m$  - масса конденсата в подогревателе;

$h_{\Pi}, h_{КП}, h_{CM}$  - энтальпия пара, конденсата греющего пара и смеси соответственно;

$M_{\Pi}, M_{КП}, M_{CM}$  - массовый расход пара, конденсата пара и смеси.

Перепишем (8.1)

$$m \frac{dh_{CM}}{dt} + M_{CM} h_{CM} = M_{\Pi} h_{\Pi} + M_{КП} h_{КП},$$

или

$$\frac{m}{M_{CM}} \frac{dh_{CM}}{dt} + h_{CM} = \frac{M_{\Pi} h_{\Pi} + M_{КП} h_{КП}}{M_{CM}}.$$

Учитывая, что

$$M_{CM} = M_{\Pi} + M_{КП},$$

получим

$$T_{CM} \frac{dh_{CM}}{dt} + h_{CM} = h_{УСЛ}, \quad (8.2)$$

где

$$T_{CM} = \frac{m}{M_{CM}} - \text{постоянная времени}; \quad (8.3)$$

энтальпия смеси

$$h_{УСЛ} = \frac{M_{\Pi} h_{\Pi} + M_{КП} h_{КП}}{M_{\Pi} + M_{КП}} - \text{условная входная энтальпия смеси}. \quad (8.4)$$

Запишем (8.2) в приращениях:

$$T_{CM} \frac{d\Delta h_{CM}}{dt} + \Delta h_{CM} = \Delta h_{УСЛ}. \quad (8.5)$$

С учетом того, что

$$\Delta h_{УСЛ} = \left( \frac{\partial h_{УСЛ}}{\partial M_{\Pi}} \right)_0 \Delta M_{\Pi} + \left( \frac{\partial h_{УСЛ}}{\partial M_{КП}} \right)_0 \Delta M_{КП} + \left( \frac{\partial h_{УСЛ}}{\partial h_{\Pi}} \right)_0 \Delta h_{\Pi} + \left( \frac{\partial h_{УСЛ}}{\partial h_{КП}} \right)_0 \Delta h_{КП},$$

найдем частные производные из (8.4):

$$K_1 = \left( \frac{\partial h_{\text{УСЛ}}}{\partial M_{\text{П}}} \right)_0 = \frac{\bar{h}_{\text{П}} (\bar{M}_{\text{П}} + \bar{M}_{\text{КП}}) - (\bar{M}_{\text{П}} \bar{h}_{\text{П}} + \bar{M}_{\text{КП}} \bar{h}_{\text{КП}})}{(\bar{M}_{\text{П}} + \bar{M}_{\text{КП}})^2} \quad (8.6)$$

$$K_2 = \left( \frac{\partial h_{\text{УСЛ}}}{\partial M_{\text{КП}}} \right)_0 = \frac{\bar{h}_{\text{КП}} (\bar{M}_{\text{П}} + \bar{M}_{\text{КП}}) - (\bar{M}_{\text{П}} \bar{h}_{\text{П}} + \bar{M}_{\text{КП}} \bar{h}_{\text{КП}})}{(\bar{M}_{\text{П}} + \bar{M}_{\text{КП}})^2} \quad (8.7)$$

$$K_3 = \left( \frac{\partial h_{\text{УСЛ}}}{\partial h_{\text{П}}} \right)_0 = \frac{\bar{M}_{\text{П}}}{\bar{M}_{\text{П}} + \bar{M}_{\text{КП}}} \quad (8.8)$$

$$K_4 = \left( \frac{\partial h_{\text{УСЛ}}}{\partial h_{\text{КП}}} \right)_0 = \frac{\bar{M}_{\text{КП}}}{\bar{M}_{\text{П}} + \bar{M}_{\text{КП}}} \quad (8.9)$$

Подставив (8.6) - (8.9) в (8.5), получим

$$T_{\text{СМ}} \frac{d\Delta h_{\text{СМ}}}{dt} + \Delta h_{\text{СМ}} = K_1 \Delta M_{\text{П}} + K_2 \Delta M_{\text{КП}} + K_3 \Delta h_{\text{П}} + K_4 \Delta h_{\text{КП}} \quad (8.10)$$

Как видно, получили дифференциальные уравнения 1-го порядка по всем возмущениям.

Поскольку  $h = C_p \cdot t$ , то, приняв  $C_p = \text{const}$ , можно получить уравнения динамики по температуре жидкости.

Изменение количества входных потоков не отражается на методике расчета.

При отсутствии смесительного бака, т.е. при безынерционном смешивании, получим алгебраическое уравнение с теми же коэффициентами.

## 9. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

### 9.1. Пароводяной теплообменник

Расчетная схема теплообменника изображена на рис. 9.1: нагреваемая жидкость с начальной температурой  $\theta_{\text{Ж}}^{\text{ВХ}}$  проходит внутри трубок и нагревается до температуры  $\theta_{\text{Ж}}^{\text{ВЫХ}}$ , поэтому теплообменник со стороны жидкости - объект с распределенными параметрами.

Греющий пар конденсируется на наружной стороне трубок при постоянном давлении и образуется конденсат высотой  $L$ .

При этом температура жидкой и паровой фаз одинакова и по ней нельзя судить об интенсивности процесса конденсации.

В этом случае основным показателем процесса теплообмена является уровень жидкой фазы. Паровую часть теплообменника можно рассматривать как объект с сосредоточенными параметрами.

В качестве выходной величины будем рассматривать температуру жидкости на выходе теплообменника.

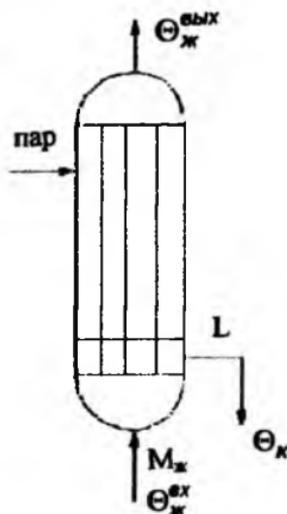


Рис. 9.1 Расчетная схема Теплообменника

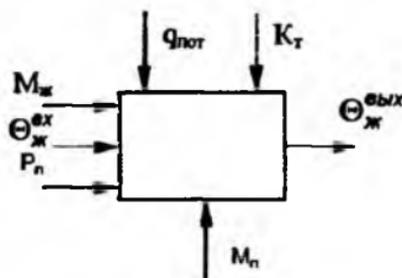


Рис.9.2 Параметрическая схема теплообменника

Основные возмущающие воздействия:

- расход жидкости,  $M_{ж}$ ;
- температура жидкости на входе,  $\theta_{ж}^{вх}$ ;
- давление пара,  $P_{п}$ .

Регулирующее воздействие - расход пара  $M_{п}$ .

Неконтролируемые возмущения:

- потери в окружающую среду,  $q_{пот}$ , зависящие от температуры наружного воздуха;
- изменение со временем коэффициента теплопередачи,  $K_T$ .

К рассматриваемым теплообменникам относятся подогреватели химочищенной воды, сетевой воды, регенеративные подогреватели низкого и высокого давления. Параметрическая схема теплообменника изображена на рис.9.2.

Структурная схема взаимодействий между потоками пара, жидкости и поверхностью теплообмена  $St$  показана на рис.9.3.

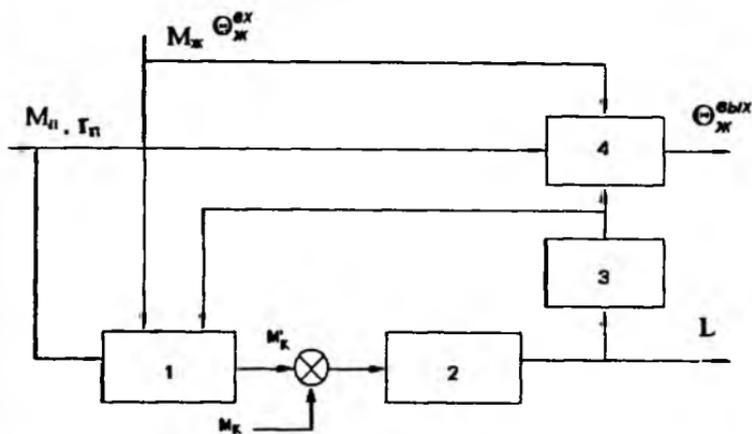


Рис. 9.3 Структурная схема теплообменника

Звено 1 - отражает процесс конденсации.

Звено 2 - отражает связь между расходом конденсата и уровнем  $L$ .

Звено 3 - отражает связь между поверхностью теплообменника  $St$  и уровнем  $L$ .

Звено 4 - отражает тепловой процесс между паром и жидкостью.

Как видно из схемы, температура жидкости  $\theta_j^{blyx}$  зависит не только от расхода пара, но и от уровня конденсата  $L$ . Однако интенсивность теплообмена между паром и жидкостью выше, чем между конденсатом и жидкостью. Кроме того, в таких теплообменниках уровень конденсата, как правило, стабилизируется автоматически регулятором. Поэтому в дальнейших расчетах влиянием звена 3 на  $\theta_j^{blyx}$  будем пренебрегать.

### 9.1.1. Статические характеристики

Примем допущения:

- пар насыщенный;
- конденсат не переохлажденный;
- потерями  $q_{пот}$  пренебрегаем.

Запишем уравнение сохранения энергии для установившегося режима

$$M_k C_{p_j} (\theta_j^{blyx} - \theta_j^{ex}) = M_n r_n, \quad (9.1)$$

где  $C_{p_j}$  - удельная теплоемкость жидкости;

$r_n$  - удельная теплота конденсации.

Решая уравнение (9.1) относительно  $\theta_j^{blyx}$ , получаем

$$\Theta_{\text{ж}}^{\text{Вых}} = \Theta_{\text{ж}}^{\text{Вх}} + \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ж}}} \cdot \frac{r_{\text{п}}}{C_{\text{р ж}}} . \quad (9.2)$$

Как видно, выходная температура жидкости прямо пропорциональна входной температуре, расходу пара, удельной теплоте конденсации и обратно пропорциональна расходу жидкости.

После линеаризации (9.2) в окрестности установившегося режима получаем

$$\Delta \Theta_{\text{ж}}^{\text{Вых}} = \Delta \Theta_{\text{ж}}^{\text{Вх}} + \frac{\bar{r}_{\text{п}}}{\bar{M}_{\text{ж}} C_{\text{р ж}}} \Delta M_{\text{п}} + \frac{\bar{M}_{\text{п}}}{\bar{M}_{\text{ж}} C_{\text{р ж}}} \Delta r_{\text{п}} - \frac{\bar{M}_{\text{п}} \bar{r}_{\text{п}}}{\bar{M}_{\text{ж}}^2 C_{\text{р ж}}} \Delta M_{\text{ж}} ,$$

или

$$\Delta \Theta_{\text{ж}}^{\text{Вых}} = \Delta \Theta_{\text{ж}}^{\text{Вх}} + K_1 \Delta M_{\text{п}} + K_2 \Delta r_{\text{п}} + K_3 \Delta M_{\text{ж}} , \quad (9.3)$$

где

$$K_1 = \frac{\bar{r}_{\text{п}}}{\bar{M}_{\text{ж}} C_{\text{р ж}}} \quad (9.4)$$

$$K_2 = \frac{\bar{M}_{\text{п}}}{\bar{M}_{\text{ж}} C_{\text{р ж}}} \quad (9.5)$$

$$K_3 = \frac{\bar{M}_{\text{п}} \bar{r}_{\text{п}}}{\bar{M}_{\text{ж}}^2 C_{\text{р ж}}} \quad (9.6)$$

### 9.1.2. Математическая модель теплообменника как объекта с сосредоточенными параметрами

Дополнительно к уже принятым примем следующие допущения:

- средняя температура жидкости равна температуре жидкости на выходе теплообменника;
- трубная система не затоплена конденсатом.

Накопление энергии в рассматриваемом теплообменнике происходит в трубной системе (стенке, через которую происходит теплообмен) и жидкости.

Уравнение сохранения энергии для стенки

$$m_{\text{тр}} \cdot c_{\text{тр}} \cdot \frac{d \Theta_{\text{тр}}}{dt} = \alpha_{\text{п}} \cdot S_{\text{п}} (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{тр}}) - \alpha_{\text{ж}} S_{\text{ж}} (\Theta_{\text{тр}} - \Theta_{\text{ж}}^{\text{вых}}) , \quad (9.7)$$

где  $m_{\text{тр}}$  - масса металла трубной системы;

$c_{\text{тр}}$  - удельная теплоемкость металла труб;

$\Theta_{\text{тр}}$  - температура трубы;

$\alpha_{\text{п}}, \alpha_{\text{ж}}$  - коэффициент теплоотдачи от пара к трубе и от трубы к жидкости соответственно;

$S_n, S_{ж}$  - площадь теплообмена со стороны пара и жидкости соответственно.

Запишем (9.7) в отклонениях

$$m_{mp} \cdot C_{mp} \cdot \frac{d\Theta_{mp}}{dt} = \bar{\alpha}_n \cdot S_n \cdot \Delta\Theta_n - \bar{\alpha}_n \cdot S_n \cdot \Delta\Theta_{mp} - \bar{\alpha}_x \cdot S_x \cdot \Delta\Theta_{mp} + \bar{\alpha}_x \cdot S_x \cdot \Delta\Theta_x^{max},$$

или

$$m_{mp} \cdot C_{mp} \cdot \frac{d\Theta_{mp}}{dt} + (\bar{\alpha}_n \cdot S_n + \bar{\alpha}_x \cdot S_x) \Delta\Theta_{mp} = \bar{\alpha}_n \cdot S_n \cdot \Delta\Theta_n + \bar{\alpha}_x \cdot S_x \cdot \Delta\Theta_x^{max}.$$

Разделив все члены уравнения на коэффициент при  $\Delta\Theta_{mp}$  получим

$$T_{mp} \cdot \frac{d\Theta_{mp}}{dt} + \Delta\Theta_{mp} = K_1 \cdot \Delta\Theta_n + K_2 \Delta\Theta_x^p, \quad (9.8)$$

где

$$T_{mp} = \frac{m_{mp} \cdot C_{mp}}{(\bar{\alpha}_n \cdot S_n + \bar{\alpha}_x \cdot S_x)} \text{ - постоянная времени} \quad (9.9)$$

$$K_1 = \frac{\bar{\alpha}_n \cdot S_n}{(\bar{\alpha}_n \cdot S_n + \bar{\alpha}_x \cdot S_x)}. \quad (9.10)$$

$$K_2 = \frac{\bar{\alpha}_x \cdot S_x}{(\bar{\alpha}_n \cdot S_n + \bar{\alpha}_x \cdot S_x)}. \quad (9.11)$$

*Уравнение сохранения энергии для жидкости*

$$m_x \cdot C_x \cdot \frac{d\Theta_x^{max}}{dt} = \bar{\alpha}_x \cdot S_x (\Theta_{mp} - \Theta_x^{max}) - M_x C_{p_x} (\Theta_x^{max} - \Theta_x^{ex}). \quad (9.12)$$

После преобразований уравнение (9.12) запишется так:

$$T_x \cdot \frac{d\Delta\Theta_x^{max}}{dt} + \Delta\Theta_x^{max} = K_3 \cdot \Delta\Theta_{mp} + K_4 \Delta\Theta_x^{ex} + K_5 \Delta M_x, \quad (9.13)$$

где

$$T_x = \frac{m_x \cdot C_p}{(\bar{\alpha}_x \cdot S_x + M_x \cdot C_{p_x})} \text{ - постоянная времени} \quad (9.14)$$

жидкости

$$K_3 = \frac{\bar{\alpha}_x \cdot S_x}{(\bar{\alpha}_x \cdot S_x + M_x \cdot C_{p_x})}. \quad (9.15)$$

$$K_4 = \frac{M_x \cdot C_{p_x}}{(\bar{\alpha}_x \cdot S_x + M_x \cdot C_{p_x})}. \quad (9.16)$$

$$K_3 = \frac{Cp_{\text{ж}} \Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}} - Cp_{\text{ж}} \Theta_{\text{ж}}^{\text{вых}}}{(\bar{\alpha}_{\text{ж}} \cdot S_{\text{ж}} + M_{\text{ж}} \cdot Cp_{\text{ж}})} \quad (9.17)$$

Таким образом, динамика парожидкостного теплообменника описывается системой уравнений (9.8) и (9.13)

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{мп}} \cdot \frac{d\Theta_{\text{мп}}}{dt} + \Delta\Theta_{\text{мп}} &= K_1 \cdot \Delta\Theta_{\text{н}} + K_2 \Delta\Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}} \\ T_{\text{ж}} \cdot \frac{d\Delta\Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}}}{dt} + \Delta\Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}} &= K_3 \cdot \Delta\Theta_{\text{мп}} + K_4 \Delta\Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}} + K_5 \Delta M_{\text{н}} \end{aligned} \right\} \quad (9.18)$$

Системе уравнений (9.18) соответствует структурная схема рис.9.4.

При регулировании теплообменников обычно регулирующим воздействием является расход пара. Найдем связь между температурой пара и расходом пара.

Температура пара зависит от давления за регулирующим клапаном, а давление определяется расходом пара (давление перед клапаном будем считать постоянным).

Связь между давлением и расходом пара можно приближенно описать дифференциальным уравнением I-го порядка:

$$T_{\text{н}} \cdot \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P = K_6 \Delta M_{\text{н}}, \quad (9.19)$$

где  $T_{\text{н}} = \frac{m_{\text{п}}}{M_{\text{п}}}$  - постоянная времени парового объема

теплообменника; (9.20)

$m_{\text{п}}$  - масса пара в теплообменнике;

$$K_6 = \frac{2K_{\text{ПК}} \bar{M}_{\text{п}}^2}{\bar{S}_{\text{ПК}}^2} \quad \text{- для докритического перепада} \\ \text{давления на клапане;} \quad (9.21)$$

$$K_6 = \frac{K_{\text{ПК}} \bar{M}_{\text{п}}}{\bar{S}_{\text{ПК}}} \quad \text{- для сверхкритического перепада} \\ \text{давления на клапане;} \quad (9.22)$$

$$K_{\text{ПК}} = \frac{1}{\mu^2 \cdot 2 \cdot \rho_{\text{п}}}, \quad (9.23)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  - плотность пара перед клапаном;

$\mu$  - коэффициент расхода клапана;

$S_{\text{ПК}}$  - площадь проходного сечения клапана.



### 9.1.3. Математическая модель теплообменника как объекта с распределенными параметрами

Примем допущения:

- стенка трубы является звеном с сосредоточенными координатами;
- потерями теплоты пренебрегаем;
- тепловой емкостью пленки конденсата пренебрегаем;
- температура жидкости распределена только по длине трубки.

Запишем уравнение теплового баланса для потока жидкости на элементарном участке трубы  $dl$ :

$$m_{жл} C_{p,ж} dl \frac{\partial \Theta_{ж}}{\partial t} + m_{жл} C_{p,ж} dl \cdot W \frac{\partial \Theta_{ж}}{\partial l} = \alpha_{ж} S_{жл} (\Theta_{мп} - \Theta_{ж}) dl, \quad (9.26)$$

или

$$T_{ж} \frac{\partial \Theta_{ж}}{\partial t} + T_{ж} \cdot W \frac{\partial \Theta_{ж}}{\partial l} = \Theta_{мп} - \Theta_{ж}, \quad (9.27)$$

где  $m_{жл}$  - масса жидкости на одном метре потока;

$W$  - скорость жидкости;

$S_{жл}$  - площадь поверхности теплообмена на одном метре трубы.

Остальные переменные известны ранее.

Уравнение теплового баланса для стенки трубы

$$m_{мп} C_{p,мп} dl \frac{\partial \Theta_{мп}}{\partial t} = \alpha_n S_n (\Theta_n - \Theta_{мп}) dl - \alpha_{ж} S_{жл} (\Theta_{мп} - \Theta_{ж}) dl, \quad (9.28)$$

или

$$T_{мп} \frac{\partial \Theta_{мп}}{\partial t} + (1 + \chi) \cdot \Theta_{мп} = \Theta_n + \chi \Theta_{ж}, \quad (9.29)$$

где

$$T_{мп} = \frac{m_{мп} \cdot C_{p,мп}}{\alpha_n S_n \cdot l} \quad (9.30)$$

$$\chi = \frac{\alpha_{ж} S_{жл}}{\alpha_n S_n l}, \quad (9.31)$$

где  $m_{мп}$  - масса одного метра труб;

$C_{p,мп}$  - удельная теплоемкость металла труб.

Применив к уравнениям (9.27) и (9.29) преобразование по Лапласу по времени и по длине и перейдя к отклонению переменных, получим

$$T_{ж} S \cdot \Delta \Theta_{ж}(S) + T_{ж} \cdot W \frac{d\Delta \Theta_{ж}(S)}{dl} + \Delta \Theta_{ж}(S) = \Delta \Theta_{мп}(S) \quad (9.32)$$

$$T_{mp}S \cdot \Delta\Theta_{mp}(S) + (1+\chi) \cdot \Delta\Theta_{mp}(S) = \Delta\Theta_n(S) + \chi \cdot \Delta\Theta_x(S) \quad (9.33)$$

Исключив из полученных уравнений переменную  $\Delta\Theta_{mp}$ , получим обыкновенное дифференциальное уравнение I-го порядка, коэффициенты которого являются функциями комплексного переменного

$$W \cdot \alpha(S) \frac{d\Delta\Theta_x(S)}{dl} + \Delta\Theta_x(S) = b(S) \cdot \Delta\Theta_n(S), \quad (9.34)$$

где

$$\alpha(s) = \frac{T_x(T_{mp}S+1+\chi)}{(T_xS+1)(T_{mp}S+1+\chi)-\chi} = \frac{T_x}{T_xS+1-\frac{\chi}{T_{mp}S+1+\chi}}; \quad (9.35)$$

$$b(s) = \frac{1}{(T_xS+1)(T_{mp}S+1+\chi)-\chi}. \quad (9.36)$$

Решение уравнения (9.34) при граничном условии  $\Delta\Theta_x(S, l) = 0$  для  $l = 0$  и при  $\Delta\Theta_n(l) = const$  имеет вид

$$\Delta\Theta_x(S, l) = \Delta\Theta_n(S) \cdot b(S) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{l}{W \cdot \alpha(S)}\right) \right].$$

Для выходного сечения трубы, т.е. для  $l = L$ , получаем

$$\Delta\Theta_x(S, L) = \Delta\Theta_n(S) \cdot b(S) \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha(S)}} \right], \quad (9.37)$$

где  $\tau = L/W$  - запаздывание или время прохождения жидкостью всей длины трубы.

Таким образом, передаточная функция теплообменника по каналу "температура пара  $\Theta_n$  - температура жидкости на выходе  $\Theta_{ж}$ ":

$$W(S) = b(s) \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha(s)}}). \quad (9.38)$$

$e_n \rightarrow e_x$

Полученная передаточная функция является трансцендентной, что затрудняет отыскание оригинала функции.

Выражение для  $b(S)$  можно представить в виде произведения простейших сомножителей

$$b(s) = \frac{1}{(T_1S+1) \cdot (T_2S+1)}. \quad (9.39)$$

Эквивалентные постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  оказываются близкими по значению к  $T_{TP}$  и  $T_{Ж}$ , причем наибольшая постоянная времени лежит в интервале  $[T_{Ж}, T_{Ж} + T_{TP}]$

Коэффициент приближенно аппроксимируется линейным двучленом:

$$\frac{1}{a(S)} = S + a', \quad (9.40)$$

где

$$a' = \frac{1}{T_{\pi}}$$

Тогда

$$e^{-\frac{1}{a(S)}} = e^{-\tau(S+a')} = b' \cdot e^{-\tau S}, \quad (9.41)$$

где  $b' = e^{-\tau a'}$

С учетом приведенных упрощений передаточная функция (9.38) принимает вид

$$W(S) = \frac{1 - b' \cdot e^{-\tau S}}{(T_1 S + 1) \cdot (T_2 S + 1)}, \quad (9.42)$$

$\Theta_{\pi} \rightarrow \Theta_{\pi}$

или

$$W(S) = \frac{1}{(T_1 S + 1) \cdot (T_2 S + 1)} \cdot (1 - b' \cdot e^{-\tau S}) \quad (9.43)$$

Схема моделирования такой передаточной функции изображена на рис.9.5.

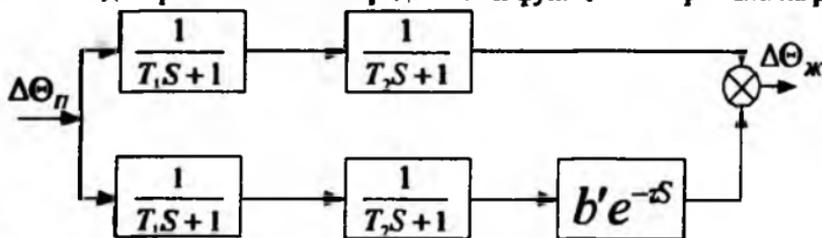


Рис. 9.5. Схема моделирования функции (9.43)

Динамика теплообменника по каналу "температура жидкости на входе  $\Theta_{Ж}^{ВХ}$  - температура жидкости на выходе  $\Theta_{Ж}^{ВЫХ}$ " определяется уравнением (9.34) при условии, что температура пара постоянна и равна  $\Theta_{\pi}$ ,

т.е.  $\Delta\Theta_{\text{п}}(S) = 0$ , а температура жидкости на входе в трубки (при  $l=0$ ) является входной координатой и равна  $\Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}}$ .

Тогда уравнение (9.34) и граничные условия запишутся в виде

$$W \cdot \alpha(S) \frac{d\Delta\Theta_{\text{ж}}(S)}{dl} + \Delta\Theta_{\text{ж}}(S) = 0; \quad (9.44)$$

$$\Theta_{\text{ж}}(0) = \Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}}.$$

Решение уравнения (9.44) дает

$$\Theta_{\text{ж}}(L, S) = \Theta_{\text{ж}}(0, S) \cdot e^{-\frac{L}{W \cdot \alpha(S)}}$$

откуда передаточная функция по каналу  $\Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}} \rightarrow \Theta_{\text{ж}}^{\text{вых}}$

$$W(S)_{\Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}} \rightarrow \Theta_{\text{ж}}^{\text{вых}}} = \exp\left(-\frac{L}{W \cdot \alpha(S)}\right). \quad (9.45)$$

С учетом (9.40) получаем

$$W(S)_{\Theta_{\text{ж}}^{\text{вх}} \rightarrow \Theta_{\text{ж}}^{\text{вых}}} = b' \cdot e^{-\tau \cdot S}, \quad (9.46)$$

т.е. это произведение пропорционального и запаздывающего звеньев.

Рассмотрим влияние расхода жидкости на выходную температуру жидкости.

При увеличении расхода  $M_{\text{ж}}$  происходит увеличение коэффициента теплоотдачи вдоль всей длины теплообменника. Однако относительное изменение общего коэффициента теплоотдачи меньше, чем относительное изменение расхода, так что температура жидкости на выходе понижается в течение  $\tau = L/W$  секунд - времени прохода жидкости через теплообменник.

## 9.2. Водно-водяной теплообменник

Вывод уравнения динамики водо-водяного теплообменника рассмотрим на примере теплообменника расхолаживания реактора.

Рассматриваемый аппарат является трубчатым теплообменником (ТО) поверхностного типа. Горячая вода после реактора поступает в межтрубное пространство теплообменника и в результате продольного и поперечного обтекания трубной системы постепенно охлаждается (рис. 9.6). Охлаждающая техническая вода проходит внутри труб и постепенно нагревается, чем обеспечивается охлаждение воды 1-го контура реактора.

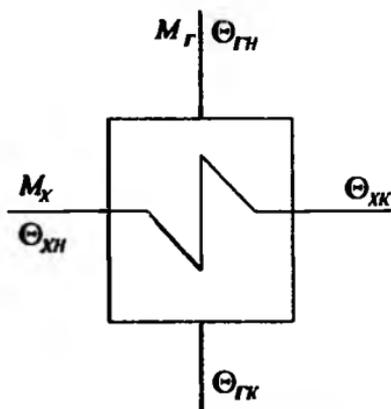


Рис. 9.6. Расчетная схема ТО

Движение теплоносителей - противоточное. В соответствии с параметрической схемой (рис. 9.7) температура воды на выходе ТО  $\Theta_{rK}$  зависит от расхода горячей воды  $M_r$  и её начальной температуры и расхода охлаждающей воды  $M_x$  с её начальной температурой  $\Theta_{xH}$ . Таким образом, рассматриваемый ТО является типичным объектом с распределенными параметрами. Динамика таких объектов описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, что приводит к трансцендентным передаточным функциям, мало пригодным для инженерной практики.



Рис. 9.7. Параметрическая схема ТО

Будем рассматривать ТО как объект с сосредоточенными параметрами, что вполне пригодно для инженерных расчетов. При этом ТО имеет три емкости: вода горячая 1-го контура, трубная система и вода техническая охлаждающая.

Запишем уравнение сохранения энергии в сосредоточенных координатах для охлаждающей воды

$$m_x C_{p_x} \frac{d\Theta_x^p}{dt} = \alpha_x S_x (\Theta_{mp} - \Theta_x^p) + M_x C_{p_x} \Theta_{xH} - M_x C_{p_x} \Theta_{xK}, \quad (9.47)$$

где  $m_x$  - масса технической воды в ТО;

$C_{pX}$  - удельная теплоемкость воды;

$M_X$  - массовый расход технической воды;

$\Theta_X^{\text{cp}}$  - средняя температура технической воды;

$\Theta_{XH}, \Theta_{XK}$  - начальная и конечная температуры технической воды соответственно;

$\bar{a}_X$  - коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к воде;

$S_X$  - площадь поверхности теплообмена со стороны технической воды;

$\Theta_{mp}$  - средняя температура трубной системы.

Примем допущение, что  $\Theta_X^{\text{cp}} = \Theta_{XK}$ , тогда (9.47) переписывается так:

$$m_X C_{pX} \frac{d\Theta_{XK}}{dt} = \bar{a}_X S_X (\Theta_{mp} - \Theta_{XK}) + M_X C_{pX} \Theta_{XH} - M_X C_{pX} \Theta_{XK}$$

Линеаризуем полученное уравнение и запишем его в отклонениях

$$m_X C_{pX} \frac{d\Delta\Theta_{XK}}{dt} = \bar{a}_X S_X \Delta\Theta_{mp} - \bar{a}_X S_X \Delta\Theta_{XK} - M_X C_{pX} \Delta\Theta_{XK} - C_{pX} \bar{\Theta}_{XK} \Delta M_X + \bar{M}_X C_{pX} \Delta\Theta_{XH} + C_{pX} \bar{\Theta}_{XH} \Delta M_X$$

После приведения к стандартному виду последнее уравнение принимает

вид

$$T_X \frac{d\Delta\Theta_{XK}}{dt} + \Delta\Theta_{XK} = K_1 \Delta\Theta_{mp} + K_2 \Delta\Theta_{XH} + K_3 \Delta M_X, \quad (9.48)$$

где

$$T_X = \frac{m_X C_{pX}}{\bar{a}_X S_X + \bar{M}_X C_{pX}} - \text{постоянная времени}; \quad (9.49)$$

$$K_1 = \frac{\bar{a}_X S_X}{\bar{a}_X S_X + M_X C_{pX}} - \text{коэффициент передачи по } \Theta_{mp}; \quad (9.50)$$

$$K_2 = \frac{\bar{M}_X C_{pX}}{\bar{a}_X S_X + \bar{M}_X C_{pX}} - \text{коэффициент передачи по } \Theta_{XH}; \quad (9.51)$$

$$K_3 = \frac{C_{pX} \bar{\Theta}_{XH} - C_{pX} \bar{\Theta}_{XK}}{\bar{a}_X S_X + M_X C_{pX}} - \text{коэффициент передачи по } M_X. \quad (9.52)$$

Запишем уравнение сохранения энергии для трубной системы:

$$m_{TP} C_{TP} \frac{d\Theta_{TP}}{dt} = \alpha_T S_T (\Theta_T^{\text{cp}} - \Theta_{TP}) - \alpha_X S_X (\Theta_{TP} - \Theta_X^{\text{cp}}), \quad (9.53)$$

где  $m_{TP}$  - масса трубной системы;

$C_{TP}$  - удельная теплоемкость металла трубы;

$\alpha_T$  - коэффициент теплоотдачи от горячей воды 1-го контура к трубе;

$S_r$  - площадь поверхности теплообмена со стороны горячей воды;

$\Theta_r^{cp}$  - средняя температура горячей воды в ТО.

Приняв допущение, что  $\Theta_r^{cp} = \Theta_{ГК}$ , с учетом ранее принятого допущения

$\Theta_x^{cp} = \Theta_{ХК}$  получаем

$$m_{TP} C_{TP} \frac{d\Delta\Theta_{TP}}{dt} = \alpha_r S_r (\Theta_{ГК} - \Theta_{TP}) - \alpha_x S_x (\Theta_{TP} - \Theta_{ХК}).$$

После линеаризации и записи переменных в отклонениях имеем

$$T_{TP} \frac{d\Delta\Theta_{TP}}{dt} + \Delta\Theta_{TP} = K_4 \Delta\Theta_{ГК} + K_5 \Delta\Theta_{ХК}, \quad (9.54)$$

где  $T_{TP} = \frac{m_{TP} C_{TP}}{\bar{\alpha}_r S_r + \bar{M}_x C_{p_x}}$  - постоянная времени трубной

системы; (9.55)

$$K_4 = \frac{\bar{\alpha}_r S_r}{\bar{\alpha}_r S_r + \bar{\alpha}_x S_x}; \quad (9.56)$$

$$K_5 = \frac{\bar{\alpha}_x S_x}{\bar{\alpha}_r S_r + \bar{\alpha}_x S_x}. \quad (9.57)$$

Запишем уравнение сохранения энергии для горячей воды 1-го контура, сразу приняв допущение, что  $\Theta_r^{cp} = \Theta_{ГК}$

$$m_r C_{pr} \frac{d\Delta\Theta_{ГК}}{dt} = M_r C_{pr} (\Theta_{ГН} - \Theta_{ГК}) - \alpha_r S_r (\Theta_{ГК} - \Theta_{TP}). \quad (9.58)$$

После линеаризации уравнение в отклонениях запишется так:

$$T_r \frac{d\Delta\Theta_{ГК}}{dt} + \Delta\Theta_{ГК} = K_6 \Delta\Theta_{ГН} + K_7 \Delta M_r + K_8 \Delta\Theta_{TP}, \quad (9.59)$$

где  $T_r = \frac{m_r C_{pr}}{\bar{\alpha}_r S_r + \bar{M}_r C_{pr}}$  - постоянная времени; (9.60)

$$K_6 = \frac{\bar{M}_r C_{pr}}{\bar{\alpha}_r S_r + \bar{M}_r C_{pr}}; \quad (9.61)$$

$$K_7 = \frac{\bar{C}_{pr} \bar{\Theta}_{ГН} - C_{pr} \bar{\Theta}_{ГК}}{\bar{\alpha}_r S_r + \bar{M}_r C_{pr}}; \quad (9.62)$$

$$K_8 = \frac{\bar{\alpha}_r S_r}{\bar{\alpha}_r S_r + \bar{M}_r C_{pr}}. \quad (9.63)$$

Таким образом, динамика ТО описывается системой из трех дифференциальных уравнений 1-го порядка (9.48), (9.54) и (9.59).

Структурная схема модели ТО представлена на рис.9.8.



Рис. 9.8. Структурная схема модели ТО

## 10. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕАЭРАТОРА ПО ДАВЛЕНИЮ

Деаэратор является смешивающим подогревателем, в котором одновременно осуществляется его термическая деаэрация. Он состоит из деаэрационной головки и накопительного бака (рис.10.1).

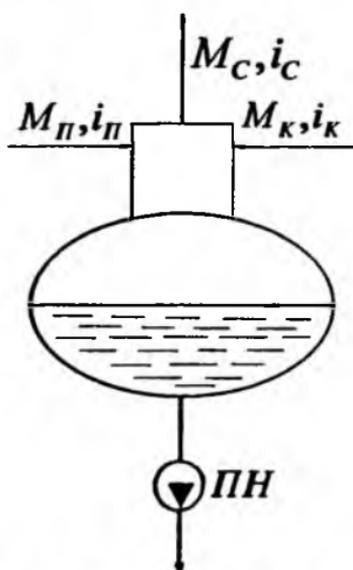


Рис. 10.1. Расчетная схема деаэраатора

В верхнюю часть головки подается конденсат (в тепловой схеме энергоблока - после подогревателей низкого давления), а в нижнюю часть -

греющий пар из отбора турбины. Конденсат нагревается до температуры насыщения, выделившиеся из него газы вместе с остатками пара удаляются из головки в виде выпара. Деаэрированный конденсат собирается в деаэрационном баке.

Для вывода уравнения динамики деаэратора по давлению пара запишем уравнение сохранения энергии для парового пространства:

$$\frac{d[(V_{II} - V_K)\rho^*i^*]}{dt} = M(i_{II} - i') + Q_u - M_C i^* - M_K(i' - i_K), \quad (10.1)$$

где  $V_{II}, V_K$  - объёмы парового пространства и водяных капель в нём соответственно;

$M_{II}, M_K, M_C$  - массовый расход пара, конденсата и паровоздушной смеси соответственно;

$Q_u$  - количество теплоты, поступающее в паровое пространство за счет самоиспарения конденсата;

$i^*, i', i_{II}, i_K$  - энтальпии сухого насыщенного пара, воды на линии насыщения, пара и конденсата соответственно;

$\rho^*$  - плотность насыщенного пара.

При этом аккумуляцией теплоты в металле пренебрегаем. Поскольку уровень питательной воды в баке, как правило, стабилизируется автоматическим регулятором, то влиянием уровня воды на объём  $V_{II}$  также пренебрегаем. Записав (10.1) в отклонениях переменных, получим

$$\begin{aligned} (V_{II} - V_K) \frac{d(\rho^* i^*)}{dt} + \rho^* i^* \frac{dV_{II}}{dt} = (i_{II} - i') \Delta M_{II} - i^* \Delta M_C - (i' - i_K) \Delta M_K + \\ + M_{II} \Delta i_{II} (M_{II} + M_K) \Delta i' - M_C \Delta i^* + M_K \Delta i_K + Q_u. \end{aligned} \quad (10.2)$$

В этом уравнении плотность и энтальпия насыщенного пара однозначно определяются давлением пара  $P_d$  в деаэраторе. Энтальпия пара  $i_{II}$  определяется давлением в камере отбора турбины. Энтальпия конденсата  $i_K = c t_K$ , где  $c$  - удельная теплоёмкость конденсата. Расход теплоты за счет самоиспарения конденсата  $\Delta Q_u$  изменяет свою величину и знак в зависимости от направления изменения давления  $dP_d/dt$ . При повышении давления в деаэраторе часть аккумулированного в нем пара конденсируется, унося в единицу времени из парового пространства в водяное количество теплоты

$$\Delta Q_u = (V_{II} - V_K) \rho^* (\partial i^* / \partial P_d) dP_d / dt.$$

В случае понижения давления в деаэраторе ( $dP_d/dt < 0$ ) вода в нём оказывается перегретой и часть её испаряется, унося в паровое пространство количество теплоты, равное

$$(V_B \rho' \cdot i' / r) \cdot (di' / dP_d) \cdot dP_d / dt,$$

где  $r$  - удельная теплота парообразования;

$V_B$  - объём перегретой воды.

Следовательно, можно записать

$$Q_U = - A dP_d / dt,$$

$$A = \begin{cases} (V_n - V_k) \cdot d(\rho'' i'') / dP_d & \text{при } dP_d / dt > 0 \\ (V_B \rho' i' / r) \cdot di' / dP_d & \text{при } dP_d / dt < 0 \end{cases}$$

Таким образом, деаэратор является нелинейным объектом регулирования. Количество паровоздушной смеси в атмосферу зависит от давления в деаэраторе. С учётом того, что в равновесных режимах  $(i' - i_k) \cdot \bar{M}_k = (i_n - i'') \cdot \bar{M}_n$ , получим

$$T \Delta P' + \Delta P = K_{II} \Delta M_{II} - K_K \Delta M_K + K_P \Delta P_{II} + K_I \Delta i_K, \quad (10.3)$$

$$T = \frac{T_{II}}{Z_{II}} \quad (10.4)$$

$$T_{II} = \frac{\left[ (V_n - V_k) \frac{\partial(\rho'' \cdot i'')}{\partial P} + A i \right] \cdot \bar{P}}{(i' - i_k) \cdot \bar{M}_k} \quad (10.5)$$

$$Z_{II} = \frac{\left[ (\bar{M}_n + \bar{M}_k) \frac{\partial i'}{\partial P} + \frac{\partial(M_c \cdot i'')}{\partial P} \right] \cdot \bar{P}}{(i' - i_k) \cdot \bar{M}_k} \quad (10.6)$$

$$K_{II} = \frac{\bar{P}}{Z_{II} \cdot \bar{M}_n} \quad (10.7)$$

$$K_K = \frac{\bar{P}}{Z_D \cdot \bar{M}_K} \quad (10.8)$$

$$K_P = \frac{(\partial i_{OTB} / \partial P_{OTB}) \cdot \bar{P}_{OTB} \cdot \bar{M}_D}{(i' - i_K) \cdot \bar{M}_K \cdot Z_D} \quad (10.9)$$

$$K_t = \frac{i_K \cdot \bar{P}}{(i' - i_K) \cdot Z_D \cdot \bar{t}_K} \quad (10.10)$$

Здесь  $i_{OTB}$ ,  $P_{OTB}$  - энтальпия и давление пара в отборе турбины;

$t_K$  - температура конденсата.

Таким образом, динамика деаэратора по всем четырем каналам описывается дифференциальным уравнением 1-го порядка.

## 11. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПЕНСАТОРА ДАВЛЕНИЯ

### 11.1. Математическое описание компенсатора давления по давлению и уровню воды

Особенность моделирования работы компенсатора объема КО (давления) заключается в том, что в различных режимах пар и вода в нем могут находиться как в равновесном, так и неравновесном состоянии. В установившемся режиме пар и вода находятся в равновесии, т.е. температура и давление в указанных средах одинаковы и соответствуют их значениям на линии насыщения.

При аварийной ситуации, когда холодный теплоноситель поступает в КО, наступает неравновесный режим, при этом за счет работы нагревателей вода постепенно нагревается и достигает температуры насыщения. При пуске реакторной установки сначала создается азотная подушка, которая затем постепенно вытесняется паром. Таким образом, следует рассматривать четыре комбинации состояния пара и воды: перегретый пар — насыщенная вода, перегретый пар — недогретая вода, ненасыщенный пар — недогретая вода, ненасыщенный пар — насыщенная вода. Все расчетные случаи, приведенные в табл. 11.1, сводятся к определению температуры смешения воды с учетом тепла, подводимого от электронагревателей при их включении, параметров пара на линии насыщения при изменении его объема, равновесных параметров двухфазной смеси при изменении ее объема, массы и внутренней энергии.



- процесс расширения пароводяной смеси считается равновесным;
- процесс сжатия считается неравновесным;
- сжатие пара происходит по линии насыщения, а температура воды в КО снижается за счет перемешивания с поступающей из контура холодной водой;
- конденсация пара, нагрев впрыснутой воды и испарение ее происходят мгновенно.

### *Система уравнений математической модели компенсатора объема*

Контролируемые параметры в модели: давление в КО, уровень в КО, температура пара в КО, температура воды в КО.

В приведенных ниже выражениях приняты следующие обозначения и индексы:

$Q$  - скорость выделения тепла, кДж/с;

$G$  - расход, м<sup>3</sup>/с;

$\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  - время, с;

$c$  - удельная теплоемкость, кДж/(кг \* °C);

$i$  - энтальпия, кДж/кг;

$t$  - температура, °C;

$H$  - уровень, м;

$T$  - постоянная времени, с;

$M$  - масса, кг;

$S$  - площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$\xi$  - коэффициент гидравлического сопротивления;

$\Theta$  - степень открытия клапана;

$p$  - давление, МПа;

$R$  - газовая постоянная, кДж/(кг\* °C);

$G_f$  - изменение объема воды за счет теплового расширения, м<sup>3</sup>/с;

$V$  - объем, м<sup>3</sup>.

Индексы:  $v$  - вода;  $a$  - азот;  $n$  - пар;  $течь$  - течь из первого контура;  $ки$  - конденсация пара или испарение воды;  $лк$  - предохранительный клапан (в барботер);  $впр$  - впрыск через регулятор;  $гс$  - газовые сдвухи;  $наг$  - нагреватели;  $ко$  - компенсатор объема;  $бб$  - барботажный бак;  $в ко$  - вода КО;  $гн$ ,  $хн$  - горячая, холодная нитка;  $ср$  - средняя.

Уравнения сохранения массы воды, пара и азота для всего главного циркуляционного контура (ГЦК) имеют вид

$$\frac{dM_v}{d\tau} = \sum_{i=1}^n G_i \rho_i - G_{течь} \rho_{течь} + G_{ки} \rho_v; \quad (11.1)$$

$$\frac{dM_n}{d\tau} = \frac{d(V_n \rho_n)}{d\tau} = \rho_n \frac{dV_n}{d\tau} + V_n \frac{d\rho_n}{d\tau}; \quad (11.2)$$

$$\frac{dM}{d\tau} = \sum_{i=1}^m G_i \rho_i - G_{\text{течь}} \rho_{\text{течь}} - G_{\text{нк}} \rho_a; \quad (11.3)$$

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{dM_n}{d\tau} + \frac{dM_a}{d\tau}; \quad (11.4)$$

$$V_n = V - V_a. \quad (11.5)$$

Подставляя (11.1) и (11.2) в уравнение (11.4), с учетом (11.3) и (11.5)

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m G_i \rho_i - G_{\text{течь}} \rho_{\text{течь}} + G_{\text{нк}} \rho_a = \\ & = \sum_{i=1}^m G_i \rho_i - G_{\text{течь}} \rho_{\text{течь}} + G_{\text{нк}} \rho_a - \rho_n \frac{dV_n}{d\tau} + (V - V_a) \frac{d\rho_n}{d\tau}. \end{aligned} \quad (11.6)$$

Из уравнения (11.6) находим

$$\rho_n \frac{dV_n}{d\tau} = G_{\text{нк}} \rho_a + G_{\text{нк}} \rho_a + (V - V_a) \frac{d\rho_n}{d\tau}. \quad (11.7)$$

Изменение объёма воды в ГЦК определяется из уравнения материального

$$\frac{dV_a}{d\tau} = \sum_{i=1}^m G_i - G_{\text{течь}} + G_{\text{нк}} + G_i. \quad (11.8)$$

Объёмный расход испаряемой воды или конденсируемого пара

$$G_{\text{кв}} = \frac{1}{(\rho_n - \rho_a)} \left[ (V - V_a) \frac{d\rho_n}{d\tau} - \rho_n \left( \sum_{i=1}^m G_i - G_{\text{течь}} + G_{\text{нк}} \right) \right]. \quad (11.9)$$

Уравнение теплового баланса для КО:

$$(V_a C_a \rho_a + V_n C_n \rho_n) \frac{dt_{\text{ко}}}{d\tau} = Q_{\text{нар}} + G_{\text{нар}} \rho_{\text{хн}} t_{\text{хн}} + G_i \rho_a C_a (t_{\text{ко}} - t_{\text{гн}}). \quad (11.10)$$

Полное давление определяется давлением пара:

$$P_{\text{ко}} = P_n. \quad (11.11)$$

Равновесность или неравновесность протекания процесса в КО

определяется знаком расхода теплоносителя  $G_t$ : если теплоноситель выливается из КО, т. е.  $G_t < 0$ , то процесс равновесный, если же теплоноситель поступает в КО, т. е.  $G_t > 0$ , - неравновесный.

Расход теплоносителя, поступающего из первого контура в КО или выливаемого из КО:

$$G_t = k_1 \cdot (V_a - V_{\text{ско}}) \cdot \frac{dt_{\text{сп}}}{d\tau} + k_1 \cdot V_{\text{ско}} \cdot \frac{dt_{\text{ско}}}{d\tau}, \quad (11.12)$$

где  $k_1$  - коэффициент расширения воды по температуре.

Изменение плотности пара связано с изменением температуры КО:

- при равновесном процессе

$$\frac{d\rho_n}{d\tau} = \frac{d\rho_n}{dt_{\text{ско}}} \cdot \frac{dt_{\text{ско}}}{d\tau}; \quad (11.13)$$

- при неравновесном процессе

$$\frac{d\rho_n}{d\tau} = \frac{\rho_n}{(V - V_B)} \cdot \frac{dV_B}{d\tau}. \quad (11.14)$$

Давление пара и азота принимается изменяющимся по адиабате.

$$\frac{P_n}{V_n} = \left( \frac{P_n^{\text{нач}}}{V_n^{\text{нач}}} \right)^\chi, \quad (11.15)$$

где  $\chi = 1,27$ .

Температура пара определяется по формуле Клайперона - Клаузиуса

$$\frac{P_n}{\rho_n} = R(t_{\text{ско}} + 273). \quad (11.16)$$

Уровень воды в КО определяется уравнением

$$\frac{dH_{\text{ко}}}{d\tau} = \frac{1}{S_{\text{ко}}} \cdot \frac{dV_a}{d\tau}. \quad (11.17)$$

Объемный расход пара через предохранительный клапан

$$G_{\text{нк}} = K \sqrt{P_{\text{ко}} - P_{66}}. \quad (11.18)$$

Структурная схема математической модели КО изображена на рис.11.1. Цифры в структурных элементах обозначают номера расчетных формул. Коэффициент  $K_2 = \pi D^2 / 4$ .

Плотность воды и пара на линии насыщения рассчитывается в соответствии с эксплуатационным циркуляром № Ц-06-84 (Т) Минэнерго.

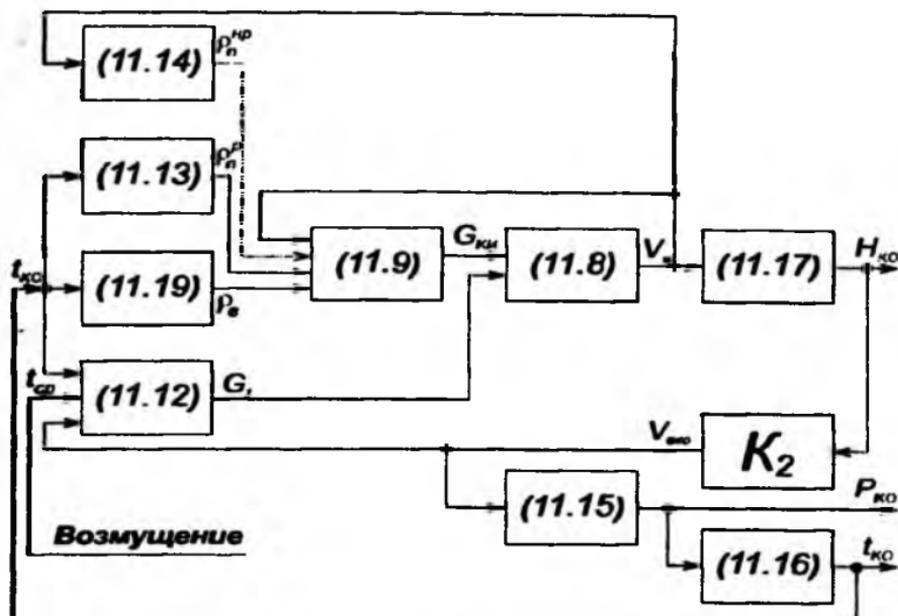


Рис. 11.1. Структурная схема математической модели компенсатора объема

Таблица 11.2

Основные параметры КО для ВВЭР-1000

1.	Рабочая среда	Вода и пароводяная смесь, содержащая раствор борной кислоты до 12 г/л
2.	Давление рабочее	16,0 МПа
3.	Температура рабочая	346±2 °С
4.	Давление расчетное	180 МПа
5.	Температура расчетная	356 °С
6.	Объем пара (в номинальном режиме)	24 м³
7.	Объем воды (в номинальном режиме)	55 м³
8.	Объем компенсатора объема	79 м³
9.	Число электронагревателей	28 шт.
10.	Общая мощность электронагревателей	2520 кВт
11.	Мощность одного блока электронагревателей	90 кВт
12.	I группа электронагревателей	270 кВт
	II группа электронагревателей	270 кВт
	III группа электронагревателей	720 кВт
	IV группа электронагревателей	1260 кВт
13.	Напряжение электронагревателей	380 В
14.	Род тока	Переменный (I=160А)
15.	Частота тока	50 Гц
16.	Соединение нагревателей	Параллельное
17.	Габариты:	
	- высота	12 м
	- диаметр в плане (наибольший)	3,825 м
18.	Внутренний диаметр	3 м
19.	Время полного открытия (закрытия) клапана впрыска	Около 10 с

## 11.2. Экспериментальная математическая модель

В приведенном выше математическом описании КО по давлению и уровню воды единственным входным воздействием является средняя температура теплоносителя первого контура. Однако в реальной энергетической установке возмущающими воздействиями на давление являются изменение реактивности реактора и расход пара  $D$  на турбину. Аналитический вывод уравнений динамики по указанным каналам довольно громоздок, поэтому воспользуемся экспериментальными кривыми разгона КО для энергоблока с ВВЭР-1000. Динамические свойства КО при возмущении реактивностью либо расходом пара являются нелинейными (см. рис. 3.2).

Такие нелинейные свойства при структурном моделировании с помощью типовых звеньев можно приближенно описать с помощью инерционных звеньев первого порядка и звена чистого запаздывания, как показано на рис. 11.2.

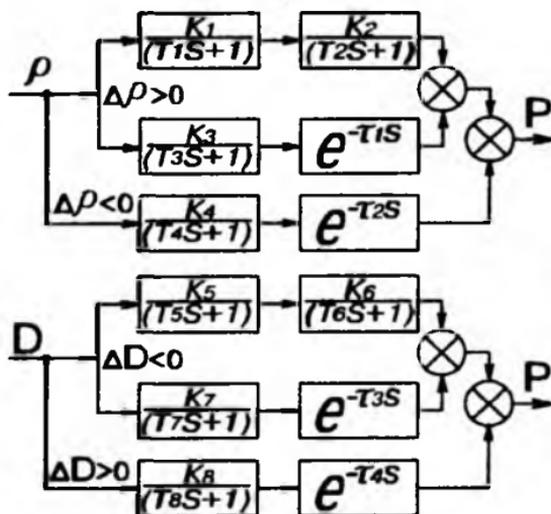


Рис. 11.2. Структурная схема модели КО по давлению по каналам реактивности и расхода пара  $D$

В первом приближении можно воспользоваться следующими значениями коэффициентов передаточных функций:

$$\begin{array}{llll}
 K_1=310^4; & K_2=1; & K_3=-1,5210^4; & K_4=10^6 \\
 K_5=-19710^4; & K_6=1; & K_7=1210^{-3}; & K_8=-610^{-3} \\
 \tau_1=84 \text{ с}; & \tau_2=6 \text{ с}; & \tau_3=106 \text{ с}; & \tau_4=7 \text{ с} \\
 T_1=50 \text{ с}; & T_2=8 \text{ с}; & T_3=50 \text{ с}; & T_4=22 \text{ с} \\
 T_5=22 \text{ с}; & T_6=14 \text{ с}; & T_7=48 \text{ с}; & T_8=20 \text{ с}
 \end{array}$$

В приведенных коэффициентах передачи давление выражено в МПа, реактивность в относительных единицах, расход пара в кг/с.

## 12. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

### 12.1. Вывод уравнения динамики турбогенератора [1]

Процессы в турбомашинных протекают гораздо быстрее, чем в паропроизводящей установке, что позволяет использовать приближенное математическое описание. Прежде всего будем рассматривать турбину с малым паровым объемом после впускного клапана. Не будем учитывать влияние регенеративных подогревателей.

Все турбины, как известно, оснащаются регуляторами скорости вращения пропорционального действия. Элементы этого регулятора должны учитываться при выводе уравнений динамики.

Для нас наиболее важным будет случай работы энергоблока в большой энергетической системе, когда все параллельно работающие агрегаты имеют одну и ту же скорость вращения, определяемую частотой сети. Выходным параметром турбогенератора будем рассматривать мощность турбины, входными параметрами будут являться (рис. 12.1):

- мощность генератора  $N_G$ ;
- давление пара  $P_n$ ;
- изменение задания по частоте вращения  $n_{зад}$ .

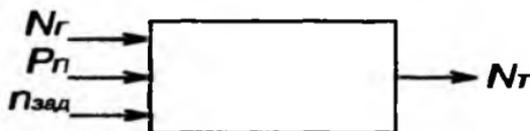


Рис. 12.1. Параметрическая схема

Принципиальная схема системы регулирования частоты вращения турбины изображена на рис. 12.2. В систему, кроме турбогенератора, входят датчик частоты вращения (оборотов), сервомотор, регулирующий клапан и задатчик. Эта система регулирования имеет статическую характеристику в соответствии с рис. 12.3.

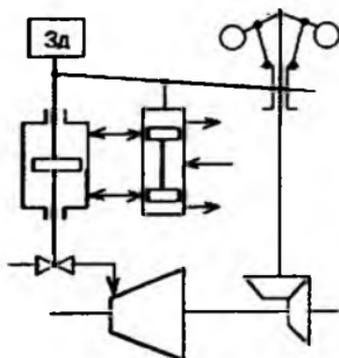


Рис. 12.2.

Принципиальная схема системы регулирования частоты вращения турбины

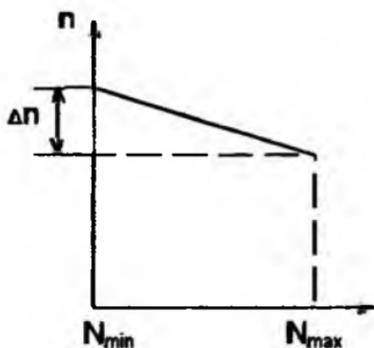


Рис. 12.3.

Статическая характеристика системы регулирования частоты вращения турбины

В соответствии с теоремой моментов количества движения (теоремой сохранения), если вращающий момент турбины  $M_T$  и момент сопротивления генератора  $M_G$  не равны, то их разность вызывает изменение скорости вращения ротора, т.е.

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_G, \quad (12.1)$$

где  $J$  - момент инерции ротора турбины и генератора.

Запишем (12.1) в приращениях:

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta M_T - \Delta M_G. \quad (12.2)$$

Приведем уравнение (12.2) к безразмерной форме, приняв  $\bar{M} = M_{\max}$  (для номинальной нагрузки) и с учетом  $\bar{\omega} = 2\pi n_0$ ,

где  $n_0$  - номинальная частота вращения,

$$\frac{\bar{\omega}}{\omega} \frac{J}{M} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\Delta M_T}{M} - \frac{\Delta M_G}{M},$$

откуда получаем

$$T_a \dot{\varphi} = \mu_T - \mu_G, \quad (12.3)$$

где  $T_a = \frac{2\pi n_0 J}{M}$  - так называемое время разгона турбогенератора;

$\mu_T = \frac{\Delta M_T}{M}$ ,  $\mu_G = \frac{\Delta M_G}{M}$  - относительное приращение вращающего момента турбины;

$\varphi = \frac{\Delta\omega}{\omega}$  - относительное приращение угловой частоты.

Поскольку  $M_T$  и  $M_G$  пропорциональны приращениям мощности  $N_T$  и  $N_G$ , можно записать

$$T_a \varphi' = \frac{\Delta N_T}{N} - \frac{\Delta N_G}{N}.$$

При этом изменение мощности генератора  $N_G$  может быть вызвано изменением числа оборотов  $N_{Gn}$  и прямым изменением потребляемой мощности  $N_{GN}$ .

Уравнение в безразмерной форме

$$T_a \varphi' = v_T - v_G, \quad (12.4)$$

где  $v_T = \frac{\Delta N_T}{N}$ ;  $v_G = \frac{\Delta N_G}{N}$ .

Таким образом, турбогенератор по скорости вращения является астатическим звеном.

Момент инерции  $J$  и время разгона  $T_a$  определяются роторами турбины и генератора.

Время разгона у конденсационных турбин составляет около 10÷15 с. С повышением единичной мощности турбоагрегатов снижается их удельная металлоемкость, при этом моменты инерции роторов турбогенераторов возрастают в меньшей мере, чем мощность, поэтому с ростом единичной мощности уменьшается  $T_a$ .

Турбины АЭС по сравнению с турбинами на перегретом паре имеют ряд особенностей. Влажнопаровые турбины АЭС имеют более развитую часть низкого давления. Этот фактор, а также применение тихоходных турбин приводят к увеличению  $T_a$ . Существенное влияние на динамику турбомашин АЭС оказывает пленка влаги, которой покрыта проточная часть турбины, а также влага в различных резервуарах (например, в сепараторах), которая при сбросах нагрузки и понижении давления испаряется.

Момент сил сопротивления на валу генератора в общем случае зависит от частоты вращения и суммарного электрического сопротивления приборов и агрегатов, подключенных к генератору.

Если к сети подключены такие потребители, как станки, насосы, воздуходувки, то они через электрическую связь способствуют увеличению момента инерции турбогенератора, что в общем случае облегчает условия регулирования.

В стационарном режиме существует зависимость между мощностью генератора и числом оборотов. В общем случае эту связь можно описать следующим образом:

$$\frac{\Delta N_G}{N} = \left( \frac{n}{n_0} \right)^m.$$

Для малых отклонений и с учетом того, что  $N_G = N_{Гн} + N_{ГН}$ , можно записать

$$\frac{N_G + \Delta N_{Гн}}{N_G} = 1 + \frac{\Delta N_{Гн}}{N} = \left( \frac{n_0 + \Delta n}{n_0} \right)^m = 1 + \left( \frac{\Delta n}{n_0} \right)^m \approx 1 + m \frac{\Delta n}{n_0},$$

откуда

$$\frac{\Delta N_G}{N_G} = \frac{\Delta N_{Гн} N_{Г\max}}{N_{Г\max} N_G} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\Delta N_{Гн}}{N_{ГН}} = m \frac{\Delta n}{n_0},$$

где  $\beta = \frac{N_G}{N_{Г\max}}$  - коэффициент загрузки,

или

$$N_{Гн} / N_{Г\max} = m n / n_0.$$

В безразмерной форме

$$\nu_{Гн} = \beta m \varphi.$$

Показатель  $m$  может принимать такие значения [1]:

$m=0$  - сеть с чисто омической нагрузкой;

$m=1$  - сеть со смешанными потребителями;

$m=1$  - рабочие машины, насосы, воздуходувки, работающие на постоянной производительности;

$m=2$  - насосы и воздуходувки, работающие с постоянным давлением;

$m=3$  - насосы и воздуходувки, работающие на скользящих режимах.

Выведенная зависимость мощности генератора от числа оборотов характерна для изолированной работы турбогенератора. При работе турбогенератора на большую сеть можно пренебречь указанной зависимостью, т.е.  $N_{Гн} = 0$  и  $N_G = N_{ГН}$ .

Выведем уравнение датчика частоты вращения. Поскольку такие датчики являются быстродействующими, будем считать их безынерционными.

В этом случае в зоне малых перемещений существует пропорциональная зависимость между изменением частоты вращения  $n$  и положением муфты датчика  $\Delta y$  (рис.12.4):

$$\frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{-y_{\max}}{n_0},$$

откуда

$$\Delta y = -\Delta n y_{\max} / \Delta n_0$$
$$\frac{\Delta y}{y_{\max}} = -\frac{n_0}{\Delta n_0} \frac{\Delta n}{n_0} = -\frac{1}{\delta_x} \frac{\Delta n}{n_0}, \quad (12.5)$$

где  $\delta_x = n/n_0$  - статизм (неравномерность) регулирования (см.рис.12.3).

В общем случае изменение числа оборотов турбины  $\Delta n_T$  обусловлено изменением нагрузки и задания, поэтому можно записать

$$\Delta n_T = \Delta n + \Delta n_{\text{зад.}}$$

откуда

$$\Delta n = \Delta n_T - \Delta n_{\text{зад.}} \quad (12.6)$$

Подставив (12.6) в (12.5), получим

$$\frac{\Delta y}{y_{\max}} = -\frac{1}{\delta_x} \left( \frac{\Delta n_T}{n_0} - \frac{\Delta n_{\text{зад.}}}{n_0} \right), \quad (12.7)$$

или в безразмерной форме

$$\eta = -\frac{1}{\delta_x} (\varphi - \varphi_{\text{зад.}}). \quad (12.8)$$

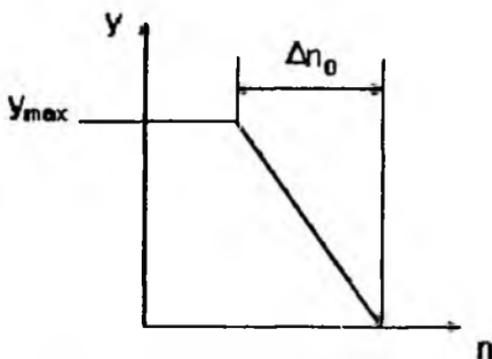


Рис.12.4.Зависимость между частотой вращения  $n$  и положением муфты датчика

Для базовых турбин  $\delta = (4 \div 6)\%$ .

Для регулирующих турбин  $\delta = (2,5 \div 4)\%$ .

Выведем уравнение динамики сервомотора. Скорость перемещения поршня сервомотора пропорциональна отклонению золотника, однако из-за

жесткой обратной связи сервомотор описывается уравнением инерционного звена 1-го порядка, т.е.

$$T_C \frac{\Delta h'}{h_{\max}} + \frac{\Delta h}{h_{\max}} = \frac{\Delta y}{y_{\max}}, \quad (12.9)$$

где  $h$  - перемещение сервомотора (регулирующего клапана);

$T_C$  - время сервомотора.

Величина  $T_C$  соответствует времени полного перемещения сервомотора при максимальной скорости (при полном открытии золотника).

В размерной форме

$$T_C \mu' + \mu = \eta, \quad (12.10)$$

где  $\mu = \Delta h / h_{\max}$ ,  $\eta = \Delta y / y_{\max}$ .

Рассмотрим уравнение регулирующего клапана.

Для сверхкритического перепада давления на клапане для расхода пара  $G_D$  имеем

$$G_D = \frac{\bar{P}_T \bar{F}_M}{a_M}, \quad (12.11)$$

где  $\bar{P}_T$ ,  $\bar{F}_M$  - номинальные значения давления пара и площади проходного сечения клапана;

$a_M$  - постоянный коэффициент.

Приращение расхода пара

$$\Delta G_D = \frac{\bar{F}_M}{a_M} \Delta \bar{P}_T + \frac{\bar{P}_T}{a_M} \Delta \bar{F}_M. \quad (12.12)$$

Разделив все члены полученного уравнения на  $\bar{G}_D$  с учетом (12.11), получим

$$\frac{\Delta G_D}{\bar{G}_D} = \frac{\Delta \bar{P}_T}{\bar{P}_T} + \frac{\Delta \bar{F}_M}{\bar{F}_M}. \quad (12.13)$$

Преобразуем

$$\frac{\Delta G_D}{\bar{G}_D} \frac{\Delta G_{D\max}}{\bar{G}_D} = \frac{\Delta \bar{P}_T}{\bar{P}_T} + \frac{\Delta \bar{F}_M}{\bar{F}_{M\max}} \frac{\Delta \bar{F}_{M\max}}{\bar{F}_M}.$$

С учетом линейной зависимости между проходным сечением клапана, расходом пара и мощностью турбины

$$\frac{\bar{G}_D}{G_{D\max}} = \frac{\bar{F}_M}{F_{M\max}} = \frac{\bar{N}_T}{N_{\max}} = \beta, \quad (12.14)$$

где  $\beta$  - коэффициент нагрузки турбины.



Однако для анализа динамики всего энергоблока важно выяснить влияние указанных возмущений на расход пара  $G_D$ .

Из (12.14), переходя к приращениям расхода пара  $\Delta G_D$  и мощности турбины  $\Delta N_T$ , получим

$$\frac{\Delta G_{D\max}}{G_{D\max}} = \frac{\Delta N_T}{N_{T\max}} = \nu_T,$$

откуда

$$\Delta N_T = \frac{N_{T\max}}{G_{D\max}} \Delta G_D.$$

Соответственно передаточная функция

$$W(s) = \frac{N_{T\max}}{G_{D\max}}, \quad (12.19)$$

т.е. расход пара и мощность турбины связаны пропорциональной зависимостью.

По каналу "мощность генератора  $N_T$  - расход пара  $G_D$ " получаем (при  $m=0$ )

$$W(s) = \frac{G_{D\max}}{N_{T\max}} \frac{1}{\delta_X T_a T_C S^2 + \delta_X T_a S + 1}. \quad (12.20)$$

Если  $T_C$  мала и можно пренебречь членом при  $S^2$ , то

$$W(s) = \frac{G_{D\max}}{N_{T\max}} \frac{1}{\delta_X T_a S + 1}. \quad (12.21)$$

Таким образом, по рассматриваемому каналу объект описывается инерционным звеном 1-го порядка.

По каналу "давление пара  $P_T$  - расход пара  $G_D$ " с учетом (12.15)

$$W(s) = \frac{\beta G_{D\max}}{P_T} \frac{\delta_X T_a T_C S^2 + \delta_X T_a S}{\delta_X T_a T_C S^2 + \delta_X T_a S + 1}. \quad (12.22)$$

С учетом пренебрежения членом  $T_a T_C S^2$

$$W(s) = \frac{\beta G_{D\max}}{P_T} \frac{\delta_X T_a S}{\delta_X T_a S + 1}, \quad (12.23)$$

т.е. по каналу "давление пара - расход пара" турбогенератор описывается передаточной функцией реального дифференцирующего звена. Для удобства

моделирования представим ее в виде суммы передаточных функций пропорционального и апериодического звеньев:

$$W(s) = \frac{\beta G_{D \max} \delta_X T_a S + 1 - 1}{P_T} = \frac{\beta G_{D \max}}{P_T} \left( 1 - \frac{1}{\delta_X T_a S + 1} \right) \quad (12.24)$$

При работе генератора на большую сеть частота вращения турбины, а следовательно, и проходное сечение регулирующих клапанов практически не меняется, тогда в соответствии с (12.12) при  $\Delta F_M = 0$

$$\Delta G_D = \bar{G}_D / \bar{P}_T \cdot \Delta \bar{P}_T$$

Как видно, изменение расхода пара пропорционально изменению его давления. При этом передаточная функция

$$W(s) = \frac{\bar{G}_D}{P_T} \quad (12.25)$$

Передаточная функция по каналу "изменение частоты вращения - изменение расхода пара" для изолированной работы турбины и при  $m=0$  выглядит так

$$W(s) = \frac{G_{D \max}}{n_0} \frac{T_a S}{\delta_X T_a S + 1} \quad (12.26)$$

Эту передаточную функцию можно представить также по форме (12.24).

При работе турбогенератора на большую сеть частота вращения турбины является частотой сети. Решая совместно (12.8), (12.10) и (12.16) при  $\varphi = 0$  и  $\kappa = 0$ , исключив  $\eta$  и  $\mu$ , получим

$$T_c v_T' + v_T = \frac{\Phi_{\text{зад}}}{\delta_X} \quad (12.27)$$

передаточная функция примет вид

$$W(s) = \frac{G_{D \max}}{n_0} \frac{1}{T_c S + 1} \quad (12.28)$$

соответствует динамике инерционного звена 1-го порядка.

Рассмотренные выводы касались конденсационных турбин без промежуточного перегрева пара. Для турбин с промперегревом расход пара при изменении нагрузки генератора и давлению свежего пара существенно определяется аккумулярующей способностью промперегревателя (рис.12.5).

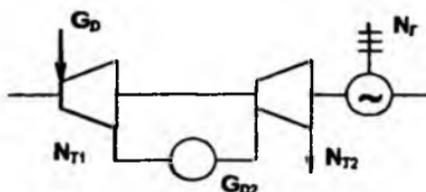


Рис. 12.5. Схема турбогенератора с промперегревом

Запишем основные уравнения сохранения.

Баланс мощности для турбины (статика)

$$N_{T1} + N_{T2} = N_r \cdot \frac{1}{\eta_r}, \quad (12.29)$$

где  $N_{T1}, N_{T2}$  - мощность турбины части высокого и низкого давления соответственно;

$\eta_r$  - КПД генератора.

При этом мощность турбины  $N_{Ti}$  пропорциональна соответствующему эффективному теплоперепаду  $\Delta H_i$  и расходу пара  $G_{Di}$ . Уравнение сохранения массы пара  $m_{пп}$  в промперегревателе и паропроводах:

$$\frac{dm_{пп}}{dt} = G_D - G_{D2}. \quad (12.30)$$

Отборами пара в данных выводах пренебрегаем. Переходя к малым приращениям, решив совместно уравнения (12.29) и (12.30), считая, что расход пара пропорционален давлению, получим

$$\alpha T_{II} \Delta G'_D + \Delta G_D = \frac{G_{D\max}}{N_{r\max}} \Delta N_r + \frac{G_{D\max}}{N_{r\max}} T_{II} \Delta N'_r. \quad (12.31)$$

Передаточная функция по каналу "мощность генератора - расход пара" для части высокого давления турбины:

$$W(s) = \frac{G_{D\max}}{N_{r\max}} \frac{T_{II} s + 1}{\alpha T_{II} s + 1}, \quad (12.32)$$

где  $T_{II} = 0,95 \frac{\bar{m}_{пп}}{G_D}$  - постоянная времени;

$$\alpha = \Delta H_1 / \Delta H;$$

$\Delta H_1, \Delta H$  - эффективный теплоперепад в части высокого давления и суммарный для обеих частей турбины соответственно ( $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$ ).

Как видно, свойства турбогенератора по этому каналу соответствуют свойствам интегродифференцирующего звена. Для удобства дальнейшего

моделирования представим такое звено в виде суммы передаточных функций пропорционального и апериодического звеньев:

$$\begin{aligned}
 W(s) &= \frac{G_{D\max}}{N_{Г\max}} \frac{T_{\Pi}S + 1 + 1/\alpha - 1/\alpha}{\alpha T_{\Pi}S + 1} = \\
 &= \frac{G_{D\max}}{N_{Г\max}} \left( \frac{T_{\Pi}S + 1/\alpha}{\alpha T_{\Pi}S + 1/\alpha} + \frac{1 - 1/\alpha}{T_{\Pi}S + 1/\alpha} \right) = \frac{G_{D\max}}{N_{Г\max}} \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{1 - 1/\alpha}{\alpha T_{\Pi}S + 1} \right), \\
 W(s) &= \frac{G_{D\max}}{N_{Г\max}} \left( K_3 + \frac{K_4}{\alpha T_{\Pi}S + 1} \right), \quad (12.33)
 \end{aligned}$$

где  $K_3 = 1/\alpha$ ;  $K_4 = 1 - 1/\alpha$ .

При колебаниях давления свежего пара расход пара через часть высокого давления турбины, работающей в энергосистеме, изменяется в соответствии с (12.25). Однако мощность генератора у турбин с промперегревом не пропорциональна расходу свежего пара, а определяется по (12.32) или (12.33), причем входной величиной служит расход пара  $G_D$ , а выходной - мощность генератора  $N_G$ .

С учетом того, что расход и давление свежего пара связаны выражением (12.13), а именно:

$$\Delta G_D = \frac{\bar{G}_D}{P_T} \Delta P_T,$$

а также с учетом (12.31) получаем передаточную функцию по каналу "давление пара  $P_T$  - мощность генератора  $N_G$ ":

$$W(s) = \frac{\bar{N}_G}{P_T} \frac{\alpha T_{\Pi}S + 1}{T_{\Pi}S + 1}. \quad (12.34)$$

Для части низкого давления (ЧНД) по каналу "мощность генератора  $N_G$  - расход пара  $G_D$ " воспользуемся передаточной функцией (12.21), т.е.

$$W(s) = \frac{G_{D\max}^{\text{ЧНД}}}{N_{Г\max}^{\text{ЧНД}}} \frac{1}{\delta_X T_a + 1},$$

где  $G_{D\max}^{\text{ЧНД}}$  - расход пара для ЧНД;

$N_{Г\max}^{\text{ЧНД}}$  - часть мощности генератора за счет ЧНД.

Тогда передаточную функцию всей турбины по каналу  $N_G - G_D$  можно представить последовательным соединением двух передаточных функций (12.32) и (12.35).

## 13. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

### 13.1. Математическое описание динамики реактора «нулевой» мощности

Под понятием реактора “нулевой” мощности (холодный, элементарный, простейший реактор) понимается реактор, который не вырабатывает тепловой мощности, т.е. изменение плотности потока нейтронов в таком реакторе не приводит к заметным отклонениям температуры ядерного топлива от исходного значения и во всех режимах плотность потока нейтронов недостаточна для получения ощутимого энерговыделения. Задача математического описания реактора - найти связь между плотностью нейтронов и реактивностью. Нестационарные процессы размножения нейтронов имеют место при пуске, регулировании мощности и остановке реактора. Вследствие того, что мощность реактора пропорциональна средней плотности тепловых нейтронов и числу ядер делящихся нуклидов в активной зоне, которое можно считать постоянным во время коротких переходных процессов, при изучении кинетики реактора в одинаковой степени используются и понятие плотности нейтронов  $N$  (или плотности потока нейтронов  $\Phi = Nv$ ), и понятие мощности реактора, т.е. везде в дальнейшем считается, что указанные три величины изменяются во времени одинаково.

В общем случае плотность нейтронов в реакторе зависит от пространственных координат, энергии нейтронов и времени. В инженерной практике для упрощения математического описания кинетики реактора пользуются так называемой точечной моделью (не учитывается пространственная распределенность параметров), а также одnogрупповым приближением спектра нейтронов.

#### 13.1.1. Элементарное уравнение кинетики реактора без запаздывающих нейтронов

Рассмотрим процесс изменения плотности нейтронов во времени при наличии возмущения по реактивности.

Если  $N_1$  и  $N_2$  - плотность нейтронов двух последующих поколений, то приращение плотности при смене этих поколений

$$\Delta N = N_2 - N_1.$$

Введем понятие эффективного коэффициента размножения реактора  $k$ , под которым будем понимать отношение числа нейтронов деления данного поколения к числу нейтронов деления предыдущего поколения.

С учетом определения коэффициента размножения  $k$  имеем

$$N_2 = k N_1.$$

откуда 
$$\Delta N = (k-1) N_1 \quad (13.1)$$

С другой стороны, так как приращение  $\Delta N$  происходит за время жизни  $l$ , можно записать

$$\Delta N = l(dN/dt), \quad (13.2)$$

где  $dN/dt$  - скорость изменения плотности нейтронов.

Подставив (13.2) в (13.1), получим

$$l(dN/dt) = (k-1) N_1.$$

Это соотношение верно по отношению к нейтронам любого поколения, индекс при  $N_1$  можно опустить и тогда

$$l(dN/dt) = (k-1) N = \rho N, \quad (13.3)$$

где  $\rho = k-1$  - реактивность реактора,

либо 
$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho}{l} N. \quad (13.4)$$

Из (13.4) видно, что стационарный режим в реакторе, т.е.  $((dN/dt)=0)$ , может быть только при  $\rho=0$ .

Таким образом, реактор по каналу реактивность " $\rho$  - плотность нейтронов является астатическим, нейтральным объектом.

При скачкообразном изменении реактивности  $\rho$  решение (13.4) дает

$$N(t) = N_0 \exp[(\rho/l)t], \quad (13.5)$$

где  $N_0$  - значение плотности нейтронов при  $t=0$ .

Выражение (13.5) можно записать в виде

$$N(t) = N_0 \exp[t/T], \quad (13.6)$$

где  $T = l/\rho$  - период реактора, (13.7)

т.е. время, в течение которого мощность реактора изменяется в  $e$  раз при постоянном значении возмущения  $\rho$ .

Полученная зависимость (13.5) свидетельствует о том, что при скачкообразном изменении реактивности от исходного нулевого значения плотность нейтронов (а также мощность) изменяется по экспоненциальному закону, как показано на рис.13.1. Следует отметить, что относительное значение плотности нейтронов  $N/N_0$  не зависит от начального уровня  $N_0$  и определяется только величиной реактивности  $\rho$  и временем  $t$ .

Следует также отметить, что приведенное выражение для периода справедливо только для экспоненциального изменения плотности нейтронов. Более общим понятием периода является выражение

$$T = \left( \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \right)^{-1}. \quad (13.8)$$

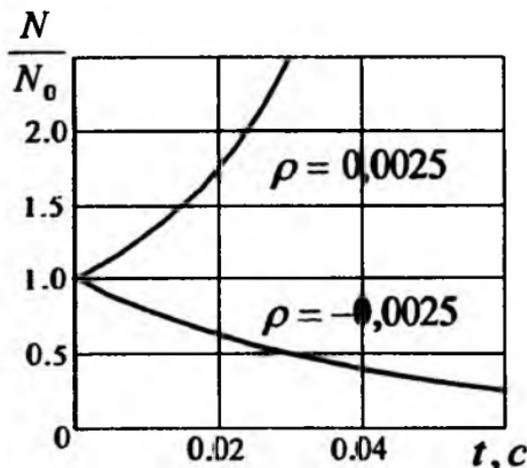


Рис. 13.1. Кривые разгона реактора без учета запаздывающих нейтронов

На практике чаще пользуются понятием периода удвоения мощности  $T_2$ , представляющего собой время, в течение которого мощность реактора увеличивается в два раза при постоянном значении реактивности  $\rho$ . Связь между  $T_2$  и  $T$  такова:

$$T_2 = 0,693 T.$$

Период - очень важная эксплуатационная характеристика реактора.

Обратная периоду величина  $1/T$  характеризует скорость разгона реактора. В критическом состоянии ( $\rho = 0$ ) период бесконечен, что соответствует постоянству плотности потока нейтронов, т.е. постоянству мощности реактора.

Рассчитаем значение периода для заданной реактивности  $\rho$ .

Примем  $\rho = 0,0001$  при  $l = 10^{-4}$  с, тогда из (13.7) получаем величину периода

$$T = \frac{l}{\rho} = \frac{10^{-4}}{10^{-4}} = 1 \text{ с.}$$

При таком малом периоде плотность нейтронов в реакторе, например за 5 с, возрастает в 140 раз.

Действительный период в таком реакторе будет гораздо больше, поскольку при выводе уравнения (13.4) не учтены запаздывающие нейтроны.

### 13.1.2. Кинетика реактора с учетом запаздывающих нейтронов

При реакции деления не все нейтроны выделяются мгновенно. Небольшая их доля (около 0,7% для  $^{235}\text{U}$ ) выделяется не непосредственно в момент деления, а спустя некоторое время из осколков разделившегося исходного ядра. С учетом сказанного уравнение (13.1.) следует записать в виде

$$N = (\kappa - \beta) N_1 - N_1 + l S_3 = (\rho - \beta) N_1 + l S_3,$$

где  $\beta$  - доля запаздывающих нейтронов;

$S_3$  - среднее число запаздывающих нейтронов, появляющихся в единице объема реактора за 1 с.

С учетом (13.2.) и, опуская индекс при  $N$ , получаем

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} N + S_3. \quad (13.9)$$

Число образующихся запаздывающих нейтронов подчиняется закону радиоактивного распада (интенсивность распада прямо пропорциональна количеству осколков и постоянной распада  $\lambda$ ). Если обозначить через  $C$  среднюю концентрацию осколков, выделяющих нейтроны, то число запаздывающих нейтронов, образующихся в единице объема реактора,

$$S_3 = \lambda C.$$

Поскольку имеется шесть групп запаздывающих нейтронов, то общий выход запаздывающих нейтронов

$$S_3 = \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i, \quad (13.10)$$

где  $\lambda_i$ ,  $C_i$  - постоянная распада и концентрация осколков  $i$ -й группы.

С учетом (13.10) уравнение (13.9) примет вид

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} N + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i. \quad (13.11)$$

Определим значение  $C_i$ . За время жизни каждого поколения нейтронов в единице объема образуется  $N\beta_i$  осколков  $i$ -й группы. За то же время распадается  $l\lambda_i C_i$  осколков.

Следовательно,

$$C_i = l(dC_i/dt) = N\beta_i - \lambda_i C_i \quad (13.12)$$

Уравнение (13.12) записывается для каждой группы запаздывающих нейтронов.

Таким образом, уравнения (13.11) и (13.12) составляют систему уравнений кинетики реактора:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\ell} N + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_1}{dt} &= \frac{\beta_1}{\ell} N - \lambda_1 C_1 \\ \frac{dC_6}{dt} &= \frac{\beta_6}{\ell} N - \lambda_6 C_6 \end{aligned} \right\} \quad (13.13)$$

Эти уравнения являются основой для изучения поведения реактора в нестационарных режимах.

При выводе уравнений (13.4) и (13.13) не учитывалось наличие в реакторе начального источника нейтронов ввиду его малой удельной мощности по сравнению с плотностью нейтронов в активной зоне при регулировании мощности реактора.

Рассмотрим стационарный режим работы реактора. При этом

$$dN/dt = 0, \quad dC_i/dt = 0.$$

Из системы (13.13) получаем

$$\lambda_1 C_{10} = \frac{\beta_1}{\ell} N_0$$

$$\lambda_6 C_{60} = \frac{\beta_6}{\ell} N_0$$

С учетом того, что  $\sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta$ , имеем

$$\sum_{i=1}^6 \lambda_i C_{i0} = \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\ell} N_0 = \frac{\beta}{\ell} N_0. \quad (13.14)$$

Подставляя (13.14) в первое уравнение системы (13.13), получаем

$$0 = \frac{\rho}{\ell} N_0,$$

т.е. стационарный режим может быть достигнут при любой начальной плотности нейтронов  $N_0$ , но обязательно при нулевой реактивности. Для

Вывода реактора с одного уровня мощности на другой необходимо изменить реактивность и, после достижения нового уровня мощности, снова обеспечить нулевую реактивность. Для этой цели в реакторе имеются органы регулирования (обычно поглощающие стержни или борная кислота, вводимая в реактор в виде носителя).

Следует обратить внимание на то, что система (13.13) является нелинейной, так как содержит произведение выходной и входной величин ( $\rho N$ ). При исследовании малых отклонений плотности нейтронов возможно линеаризация системы путем линеаризации уравнений.

### 13.1.3. Передаточная функция и частотные характеристики реактора

Для вывода передаточной функции реактора по каналу "реактивность - плотность нейтронов  $N$ " воспользуемся системой уравнений кинетики реактора (13.13):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\ell} N + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\ell} N - \lambda_i C_i \end{aligned} \right\} \quad (13.15)$$

Поскольку  $\sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta$ , перепишем 1-е уравнение системы (13.15) в виде

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho}{\ell} N - \frac{\sum_{i=1}^6 \beta_i}{\ell} N + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i. \quad (13.16)$$

Из 2-го уравнения системы (13.15) имеем

$$\sum_{i=1}^6 \frac{dC_i}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^6 \beta_i}{\ell} N - \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i. \quad (13.17)$$

Подставив (13.17) в (13.16), получаем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \frac{\rho}{\ell} N - \sum_{i=1}^6 \frac{dC_i}{dt} \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\ell} N - \lambda_i C_i \end{aligned} \right\} \quad (13.18)$$

Для линеаризации нелинейных уравнений представим переменные  $N$ ,  $C_i$ ,  $\rho$  в виде суммы установившихся значений (с черточкой) и приращений:

$$\begin{aligned}
 N &= \bar{N} + \Delta N \\
 C_i &= \bar{C}_i + \Delta C_i \\
 \rho &= 0 + \Delta \rho
 \end{aligned}$$

Подставив значения этих переменных в (13.18), получим

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\Delta N}{dt} &= \frac{\bar{N}}{l} \Delta \rho + \frac{\Delta \rho}{l} \Delta N - \sum_{i=1}^6 \frac{d\Delta C_i}{dt} \\
 \frac{d\Delta C_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{l} \bar{N} + \frac{\beta_i}{l} \Delta N - \lambda_i \bar{C}_i - \lambda_i \Delta C_i
 \end{aligned} \right\} \quad (13.19)$$

Поскольку для установившегося состояния  $\beta_i \bar{N} / l = \lambda_i \bar{C}_i$ , а  $\Delta \rho \Delta N / l$  величина второго порядка малости, систему уравнений можно переписать так:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\Delta N}{dt} &= \frac{\bar{N}}{\ell} \Delta \rho - \sum_{i=1}^6 \frac{d\Delta C_i}{dt} \\
 \frac{d\Delta C_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\ell} \Delta N - \lambda_i \Delta C_i
 \end{aligned} \right\} \quad (13.20)$$

Дифференциальные уравнения (13.20) являются линейными и содержат только постоянные коэффициенты.

Для получения передаточной функции реактора запишем уравнения (13.20) в изображениях по Лапласу (с учетом того, что при этом система находилась в стационарном состоянии):

$$\left. \begin{aligned}
 S\Delta N(s) &= \frac{\bar{N}}{\ell} \Delta \rho(s) - S \sum_{i=1}^6 \Delta C_i(s) \\
 S\Delta C_i(s) &= \frac{\beta_i}{\rho} \Delta N(s) - \lambda_i \Delta C_i(s)
 \end{aligned} \right\} \quad (13.21)$$

Из 2-го уравнения системы имеем

$$\Delta C_i(s) = \frac{\beta_i}{\ell(s + \lambda_i)} \Delta N(s)$$

Найдем сумму:

$$\sum_{i=1}^6 \Delta C_i(s) = \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\ell(s + \lambda_i)} \Delta N(s)$$

Подставив это значение в 1-е уравнение системы (13.21)

$$S\Delta N(s) = \frac{\bar{N}}{\ell} \Delta \rho(s) - S \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\ell(s + \lambda_i)} \Delta N(s)$$

получим передаточную функцию реактора по каналу "реактивность - плотность нейтронов"

$$W(s) = \frac{\Delta N(s)}{\Delta \rho(s)} = \frac{\bar{N}/\ell}{S \left[ 1 + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\ell(s + \lambda_i)} \right]}, \quad (13.22)$$

или

$$W(s) = \frac{\bar{N}/\ell}{S \left[ 1 + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\ell \lambda_i (1/\lambda_i + 1)} \right]}. \quad (13.23)$$

Вводя обозначения в выражение (13.23)

$$K_i = \frac{\beta_i}{\ell \lambda_i}; \quad T_i = \frac{1}{\lambda_i},$$

получим

$$W(s) = \frac{\bar{N}/\ell}{S \left[ 1 + \sum_{i=1}^6 \frac{K_i}{T_i S + 1} \right]}. \quad (13.24)$$

Таким образом, реактор представляет собой астатическое динамическое звено 7-го порядка. Выражение  $\bar{N}/\ell$  представляет собой коэффициент передачи реактора, как видно, он зависит от уровня мощности  $\bar{N}$ , что неудобно при расчетах системы регулирования мощности реактора. Эта зависимость учитывается в задачке регулятора мощности.

По передаточной функции (13.24) нетрудно построить структурную схему реактора на тепловых нейтронах (рис.13.2).

Если выходом системы считать не абсолютное, а относительное изменение плотности  $\Delta N/\bar{N} = n$ , то передаточная функция (13.24) запишется в виде

$$W(s) = \frac{1}{\ell S \left[ 1 + \sum_{i=1}^6 \frac{K_i}{T_i S + 1} \right]}. \quad (13.25)$$

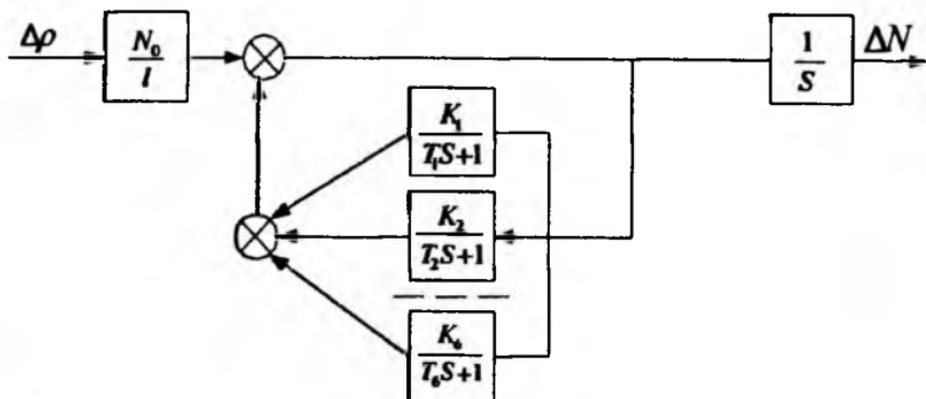


Рис. 13.2. Структурная схема реактора "нулевой" мощности

Частотные характеристики реактора могут быть получены из (13.22) путем замены  $S$  на  $j\omega$  (с учетом относительной плотности нейтронов на выходе):

$$W(j\omega) = \frac{1}{j\omega + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i j\omega}{j\omega + \lambda_i}} \quad (13.26)$$

Анализ выражения (13.26) показывает, что существует три характерные области частот с существенно различным поведением частотных характеристик реактора.

При малых частотах ( $\omega < \lambda_{\min} = 0,012 \text{ с}^{-1}$ ) выражение (13.26) можно записать в виде

$$W(j\omega) \cong \frac{1}{j\omega \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{T_u j\omega}, \quad (13.27)$$

где  $T_u = \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i}$ .

Таким образом, при малых частотах реактор имеет частотную характеристику, близкую к характеристике интегрирующего звена с постоянной времени  $T_u$  (для  $^{235}\text{U}$   $T_u = 8,3 \times 10^{-2} \text{ с}$ ), сдвиг фаз равен  $\pi/2$ .

В области средних частот ( $\lambda_{\min} < \omega < 1/l$ ), принимая, что  $j\omega + \lambda_i \approx j\omega$ , а

$l j\omega \ll \sum_{i=1}^6 \beta_i$ , получаем

$$W(j\omega) \cong \frac{1}{\sum_{i=1}^6 \beta_i} = \frac{1}{\beta}, \quad (13.28)$$

е. в области средних частот характеристика эквивалентна характеристике пропорционального звена с коэффициентом передачи  $1/\beta$ .

В области высоких частот ( $\omega > \lambda_{\max}$ ) выражение (13.26) можно записать в виде

$$W(j\omega) = \frac{1}{e^{j\omega} + \sum_{i=1}^6 \beta_i} = \frac{1/\beta_i}{(e/\beta)j\omega + 1}, \quad (13.29)$$

что соответствует характеристике инерционного звена 1-го порядка с постоянной времени  $l/\beta$ .

Как следует из (13.27) и (13.28), при низких и средних частотах вид типичных характеристик не зависит от времени жизни мгновенных нейтронов. На более высоких частотах влияние  $l$  становится заметным. Амплитудно-фазовая, фазочастотная и амплитудно-фазовая характеристики реактора (с учетом запаздывающих нейтронов) показаны на рис. 13.3.

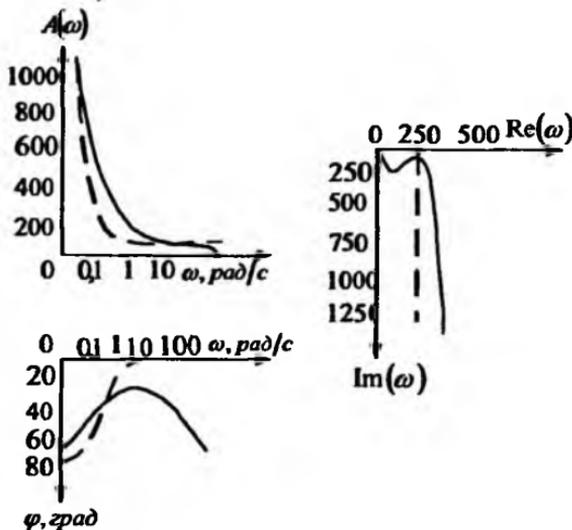


Рис. 13.3. Частотные характеристики реактора “нулевой” мощности

### 13.1.4. Кривые разгона реактора

Рассмотрим поведение реактора, описываемого уравнениями (13.13), при скачкообразном изменении реактивности  $\rho$ . Напомним, что при отсутствии запаздывающих нейтронов такое возмущение приводило к экспоненциальному изменению мощности с периодом  $T=1/\rho$ .

Пусть при  $t < 0$  реактор находился в стационарном состоянии, при котором

$$\rho = 0; \quad N(t) = \bar{N}, \quad \bar{C}_i = \frac{\beta_i \bar{N}}{\lambda_i}.$$

Так как при  $t > 0$  величина  $\rho$  постоянна, уравнения системы (13.13) линейны и могут быть решены операторным методом. Соответствующие преобразования были проведены при выводе передаточной функции реактора (13.22).

Характеристическое уравнение системы

$$s^6 + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} - \rho = 0. \quad (13.30)$$

Для шести групп запаздывающих нейтронов уравнение (13.30) является уравнением 7-го порядка и, следовательно, имеет семь корней.

Решение уравнений кинетики ищется в форме

$$N(t) = \bar{N} \sum_{j=1}^7 A_j e^{P_j t}, \quad (13.31)$$

где  $P_j$  - корни характеристического уравнения;

$A_j$  - коэффициенты, определяемые начальными условиями.

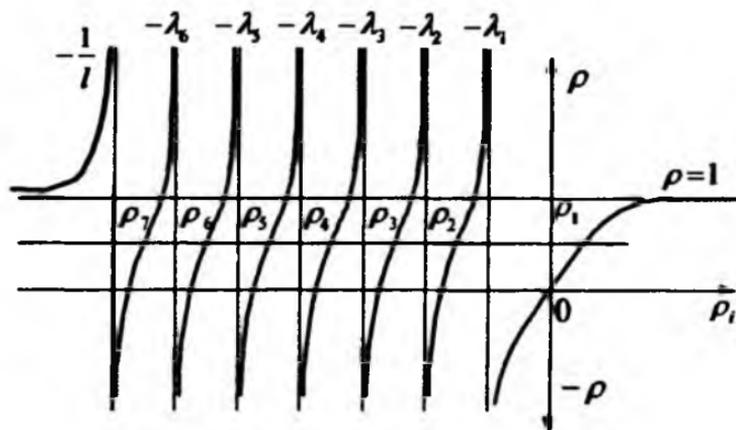


Рис. 13.4. Зависимость корней характеристического уравнения от реактивности

В отличие от обычно рассматриваемых в теории регулирования линейных систем, корни характеристических уравнений которых не зависят от величины входного возмущения, корни (13.30) зависят от  $\rho$ . Можно показать, что уравнение (13.30) имеет шесть отрицательных корней ( $P_2, \dots, P_7$ ), а знак первого (максимального) корня  $P_1$  совпадает со знаком  $\rho$ . Значения шести отрицательных корней всегда заключены в интервале  $-1/l, -\lambda_{\min}$  и имеют вертикальные асимптоты при  $P = -1/l$  и  $P = -\lambda_i$  (рис. 13.4). Поскольку  $P_1$  является наибольшим корнем (по модулю наименьшим), то экспоненты с другими показателями в (13.31) относительно быстро затухают и поведение реактора описывается соотношением

$$N(t) = \bar{N} A_1 e^{t/T_1}, \quad (13.32)$$

где  $T_1 = 1/P_1$ .

Сопоставив (13.32) с решением элементарного уравнения кинетики (13.5) и (13.6), можно заключить, что параметр  $T_1$  имеет смысл периода реактора. А поскольку  $T_1$  определяет темп изменения плотности нейтронов после установления чисто экспоненциальной зависимости  $N=f(\rho, t)$ , этот параметр называют обычно установившимся периодом реактора  $T_u$ . В отличие от  $T_u$  все остальные параметры  $T_2 \dots T_7$  называются переходными периодами реактора.

Кривые разгона для относительной плотности нейтронов  $N/\bar{N}$  при различном скачке реактивности показаны на рис.13.5.

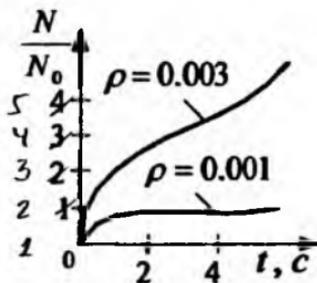


Рис. 13.5. Кривая разгона реактора при  $\rho > 0$

Сначала происходит скачок плотности нейтронов главным образом на мгновенных нейтронах (поскольку среднее время жизни запаздывающих нейтронов 13 с), а затем, если  $\rho < \beta$ , скорость роста плотности нейтронов снижается и устанавливается постоянный период.

Быстрый начальный рост плотности нейтронов обусловлен тем, что скорость генерации запаздывающих нейтронов в каждый момент времени

зависит от предшествующего ему поведения функции  $N(t)$ . В течение короткого промежутка времени после ступенчатого изменения реактивности скорость генерации запаздывающих нейтронов все еще определяется постоянным уровнем плотности нейтронов  $\bar{N}$ , и эта скорость вначале достаточна для поддержания быстрого роста  $N(t)$ . Как только плотность нейтронов заметно увеличивается, скорость ее дальнейшего роста резко снижается из-за того, что скорость генерации запаздывающих нейтронов еще почти не изменилась. Происходит саморегулирование цепной реакции до тех пор, пока функции  $N(t)$  и  $C_i(t)$  не будут возрастать по одному и тому же экспоненциальному закону. При этом скорость возрастания нейтронов оказывается значительно меньше (а период больше) скорости, которая имела бы место, если бы все нейтроны были мгновенными.

Начальный скачок плотности нейтронов можно приближенно оценить по формуле

$$\Delta N = \bar{N} \frac{\rho}{\beta - \rho}. \quad (13.33)$$

Время быстрого нарастания плотности нейтронов приближенно оценивается выражением  $1/(\beta - \rho)$ .

Описанный характер переходного процесса имеет место при  $\rho \ll \beta$ .

Рассмотрим протекание переходных процессов в реакторе при  $\rho > \beta$ .

В первом уравнении (13.13) можно принять с некоторым запасом (в сторону уменьшения скорости разгона)  $\sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i = 0$ , т.е. при разгоне пренебречь запаздывающими нейтронами. Тогда это уравнение примет вид

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell},$$

$$N = \bar{N} e^{t/T},$$

откуда

$$\text{где } T = \frac{\rho - \beta}{\ell}.$$

Таким образом, если  $\rho$  превышает  $\beta$  даже на небольшое значение, разгон реактора будет происходить с очень короткими периодами, что представляет аварийную ситуацию. Реактор, у которого  $\rho > \beta$ , называется критичным на мгновенных нейтронах.

Этот факт учитывают при проектировании органов управления реактором.

Из уравнений кинетики после некоторых преобразований можно получить так называемое уравнение "обратных часов", связывающее реактивность  $\rho$  с

установившимся периодом реактора  $T_y$  :

$$\rho = \frac{\ell}{k T_y} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T_y} \quad (13.34)$$

Получило оно такое название потому, что ранее применялась единица реактивности “обратный час”, соответствующая установившемуся периоду реактора, равному 1 ч (для реактора с урановым топливом  $\rho_{об.ч} = 2,4 \times 10^{-5}$ ).

Большая практическая значимость уравнения “обратных часов” заключается в том, что оно позволяет вычислить реактивность по измеренному установившемуся периоду и решать обратную задачу - по заданной реактивности определять установившийся период (особенно при  $\rho > 0$ ). Для  $\beta = 0,0064$  связь между  $\rho$ , периодом  $T$  и временем удвоения мощности  $T_2$  представлена в табл. 13.1 (для реактора бесконечных размеров).

Таблица 13.1  
Взаимосвязь реактивности, периода и периода удвоения мощности реактора

$\rho \times 10^{-3}$	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
$T_y, c$	81,8	55,0	39,3	29,2	22,3	17,3	13,7	10,9	8,7	7,0
$T_2, c$	56,7	38,1	27,2	20,2	15,5	12,0	9,5	7,6	6,0	4,9

Для каждого реактора можно построить графическую или табличную зависимость  $T_y = f(\rho)$  или  $T_2 = f(\rho)$ . Для определения высвобожденной реактивности с использованием такой зависимости следует измерить с помощью секундомера время удвоения показаний прибора контроля мощности, а затем по графику или таблице найти соответствующую реактивность.

Рассмотрим поведение реактора при возмущении отрицательной реактивностью ( $\rho < 0$ ). При этом все корни уравнения (13.31) отрицательны, а коэффициенты  $A_j$  - положительны.

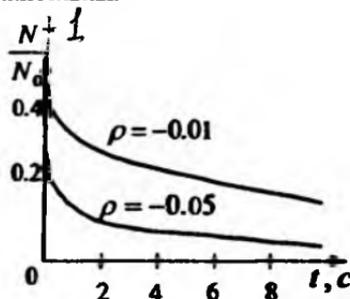


Рис. 13.6. Кривая разгона реактора при  $\rho < 0$

Кривая разгона изображена на рис.13.6. При скачкообразном введении отрицательной реактивности в первую очередь резко уменьшается плотность мгновенных нейтронов, в то время как плотность запаздывающих нейтронов изменяется незначительно, а скорость их генерации определяется относительно высокой концентрацией ядер-предшественников, образовавшихся до внесения возмущения. При этом запаздывающие нейтроны тормозят темп снижения суммарной плотности нейтронов. Примерно через 160 с после нанесения возмущения темп снижения относительной плотности нейтронов определяется скоростью уменьшения плотности запаздывающих нейтронов, генерируемых наиболее долгоживущими ядрами-предшественниками первой группы. Поскольку постоянная распада этих ядер  $\lambda_1 = 0,0124 \text{ с}^{-1}$ , то установившийся период составляет  $T_y = 1/\lambda_1 = 80,6 \text{ с}$ . Причем снижение плотности нейтронов с установившимся периодом менее 80,6 с ни при каких отрицательных реактивностях невозможно.

Начальный отрицательный скачок плотности нейтронов определяется величиной возмущения по реактивности и может быть оценен по (13.33). Легко убедиться, что при одинаковых по абсолютной величине, но различных по знакам возмущениях по реактивности начальный скачок относительной плотности нейтронов больше при  $\rho > 0$ . Таким образом, реактор является нелинейным объектом.

### 13.1.5. Методы упрощений уравнений кинетики реактора

Решение уравнений кинетики с учетом всех групп запаздывающих нейтронов является довольно громоздким и выполняется с помощью ЭВМ. Однако для оценочных расчетов переходных процессов в реакторе можно упростить уравнения кинетики, что облегчает решение уравнений без существенного ущерба для точности решения. Ниже рассмотрены два способа упрощения.

#### 13.1.5.1. Объединение запаздывающих нейтронов в одну средневзвешенную группу

Объединим запаздывающие нейтроны в одну средневзвешенную группу, для которой

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i; \quad \bar{\lambda} = \sum_{i=1}^6 \beta_i \lambda_i / \beta; \quad \bar{C} = \sum_{i=1}^6 C_i.$$

С учетом введенных усреднений система (13.13) дифференциальных уравнений седьмого порядка упрощается до системы второго порядка

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\ell} N + \bar{\lambda} \bar{C} \\ \frac{d\bar{C}}{dt} &= \frac{\beta}{\ell} N - \bar{\lambda} \bar{C} \end{aligned} \right\} \quad (13.35)$$

Решение этой системы при ступенчатом возмущении по реактивности представляет собой сумму двух экспонент

$$N(t) = A_1 \exp(P_1 t) + A_2 \exp(P_2 t),$$

где  $P_1, P_2$  - корни характеристического уравнения (13.30), которое для рассматриваемого случая превращается в квадратное.

После некоторых преобразований [2] получаем выражение для плотности нейтронов

$$N(t) = \bar{N} \left[ \frac{\beta}{\beta - \rho} \exp\left(\frac{\bar{\lambda} \rho}{\beta - \rho} t\right) - \frac{\rho}{\beta - \rho} \exp\left(-\frac{\beta - \rho}{\ell} t\right) \right]. \quad (13.36)$$

Наименьшие погрешности выражение (13.36) дает при очень малых ( $\rho \ll \beta$ ) и очень больших ( $\rho \gg \beta$ ) реактивностях.

Рассмотрим динамику реактора при  $\rho > 0$ . Примем следующие исходные значения переменных:  $\rho = 0,003$ ,  $\beta = 0,0064$ ,  $\lambda = 0,077 \text{ с}^{-1}$ , тогда из (13.36) получаем

$$N / \bar{N} = 1,88 \exp(0,07t) - 0,88 \exp(-3,4t).$$

Как видно из рис.13.7, сумма коэффициентов при экспонентах равна единице, первая экспонента возрастает, а вторая убывает. Вторая экспонента очень быстро убывает и через 1 с вклад ее становится пренебрежимо малым, поэтому можно записать из (13.36)

$$N / \bar{N} \cong \frac{\beta}{\beta - \rho} \exp\left(\frac{\lambda \rho}{\beta - \rho} t\right).$$

В этом случае установившийся период реактора

$$T_y = 14,7 \text{ с.}$$

Без учета запаздывающих нейтронов он составил бы  $T_y = l / \rho = 10^{-3} / 0,003 = 0,33 \text{ с}$ , что существенно меньше.



Рис. 13.7. Кривые разгона реактора при  $\rho > 0$  с учетом одной группы запаздывающих нейтронов

Рассмотрим динамику реактора при  $\rho < 0$ . При этом в соответствии с рис. 13.4 для корней характеристического уравнения оба корня являются отрицательными, поэтому обе экспоненты уменьшаются с течением времени.

Выражение для расчета плотности нейтронов

$$N(t) = \bar{N}(t) \left[ \frac{\beta}{\beta + |\rho|} \exp\left(-\frac{\lambda|\rho|}{\beta + |\rho|} t\right) + \frac{|\rho|}{\beta + |\rho|} \exp\left(-\frac{\beta + |\rho|}{\ell} t\right) \right]. \quad (13.37)$$

Если подставить те же численные значения, что и ранее, то получим

$$N(t) = 0,681 \exp(-0,025t) + 0,319 \exp(-9,4t).$$

Кривая разгона представлена графически на рис. 13.8. Видно, что вторая экспонента быстро убывает и в дальнейшем спад плотности потока нейтронов определяется первым слагаемым. Второе слагаемое показывает, на какую долю мощности  $(-\rho / \beta - \rho)$  реактор очень быстро разгружается при введении отрицательной реактивности, в рассмотренном случае на 32% ( $1 - 0,68 = 0,32$ ) с периодом  $T = 1 / \beta - \rho = 0,107$ .

После затухания второго члена скорость изменения плотности нейтронов резко уменьшается и соответствует

$$T_y = -\frac{\beta + |\rho|}{\lambda|\rho|} = \frac{-0,0064 + 0,003}{0,077 \cdot 0,003} = -40 \text{ с.}$$

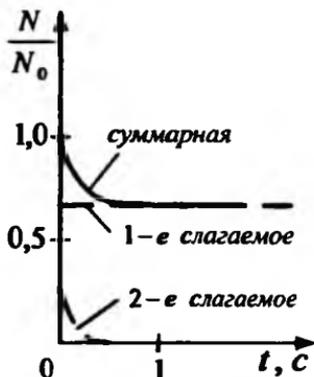


Рис. 13.8. Кривые разгона реактора при  $\rho < 0$  с учетом одной группы

Знак “-” указывает на спад плотности нейтронов.

Вспомним, что при той же положительной реактивности период был равен 14,7 с. Таким образом, влияние запаздывающих нейтронов на переходный процесс проявляется в большей степени при  $\rho < 0$ . Установившийся период определяется запаздывающими нейтронами.

Рассмотрим передаточную функцию реактора с одной группой запаздывающих нейтронов. Для этого воспользуемся выражением (13.22), полученным из линеаризованной системы (13.20) для шести групп запаздывающих нейтронов. Для одной группы запаздывающих нейтронов и для относительной плотности нейтронов  $N/\bar{N}$  получаем

$$W(s) = \frac{1}{S\left(\ell + \frac{\beta}{s + \bar{\lambda}}\right)} \quad (13.38)$$

Преобразуем эту передаточную функцию

$$W(s) = \frac{1}{\ell} \frac{s + \bar{\lambda}}{s(s + \bar{\lambda} + \beta/\ell)} = \frac{\bar{\lambda}}{(\bar{\lambda}\ell + \beta)} \frac{(1/\bar{\lambda})s + 1}{s[(\bar{\lambda} + \beta/\ell)s + 1]}$$

Учитывая, что

$$\frac{\bar{\lambda} + \beta}{\ell} = \frac{\ell}{\bar{\lambda}\ell + \beta} \approx \frac{\ell}{\beta},$$

последнее выражение можно переписать

$$W(s) = \frac{K(T_1 S + 1)}{S(T_2 S + 1)}, \quad (13.39)$$

где

$$K = \frac{\bar{\lambda}}{\beta} \quad (13.40)$$

$$T_1 = \frac{1}{\lambda} \quad (13.41)$$

$$T_2 = -\frac{l}{\beta} \quad (13.42)$$

Таким образом, динамика реактора описывается произведением передаточных функций интегрального и интегрирующего звеньев.

### 13.1.5.2. Пренебрежение временем жизни нейтронов и учет одной средневзвешенной группы запаздывающих нейтронов

Воспользуемся нелинейной системой уравнений (13.35)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\ell} N + \bar{\lambda} \bar{C} \\ \frac{d\bar{C}}{dt} &= \frac{\beta}{\ell} N - \bar{\lambda} \bar{C} \end{aligned} \right\}$$

Умножим левую и правую части обоих уравнений на время жизни нейтронов  $l$ . Для малых возмущений по реактивности ( $\rho < \beta$ ) и соответственно малых скоростях изменения плотности нейтронов величина  $l \, dN/dt$  мала по сравнению с членами в правой части уравнения, поэтому можно записать

$$\left. \begin{aligned} 0 &= (\rho - \beta)N + \bar{\lambda} \bar{C} \ell \\ \ell \frac{d\bar{C}}{dt} &= \beta N - \bar{\lambda} \bar{C} \end{aligned} \right\} \quad (13.43)$$

Из первого уравнения системы (13.43) имеем

$$\bar{\lambda} \bar{C} \ell = -(\rho - \beta)N. \quad (13.44)$$

Продифференцируем (13.44) по времени

$$\bar{\lambda} \frac{d\bar{C}}{dt} = -(\rho - \beta) \frac{dN}{dt} - N \frac{d\rho}{dt}.$$

Разделим все члены полученного уравнения на  $\lambda$ :

$$l \frac{d\bar{C}}{dt} = -\frac{1}{\lambda} \left[ (\rho - \beta) \frac{dN}{dt} - N \frac{d\rho}{dt} \right]. \quad (13.45)$$

Подставляя (13.44) и (13.45) во второе уравнение системы (13.43) и поменяв местами  $\rho$  и  $\beta$  в сомножителе в круглых скобках, получим

$$\frac{1}{\lambda}(\beta - \rho) \frac{dN}{dt} - \frac{N}{\lambda} \frac{d\rho}{dt} = \beta N + (\rho - \beta)N,$$

или

$$\frac{dN}{dt} = \frac{d\rho}{dt} \frac{N}{(\beta - \rho)} + \frac{\bar{\lambda}\rho N}{(\beta - \rho)}.$$

Представим  $N$  в виде  $N = \bar{N} + \Delta N$  и вынесем  $(\bar{N} + \Delta N)$  за скобки

$$\frac{d\Delta N}{dt} = \left( \frac{1}{\beta - \rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} + \frac{\bar{\lambda}\rho}{\beta - \rho} \right) (\bar{N} + \Delta N). \quad (13.46)$$

С учетом того, что  $\rho \ll \beta$  и  $\Delta N \ll \bar{N}$ , в правой части (13.46) можно записать

$$\bar{N} + \Delta N \approx \bar{N}; \quad \beta - \rho \approx \beta,$$

тогда (13.46) запишется так:

$$\frac{d\Delta N}{dt} = \frac{\bar{N}}{\beta} \left( \frac{d\rho}{dt} + \bar{\lambda}\rho \right). \quad (13.47)$$

Разделим обе части (13.47) на  $\bar{N}$ , тогда с учетом того, что  $\Delta N / \bar{N} = n$  — изменение относительной плотности нейтронов, получим

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\beta} \left( \frac{d\rho}{dt} + \bar{\lambda}\rho \right). \quad (13.48)$$

Таким образом, скорость изменения относительной плотности нейтронов пропорциональна возмущению по реактивности и скорости изменения реактивности. Для ступенчатого возмущения по  $\rho$  и для нулевых начальных условий кривая разгона реактора соответствует кривой разгона идеального ПИ-регулятора.

Для получения передаточной функции запишем (13.48) в изображениях по Лапласу:

$$Sn(s) = \frac{1}{\beta} (S\rho(s) + \bar{\lambda}\rho(s)),$$

$$Sn(s) = \frac{\rho(s)}{\beta} (S + \bar{\lambda}). \quad (13.49)$$

Тогда 
$$W(s) = \frac{n(s)}{\rho(s)} = \frac{1}{\beta} (1 + \bar{\lambda}S).$$

### 13.1.6. Моделирование уравнений кинетики реактора в инженерных расчетах

Кинетика реактора описывается системой семи нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка (13.13). Решение этой системы представляет определенные технические трудности. Для решения инженерных задач по автоматизации ядерных энергетических установок используют, как правило, упрощенные уравнения кинетики. Здесь приведены уравнения, удобные для моделирования на ЭВМ при произвольном возмущении по реактивности  $\rho$ .

Воспользуемся передаточной функцией реактора с учетом одной группы запаздывающих нейтронов (13.39) (с учетом (13.40)):

$$W(s) = \frac{\bar{\lambda} (T_1 S + 1)}{\beta S (T_2 S + 1)}.$$

Представим эту передаточную функцию в виде комбинации аperiодического и интегрального звеньев:

$$W(s) = \frac{\bar{\lambda} (T_1 S + 1)}{\beta S (T_2 S + 1)} = \frac{\bar{\lambda}}{\beta} \left( \frac{T_1}{T_2 S + 1} + \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{T_2 S + 1} \right).$$

Из (13.41) имеем  $T_1 = 1/\bar{\lambda}$ , тогда получаем

$$W(s) = \frac{1/\beta}{(T_2 S + 1)} + \frac{1}{T_3 S + 1} \cdot \frac{1}{T_2 S + 1}, \quad (13.50)$$

где  $T_3 = \frac{\beta}{\lambda}; \quad T_2 = \frac{\ell}{\beta}$ .

Полученной передаточной функции соответствует структурная схема рис. 13.9. Верхняя цепь описывает скачок на мгновенных нейтронах. Ее постоянная время определяется константой  $T_2 = \ell/\beta$  инерционного звена, а вклад в амплитуду выходного сигнала равен  $\Delta\rho/\beta$ . Нижняя цепь описывает поведение реактора под влиянием запаздывающих нейтронов. Константа  $T_3$  определяет установившийся период реактора.

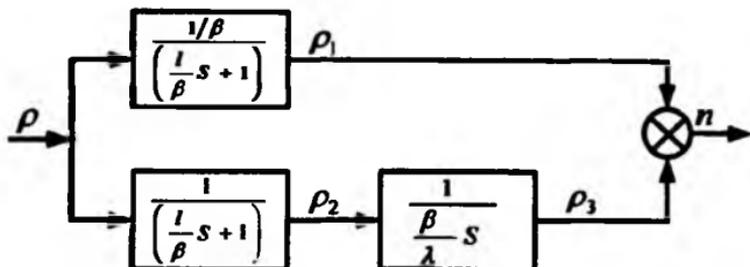


Рис. 13.9. Структурная схема передаточной функции (13.50)

Таким образом, кинетика реактора по передаточной функции (13.50) описывается следующей системой уравнений (с учетом уравнения сумматора):

$$\left. \begin{aligned} T_2 \frac{d\rho_1}{dt} + \rho_1 &= \frac{1}{\beta} \Delta\rho \\ T_2 \frac{d\rho_2}{dt} + \rho_2 &= \Delta\rho \\ \rho_3 &= \frac{1}{T_3} \int_0^t \rho_2 dt \\ n &= \rho_1 + \rho_3 \end{aligned} \right\} \quad (13.51)$$

В некоторых инженерных расчетах для моделирования кинетики реактора можно воспользоваться менее точным, но более простым уравнением (13.48)

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\beta} \left( \frac{d\rho}{dt} + \bar{\lambda} \rho \right).$$

В интегральной форме для нулевых начальных условий получаем

$$n = \frac{\rho}{\beta} + \frac{\bar{\lambda}}{\beta} \int_0^t \rho dt. \quad (13.52)$$

### 13.2. Математическое описание реактора, работающего в энергетическом диапазоне мощности

Поскольку основной задачей реактора является получение тепловой энергии, то нас интересует не столько плотность нейтронов, сколько значение энерговыделения. Кроме того, изменение мощности, а следовательно, температуры и других параметров приводит к изменению физических свойств реактора и соответственно реактивности. Таким образом, переходные процессы в реакторе, работающем в энергетическом диапазоне мощности, существенно отличаются от переходных процессов, рассмотренных ранее.

### 13.2.1. Распределение энерговыделения в реакторе

Энергия, освобождаемая в результате деления ядер, выделяется в следующей форме:

- кинетической энергии осколков деления;
- кинетической энергии нейтронов;
- энергии  $\gamma$ -квантов деления;
- энергии  $\beta$ -излучения;
- энергии  $\gamma$ -излучения продуктов деления;
- энергии  $\gamma$ -излучения, сопровождающего захват нейтронов;
- энергии нейтрино.

Каждая из этих форм характеризуется своим временным и пространственным распределением.

Кинетическая энергия осколков деления составляет основную долю тепловой энергии (85 %), выделяющейся при реакции деления. Эта энергия выделяется практически мгновенно при каждой реакции деления, а длина пробега осколков очень мала. Эта часть теплоты относится к локальному мгновенному энерговыделению. Около 2,6 % тепловой энергии выделяется при замедлении нейтронов деления. Энергия выделяется в основном в замедлителе. Запаздывание тепловыделения не превосходит времени жизни. Таким образом, это тепловыделение можно отнести к мгновенному рассеянному. Около 10 % энергии выделяется за счет  $\beta$  и  $\gamma$ -излучения осколков деления. Это излучение обладает относительно большой длиной пробега в реакторе, и теплота от него выделяется рассеянно. Часть теплоты от излучения (3,9 %) выделяется в момент деления (мгновенное), а часть (3,8 %) постепенно при радиоактивных превращениях осколков деления.  $\beta$ -частицы обладают малым пробегом в веществе, и теплота от них выделяется локально в ТВЭЛах, она почти полностью относится к постепенной. Виды тепловыделения в реакторе представлены в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Виды тепловыделения в реакторе

Вид тепловыделения по пространству	Вид тепловыделения по времени		
	Мгновенное	Постепенное	Полное
Локальное	Кинетическая энергия осколков 85 %; $\beta$ -излучение 0,7 %	$\beta$ -излучение 4,0 %	89,7 %
Рассеянное	Замедление нейтронов 2,6 %; $\gamma$ -излучение 3,9 %	$\gamma$ -излучение 3,8 %	10,3 %
Полное	92,2 %	7,8 %	100 %

При изучении малых отклонений мощности от стационарного состояния обычно предполагается, что вся теплота выделяется мгновенно, т.е. мощность в любой момент времени пропорциональна плотности нейтронов. Тогда

$$\Delta Q \approx \bar{Q} \frac{\Delta N}{N} = \bar{Q} n, \quad (13.53)$$

где  $\bar{Q}$  - тепловыделение в установившемся режиме.

Допускаемая при этом ошибка составляет менее 8 % (см. табл.13.2). Однако при расчете аварийных режимов, когда плотность нейтронов снижается практически до нуля, необходимо учитывать постепенное энерговыделение (оно называется остаточным). Временная зависимость остаточных энерговыделений трудно поддается аналитическому расчету, так как определяется взаимным превращением многих изотопов. Для реакторов типа ВВЭР можно пренебречь тепловыделением в воде-замедлителе и остаточное тепловыделение можно рассчитать по формуле

$$Q = (\epsilon_x^m + \epsilon_p^m) \bar{Q} \frac{N}{N} + (\epsilon_x^n + \epsilon_p^n) \bar{Q} q_n, \quad (13.54)$$

где  $q_n$  - относительная мощность постепенного тепловыделения;

$\epsilon_x^m, \epsilon_p^m$  - доли мгновенного локального и рассеянного тепловыделений;

$\epsilon_x^n, \epsilon_p^n$  - доли постепенного локального и рассеянного тепловыделений.

В соответствии с табл. 13.2 имеем

$$\epsilon_x^m = 0,857; \quad \epsilon_p^m = 0,065; \quad \epsilon_x^n = 0,04; \quad \epsilon_p^n = 0,038.$$

Зависимость  $q_n$  от времени может быть найдена на основании экспериментальных данных. Для практических расчетов при  $t < 1000$  с можно считать, что  $q_n = q_{n1} + q_{n2} + q_{n3}$ , где  $q_{n1}, q_{n2}, q_{n3}$  находят из дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_1 \frac{dq_{n1}}{dt} + q_{n1} &= K_1 \frac{N}{N} \\ T_2 \frac{dq_{n2}}{dt} + q_{n2} &= K_2 \frac{N}{N} \\ T_3 \frac{dq_{n3}}{dt} + q_{n3} &= K_3 \frac{N}{N} \end{aligned} \right\} \quad (13.55)$$

Значения коэффициентов  $K_j$  и  $T_j$ :

$$K_1 = 0,05; \quad K_2 = 0,33; \quad K_3 = 0,62; \quad T_1 = 4,3; \quad T_2 = 33; \quad T_3 = 1900.$$

Если плотность нейтронов  $N$  меняется во времени, то величина  $q_{II}$  должна определяться решением системы (13.55). В случае, когда до момента  $t = 0$  плотность нейтронов длительное время поддерживалась на уровне  $\bar{N}$ , а затем скачком упала до нуля,

$$q_n = K_1 e^{-\lambda_1 t} + K_2 e^{-\lambda_2 t} + K_3 e^{-\lambda_3 t} \quad (13.56)$$

### 13.2.2. Изменение реактивности в нестационарных режимах

При работе реактора на мощности и изменении температуры происходит изменение эффективного коэффициента размножения. Это изменение вызвано следующими причинами :

- изменением изотопного состава топлива ;
- изменением ядерных сечений, связанных с изменением температуры ядер и температуры нейтронного газа ;
- изменением плотности веществ в реакторе ;
- изменением геометрических характеристик реактора.

Изменение изотопного состава топлива происходит непрерывно в результате взаимодействия его с нейтронами. В результате исходное ядерное топливо выгорает. Кроме того, в результате ядерных реакций образуются продукты деления, некоторые из них ( $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ) обладают большим сечением поглощения. Такие процессы называются отравлением. Накопление других продуктов деления - шлакованием.

Изменение изотопного состава топлива происходит во времени сравнительно медленно и приводит к медленному изменению реактивности. Поэтому изучение этих процессов входит не в задачу теории автоматического управления реакторами, а в задачу физического расчета, который должен учитывать снижение реактивности в процессе кампании реактора и предусматривать способы компенсации такого изменения.

Изменение температуры приводит к быстрому изменению реактивности. Этот процесс называется температурным эффектом реактивности.

Таким образом, реактор можно представить как динамическую систему с обратными связями (рис.13.10). Блок 1 в прямом канале характеризует динамику "холодного" реактора и описывается системой дифференциальных уравнений (13.13). Блок 2 обратных связей описывает изменение реактивности из-за температурного эффекта, отравления и др. Изменение плотности нейтронов определяется полной реактивностью  $\Delta\rho$ , которая является суммой внешней реактивности  $\rho_{вн}$  (вносимой, например, стержнями управления) и реактивности обратной связи  $\Delta\rho_{ос}$ . Рассмотрим эти обратные связи.

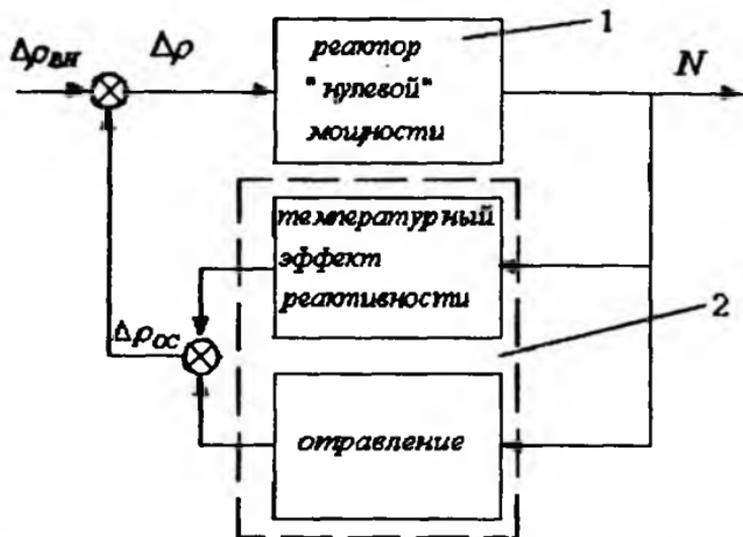


Рис. 13.10. Структурная схема реактора с учетом обратных связей

### 13.2.2.1. Температурный эффект реактивности

Коэффициент размножения изменяется при изменении температуры реактора по двум причинам: во-первых, в связи с изменением ядерных свойств и доплер-эффектом; во-вторых, в связи с изменением плотности материалов реактора.

Рассмотрим эти явления подробнее.

Изменение микроскопических сечений ядер при изменении температуры происходит из-за так называемого доплер-эффекта, который заключается в увеличении относительной скорости ядер и нейтронов при повышении температуры горючего, а также средней скорости замедленных нейтронов (нейтронного газа), которая в реакторах на тепловых нейтронах определяется, в основном, температурой замедлителя. В реакторах на тепловых нейтронах доплер-эффект отрицателен, т.е. повышение температуры ядер горючего приводит к уменьшению реактивности, что связано с увеличением захвата нейтронов (без деления) в  $^{238}\text{U}$ .

Плотностный эффект заключается в изменении микроскопических сечений вследствие изменения при нагревании плотности, т.е. числа атомов в  $1\text{ см}^3$ , всех материалов активной зоны.

Плотность веществ изменяется также при изменении давления (так называемый барометрический эффект реактивности).

Повышение температуры ведет к увеличению длины диффузии  $L$  и возраста нейтронов, что увеличивает утечку нейтронов в процессах замедления и диффузии.

С изменением температуры изменяются свойства отражателя, размеры элементов активной зоны, что также приводит к изменению коэффициента размножения и реактивности.

Таким образом, с увеличением температуры активной зоны изменение одних параметров приводит к увеличению реактивности, а изменение других - к ее уменьшению. В реальных гетерогенных реакторах температура различных материалов отличается друг от друга, а в переходных режимах изменяется с различными скоростями и со сдвигом во времени. Температура в ТВЭЛах изменяется при изменении мощности почти мгновенно, температура теплоносителя, замедлителя и отражателя - с некоторым запаздыванием. Поэтому поведение реактора в переходных процессах определяется, по сути, частными температурными коэффициентами реактивности по топливу, теплоносителю, замедлителю и отражателю. В связи с этим вводятся понятия:

температурный коэффициент реактивности по топливу (горючему)  $K_T$  - характеризует изменение реактивности при изменении средней температуры топлива на  $1^\circ\text{C}$ ;

температурный коэффициент реактивности по теплоносителю  $K_T$  - характеризует изменение реактивности при изменении температуры теплоносителя на  $1^\circ\text{C}$ . В общем случае для реактора  $K_T$  - сложная функция температуры теплоносителя и может быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от абсолютного значения температуры;

температурный коэффициент реактивности по замедлителю  $K_3$  - характеризует изменение реактивности при изменении средней температуры замедлителя на  $1^\circ\text{C}$ ;

температурный коэффициент реактивности по отражателю  $K_{от}$  - характеризует изменение реактивности при изменении температуры отражателя на  $1^\circ\text{C}$ .

Величина  $K_{от}$  обычно мала.

Общее изменение реактивности можно представить в виде суммы

$$\Delta\rho = K_T\Delta t_T + K_T\Delta t_T + K_3\Delta t_3, \quad (13.57)$$

где  $K_T, K_T, K_3$  - коэффициенты реактивности по горючему, теплоносителю и замедлителю;

$\Delta t_T, \Delta t_T, \Delta t_3$  - отклонение температур горючего, теплоносителя и замедлителя от соответствующих температур в номинальном стационарном режиме.

Если температуру теплоносителя можно измерить с достаточной точностью, то измерение температуры горючего и замедлителя в процессе работы реактора затруднено. В связи с этим преобразуем уравнение (13.57) следующим образом. Для установившегося режима можно принять

$$\left. \begin{aligned} t_r &= t_{T.BX} + K_r Q \\ t_3 &= t_{T.BX} + K_3 Q \\ t_T &= t_{T.BX} + K_T Q \end{aligned} \right\}, \quad (13.58)$$

где  $t_{T.BX}$  - температура теплоносителя на входе в реактор;

$Q$  - тепловая мощность реактора.

Для номинального режима уравнение (13.58) запишется в виде

$$\left. \begin{aligned} \bar{t}_r &= \bar{t}_{T.BX} + K_r \bar{Q} \\ \bar{t}_3 &= \bar{t}_{T.BX} + K_3 \bar{Q} \\ \bar{t}_T &= \bar{t}_{T.BX} + K_T \bar{Q} \end{aligned} \right\} \quad (13.59)$$

Подставив (13.58) и (13.59) в (13.57) с учетом того, что  $\Delta t_r = t_r - \bar{t}_r$ ,  $\Delta t_T = t_T - \bar{t}_T$  и  $\Delta t_3 = t_3 - \bar{t}_3$  получим

$$\Delta p = K_Q(Q - \bar{Q}) + K_{T.BX}(t_{T.BX} - \bar{t}_{T.BX}), \quad (13.60)$$

где  $K_{T.BX}$  - температурный коэффициент реактивности и численно равен изменению реактивности реактора при равномерном разогреве его на  $1^\circ\text{C}$  при постоянной мощности. (Выражается в  $1/^\circ\text{C}$  или  $\%/^\circ\text{C}$ ).

Коэффициент  $K_Q$  называется мощностным коэффициентом реактивности и численно равен изменению реактивности реактора при увеличении его мощности на единицу при постоянной входной температуре теплоносителя. ( $1/\text{МВт}$ ,  $\%/ \text{МВт}$  либо  $1/\%$ ). Однако следует иметь в виду, что выражение (13.60) справедливо только для установившихся режимов; в переходных режимах следует пользоваться выражением (13.11).

Температурным эффектом реактивности называют изменение реактивности при изменении эффективной температуры реактора. Температурный эффект зависит от типа реактора, мощности, температурного режима, он может быть как положительным, так и отрицательным.

Реакторы проектируют всегда таким образом, чтобы в области рабочих температур температурный эффект был отрицательным, в этом случае повышение температуры с ростом мощности приводит к уменьшению реактивности, т.е. реактор приобретает свойство саморегулирования, что повышает безопасность его эксплуатации.

Для регуляторов типа ВВЭР существенное влияние на суммарный температурный коэффициент реактивности  $K$  оказывает содержание борной кислоты в теплоносителе. При малых концентрациях он обычно отрицателен, с увеличением концентрации он уменьшается по абсолютному значению, а при больших концентрациях может стать положительным. Зависимость температурного коэффициента реактивности  $K_T$  от температуры теплоносителя

и концентрации борной кислоты в нем для реактора ВВЭР-440 показана на рис. 13.11. Для реактора ВВЭР-1000 в начале кампании и в холодном состоянии коэффициент  $K_T > 0$ .

Для реакторов ВВЭР суммарный температурный коэффициент реактивности находится в пределах  $(2+4)10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ , для уран-графитовых -  $(0,3\pm 0,6)10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ .

В реакторах типа РБМК температура теплоносителя равна температуре насыщения при данном давлении, поэтому основной вклад в изменение реактивности реактора вносит изменение плотности теплоносителя  $\rho_T$ , которая определяется соотношением объемов паровой и водяной фаз:

$$\Delta\rho = K_r\Delta t_r + K_T\Delta\rho_T + K_3\Delta\rho_3, \quad (13.61)$$

где  $\Delta\rho_T = \rho'(1-\varphi) + \rho''\varphi$ ,

где  $\rho', \rho''$  - плотность воды и пара на линии насыщения;

$\varphi$  - объемное паросодержание.

Этот эффект называется паровым эффектом реактивности. С увеличением паросодержания увеличивается утечка нейтронов. Для редких решеток паровой коэффициент реактивности может быть положительным вследствие влияния коэффициента использования тепловых нейтронов. И наоборот, в тесных решетках наибольшее влияние на реактивность оказывает коэффициент вероятности избежать резонансного поглощения, который дает отрицательный вклад при увеличении паросодержания. Для реакторов РБМК паровой эффект положительный, эффект от изменения давления теплоносителя положительный, от изменения температуры теплоносителя - также положительный. Естественно, что в целях безопасности кипящий реактор должен обладать отрицательным паровым эффектом реактивности.

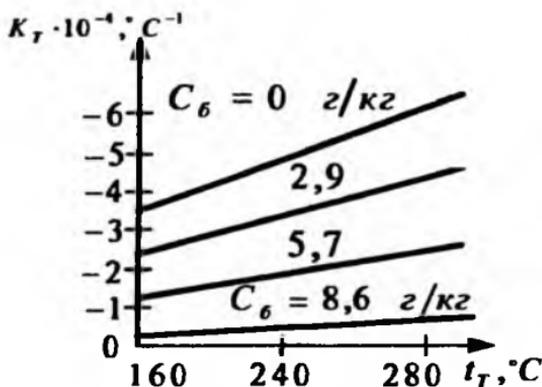


Рис. 13.11. Зависимость коэффициента реактивности  $K_T$  в реакторе ВВЭР-440 от температуры воды  $t_T$  при различных концентрациях борной кислоты  $C$

### 13.2.2.2. Отравление реактора

При работе и остановке ядерного реактора изотопный состав топлива ~~изменяется~~. Наиболее интенсивное изменение состава топлива происходит при ~~работе~~ реактора, когда велика плотность потока нейтронов и соответственно ~~высока~~ скорость нейтронных реакций. Изменение состава топлива после ~~остановки~~ вки реактора вызвано главным образом продолжающимися ядерными ~~процессами~~ накопившихся продуктов деления.

Изменения состава ядерного топлива сводятся, в основном, к процессам ~~выгорания~~, воспроизводства, шлакования и отравления топлива.

**Выгорание** - процесс уменьшения концентрации первоначально ~~введенного~~ в активную зону топлива (например,  $^{235}\text{U}$ ).

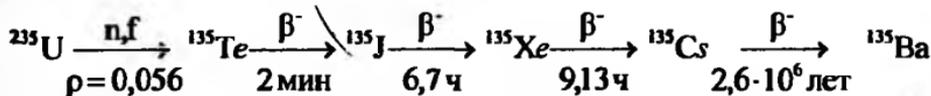
**Воспроизводство** - процесс образования вторичных делящихся веществ ~~например~~,  $^{239}\text{Pu}$ ).

**Шлакование** - процесс накопления в топливе стабильных и долгоживущих ~~продуктов~~, участвующих в непроизводительном захвате нейтронов.

**Отравление** - процесс накопления в топливе короткоживущих нуклидов, ~~также~~ участвующих в непроизводительном захвате нейтронов.

Процессы выгорания, воспроизводства и шлакования являются ~~важными~~ и длительными, поэтому они мало отражаются на процессе ~~регулирования~~ нейтронной мощности реактора, чего нельзя сказать об ~~отравлении~~. Поэтому далее рассмотрены только процессы отравления реактора.

Практически отравление топлива обусловлено накоплением лишь одного ~~продукта~~  $^{135}\text{Xe}$ , имеющего большое сечение захвата нейтронов. Небольшая часть  $^{135}\text{Xe}$  образуется при непосредственном делении топлива (всего 0,6%). Основная доля  $^{135}\text{Xe}$  образуется из  $^{135}\text{Te}$ , который является одним из осколков деления  $^{235}\text{U}$  с удельным выходом 6%. Цепочка радиоактивного распада с образованием  $^{135}\text{Xe}$  приведена ниже:



При  $\beta$ -распаде  $^{135}\text{Te}$  с периодом полураспада 120 с образуется  $^{135}\text{I}$ , последний при  $\beta$ -распаде (период полураспада 6,7 ч) дает  $^{135}\text{Xe}$ . Строго говоря, не весь  $^{135}\text{I}$  превращается в  $^{135}\text{Xe}$ , часть его выгорает. Но учитывая незначительное сечение захвата  $^{135}\text{I}$ , этим эффектом можно пренебречь. Убыль концентрации  $^{135}\text{Xe}$  происходит вследствие его радиоактивного распада (период полураспада (9,1 ч) с образованием изотопа  $^{135}\text{Cs}$ , а также вследствие поглощения нейтрона с образованием стабильного изотопа  $^{136}\text{Xe}$ . Конечный продукт цепочки распада - стабильный  $^{135}\text{Ba}$ .

Описанный процесс образования и выделения  $^{135}\text{Xe}$  может быть записан следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dX_e}{dt} = \lambda_J J + \gamma_{Xe} \sum_T \Phi - \lambda_{Xe} X_e - \delta_{Xe} \Phi X_e, \quad (13.62)$$

где  $\sum_T$  - макроскопическое сечение деления топлива;

$J, X_e$  - концентрация ядер  $J$  и  $X_e$  в топливе соответственно;

$\lambda_{Xe}, \lambda_J$  - постоянная распада ксенона и йода;

$\gamma_{Xe}$  - выход на одно деление;

$\Phi$  - поток тепловых нейтронов;

$\delta_{Xe}$  - микроскопическое сечение поглощения нейтронов изотопом  $^{135}\text{Xe}$ .

Аналогичное уравнение баланса ядер можно записать для  $^{135}\text{J}$ , при этом, учитывая малый период полураспада  $^{135}\text{Te}$  (120 с) по сравнению с периодом полураспада  $^{135}\text{J}$  (6,7 ч), можно считать, что образование йода происходит непосредственно при делении.

Тогда получаем

$$\frac{dJ}{dt} = \gamma_J \sum_T \Phi - \lambda_J J, \quad (13.63)$$

где  $\gamma_J$  - выход йода на одно деление.

Следует заметить, что для нейтронов высоких энергий сечение захвата  $^{135}\text{Xe}$  незначительно, поэтому в реакторах на быстрых нейтронах эффект отравления ядерного топлива вообще не учитывается.

Различают равновесное (стационарное) и максимальное отравление (йодная яма).

Состояние реактора, при котором концентрация  $^{135}\text{Xe}$  не изменяется во времени, называется стационарным отравлением.

При этом

$$\frac{dX_e}{dt} = \frac{dJ}{dt} = 0$$

$$\lambda_J \bar{J} + \gamma_{Xe} \sum_T \bar{\Phi} = (\lambda_{Xe} + \delta_{Xe} \bar{\Phi}) \bar{X}_e \quad (13.64)$$

$$\gamma_J \sum_T \bar{\Phi} = \lambda_J \bar{J}, \quad (13.65)$$

откуда концентрации  $^{135}\text{J}$  и  $^{135}\text{Xe}$  соответственно:

$$\bar{J} = \frac{\gamma_J \sum_T \bar{\Phi}}{\lambda_J}; \quad (13.66)$$

$$\bar{X}_{Xe} = \frac{\lambda_I \bar{J} + \gamma_{Xe} \sum_{\Gamma} \bar{\Phi}}{\lambda_{Xe} + \delta_{Xe} \bar{\Phi}} \quad (13.67)$$

Подставив в (13.67) выражение для  $\bar{J}$  из (13.66), получим

$$\bar{X}_{Xe} = \frac{(\gamma_I + \gamma_{Xe}) \sum_{\Gamma} \bar{\Phi}}{(\lambda_{Xe} + \delta_{Xe} \bar{\Phi})} \quad (13.68)$$

Поскольку мощность реактора пропорциональна произведению  $\sum_{\Gamma} \Phi$ , можно утверждать, что стационарная концентрация йода пропорциональна мощности реактора.

В отличие от йода, равновесная концентрация ксенона неоднозначно зависит от плотности потока нейтронов.

При малых  $\Phi$  концентрация  $\bar{X}_{Xe}$  пропорциональна  $\Phi$  и обогащению топлива. При большой плотности потока нейтронов равновесная концентрация ксенона не зависит от  $\Phi$  и определяется только обогащением урана.

Для количественной оценки отравления используют отношение

$$\rho_{Xe} = \frac{\sum_{\Gamma} X_{Xe}}{\sum_{\Gamma} \Phi} \quad (13.69)$$

либо потерю реактивности на отравление топлива

$$\rho_{Xe_{отр}} = (K_{эф}^{отр} - 1) / K_{эф}^{отр} \quad (13.70)$$

где  $K_{эф} < 1$  - эффективный коэффициент размножения отравленного реактора.

Предельная потеря реактивности на стационарное отравление составляет 5%.

Для ответа на вопрос о динамике достижения равновесной концентрации ксенона необходимо решить систему дифференциальных уравнений (13.62) и (13.63). Решение (13.63) при  $\Phi = 0$  и  $J = 0$  имеет вид

$$J(t) = \bar{J}(1 - e^{-\lambda_I t}), \quad (13.71)$$

т.е. концентрация йода при работе реактора на постоянном уровне мощности увеличивается от исходного нулевого значения по экспоненциальному закону.

Решая (13.62) с учетом (13.71), получаем приближенное выражение

$$X_{Xe}(t) \approx \bar{X}_{Xe}(1 - e^{-\lambda_{Xe} t}), \quad (13.72)$$

справедливое для больших  $\Phi$ .

Таким образом, концентрация  $X_{Xe}$  изменяется также по экспоненциальному закону, аналогичным образом изменяется потеря реактивности на отравление.

С учетом известного свойства экспоненты можно считать, что с точностью до 5% равновесное отравление достигается за 30 ч.

Если мощность реактора изменять медленно (по сравнению с периодом полураспада йода), то отравление в любой момент будет мало отличаться от

равновесного значения. В случае внезапного уменьшения мощности реактора (при  $\Phi=0$ ) наступает так называемая "йодная яма", при этом уравнения (13.62) и (13.63) преобразуются к виду

$$\frac{dXe}{dt} = \lambda_j J - \lambda_{Xe} Xe, \quad (13.73)$$

$$\frac{dJ}{dt} = -\lambda_j J. \quad (13.74)$$

Из этих уравнений следует, что после остановки реактора образование йода полностью прекращается, а концентрация ксенона изменяется только вследствие радиоактивного распада накопившихся в ядерном топливе йода и ксенона.

Приняв момент остановки реактора за начало отсчета времени, а концентрацию йода и ксенона  $J(0)$  и  $Xe(0)$ , из (13.74) получаем выражение для изменения во времени концентрации йода:

$$J = J(0)e^{-\lambda_j t} \quad (13.75)$$

Подставив полученное выражение в (13.2.21), имеем

$$\frac{dXe}{dt} = \lambda_j J(0)e^{-\lambda_j t} - \lambda_{Xe} Xe. \quad (13.76)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$Xe = e^{-\lambda_{Xe} t} \left\{ Xe(0) + \frac{\lambda_j J(0)}{\lambda_{Xe} - \lambda_j} \left[ e^{(\lambda_{Xe} - \lambda_j)t} - 1 \right] \right\} \quad (13.77)$$

Из (13.75) следует, что зависимость  $J=f(t)$  экспоненциальная, а зависимость  $Xe=f(t)$  имеет более сложный характер.

Качественно эту зависимость можно описать следующим образом.

Пусть к моменту выключения реактора была достигнута равновесная концентрация ксенона, т.е. скорость образования ксенона равна скорости его убыли. После выключения реактора и снижения плотности потока нейтронов практически до нуля скорость убыли ксенона резко уменьшается, так как прекращается его выгорание и концентрация ксенона резко увеличивается. По мере увеличения концентрации ксенона возрастает скорость его убыли  $\lambda_{Xe} Xe$ , а скорость образования ксенона за счет уменьшения концентрации йода постепенно снижается. В результате значение производной  $dXe/dt$  будет постепенно уменьшаться и в определенный момент  $t_{\text{в.н}}^{\text{max}}$  станет равной нулю.

В этот момент концентрация ксенона достигает максимального значения, равно как и потеря реактивности на отравление. Значение  $t_{i,j}^{\max}$  называют временем достижения максимума йодной ямы, а потерю реактивности за это время - глубиной йодной ямы.

В дальнейшем скорость убыли ксенона превышает скорость его образования, в результате чего концентрация ксенона стремится к нулю.

Важным для эксплуатации реактора является понятие времени вынужденной стоянки реактора, определяющее такое состояние реактора, в котором пуск его невозможен из-за недостаточности оперативного запаса реактивности для компенсации эффекта реактивности. Важной величиной является также промежуток времени от момента выключения реактора до наступления вынужденной стоянки.

Так как в этот период пуск реактора еще возможен, это время называют оперативным. С увеличением исходного уровня мощности перед выключением реактора (при прочих равных условиях) оперативное время уменьшается, а время вынужденной стоянки возрастает.

Качественный характер изменения во времени отравления реактора при ступенчатых изменениях мощности показан на рис. 13.12. Как видно из рисунка, так же как снижение мощности реактора приводит к йодной яме, увеличение мощности влечет за собой появление ксенонового выбега реактивности. Характер процесса при этом противоположен рассмотренным выше.

Приведенные выше выводы справедливы без учета пространственной распределенности процессов в реакторе, что допустимо для активных зон, размеры которых соизмеримы с длиной миграции нейтронов.

В реакторах с большой активной зоной возможны локальные процессы с положительной обратной связью между потоком нейтронов и концентрацией ксенона. Если используется система контроля интегральной плотности нейтронного потока, а органы системы регулирования изменяют условия размножения нейтронов равномерно по всему объему активной зоны, то несмотря на воздействие системы автоматического регулирования, при определенных условиях в рассматриваемой области активной зоны может образоваться локальная надкритическая масса с перегревом ТВЭЛа.

В дальнейшем за счет температурного эффекта и переотравления топлива условия размножения нейтронов в рассматриваемой области активной зоны ухудшаются и образовавшаяся локальная надкритическая масса станет подкритической. Это приведет к снижению мощности реактора, и система автоматического регулирования отработает на подъем поглощающих стержней, в результате чего снова возникнут локальная надкритическая масса, но в другой области активной зоны.

Это так называемые ксеноновые колебания, или ксеноновые волны с периодом около 10 ч. Для предотвращения ксеноновой неустойчивости применяют локальные системы автоматического регулирования.

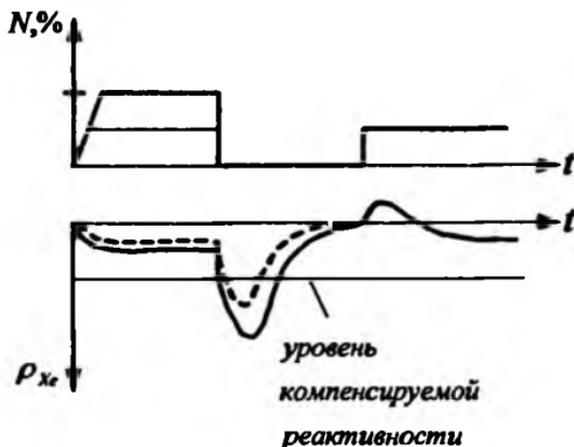


Рис. 13.12. Качественный характер изменения мощности и реактивности при отравлении реактора

## 14. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЯДЕРНОГО ЭНЕРГБЛОКА

Ниже рассмотрена динамика двухконтурного энергоблока с ВВЭР. Динамика энергоблока с реактором типа РБМК рассмотрена в [11].

В состав энергоблока входят следующие основные элементы: реактор, трубопроводы, парогенератор и турбогенератор. Ниже приведен вывод уравнений динамики ядерной энергетической установки (ЯЭУ) по основным параметрам с реактором типа ВВЭР. Выводы будут проведены для одной эквивалентной петли при постоянном расходе теплоносителя в первом контуре. Сначала рассмотрим упрощенный экспериментально-аналитический метод.

### 14.1. Экспериментально – аналитический метод

#### 14.1.1. Расчетная схема реактора и парогенератора

На рис.14.1 изображена принципиальная схема 2-контурной АСР с реактором, парогенератором, турбиной и циркуляционными насосами с обозначением физических величин.

Ядерный реактор описывается уравнением кинетики, связывающим реактивность с относительной плотностью нейтронов, и уравнением температурного эффекта реактивности по теплоносителю и топливу. Кроме того, в ЯЭУ включены такие структурные элементы (рис. 14.2): ядерное топливо

(горючее) – 2; оболочка тепловыделяющего элемента – 3; теплоноситель в реакторе – 4; трубопроводы от реактора к ПГ – 5 и обратно – 6; ПГ по теплоносителю первого контура – 7; ПГ по теплоносителю второго контура – 8.

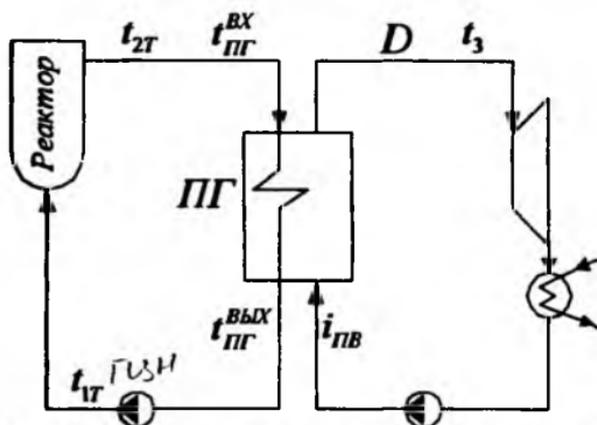


Рис. 14.1. Технологическая схема 2-контурной АЭС

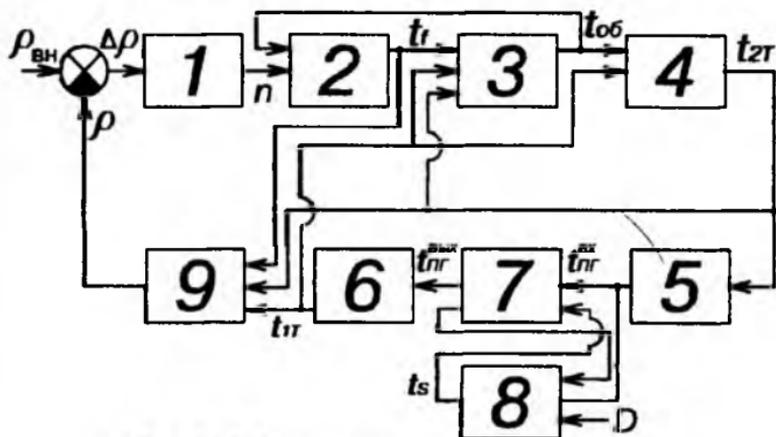


Рис. 14.2. Структурная схема энергоблока

### 14.1.2. Вывод уравнений динамики элементов структурной схемы

Кинетика ядерного реактора описывается системой из 7 дифференциальных уравнений, учитывающих 6 групп запаздывающих нейтронов (см. п.13.3).

С учетом одной группы запаздывающих нейтронов, а также с учетом пренебрежения временем жизни нейтронов уравнение кинетики можно представить в следующем виде (элемент 1) (см. п.13.1.5.2):

$$\frac{d\Delta N}{dt} = \frac{N_0}{\beta} \left( \frac{d\rho}{d\tau} + \bar{\lambda}\rho \right), \quad (14.1)$$

где  $\Delta N$  -приращение плотности нейтронов;

$N_0$  -плотность нейтронов в установившемся состоянии;

$\rho$  -реактивность;

$\bar{\lambda}$  -среднее значение постоянной распада;

$\beta$  -доля запаздывающих нейтронов.

Для относительной плотности нейтронов имеем

$$\frac{dn}{d\tau} = \frac{1}{\beta} \left( \frac{d\rho}{d\tau} + \bar{\lambda}\rho \right). \quad (14.2)$$

Для малых отклонений нейтронного потока от стационарного значения связь между тепловыделением  $Q$  и нейтронным потоком  $N$  определяется выражением

$$\Delta Q = Q_0 \frac{\Delta N}{N_0} = Q_0 n. \quad (14.3)$$

Температурный эффект реактивности учитывается уравнением (элемент 9)

$$\rho = k_t \Delta t_{тср} + k_f t_f, \quad (14.4)$$

где  $k_t$  -коэффициент реактивности по теплоносителю;

$t_{тср}$  -средняя температура теплоносителя 1-го контура;

$k_f$  -коэффициент реактивности по горючему;

$t_f$  -температура горючего.

При рассмотрении остальных элементов ЯЭУ примем следующие допущения: все элементы представляют собой объекты с сосредоточенными параметрами, тепловыми потерями в окружающую среду пренебрегаем.

Уравнение сохранения энергии для горючего (элемент 2):

$$Q_p = \frac{L_f}{R_L} (t_f - t_{об}) + c_f G_f \frac{dt_f}{d\tau}, \quad (14.5)$$

где  $Q_p$  -тепловая мощность реактора;

$L_f$  -общая длина тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ);

$R_L$  -термическое сопротивление горючего на единицу длины ТВЭЛа;

$t_f$  - средняя температура горючего;

$t_{об}$  - температура горючего;

$c_f$  - удельная теплоемкость горючего;

$G_f$  - масса горючего.

Для решения (14.5), а также последующих уравнений необходимо знать  $L_f$ ,  $R_L$  и т.д. Однако для получения упрощенной модели для ЯЭУ можно поступить так.

Для стационарного режима  $dt_f/d\tau = 0$ ,

$$\text{тогда} \quad \frac{L_f}{R_L} = \frac{\overline{Q_p}}{t_f - t_{об}} = a_1, \quad (14.6)$$

Температуры  $\bar{t}_f$  и  $\bar{t}_{об}$  известны для стационарного режима, поэтому комплекс  $L_f/R_L$  можно определить.

Обозначим

$$c_f G_f = a_2. \quad (14.7)$$

Тогда уравнение (14.5) можно записать так:

$$Q_p = a_1(t_f - t_{об}) + a_2 \frac{dt_f}{d\tau}. \quad (14.8)$$

Представим уравнение относительно выходной координаты:

$$a_2 \frac{dt_f}{d\tau} + a_1 t_f = a_1 t_{об} + Q_p. \quad (14.9)$$

Уравнение передачи теплоты через оболочку ТВЭЛа (элемент 3):

$$\frac{L_f}{R_L}(t_f - t_{об}) = \frac{H_{об}}{R_a}(t_{об} - t_{тсп}) + c_{об} G_{об} \frac{dt_{об}}{d\tau}, \quad (14.10)$$

где  $R_a$  - термическое сопротивление теплопередачи в канале;

$H_{об}$  - поверхность оболочек;

$t_{тсп}$  - средняя температура теплоносителя.

$$t_{тсп} = \frac{t_{1T} + t_{2T}}{2},$$

где  $t_{1T}$  - температура теплоносителя на входе в активную зону;

$t_{2T}$  - то же на выходе;

$c_{об}, G_{об}$  - удельная теплоемкость материала и масса оболочки.

В стационарном состоянии  $dt_{об}/d\tau = 0$ ,

тогда 
$$\frac{H_{об}}{R_a} = \frac{\frac{L_T}{R_L} (\bar{t}_T - \bar{t}_{об})}{t_{об} - t_{Tcp}} = \frac{a_1 (\bar{t}_T - \bar{t}_{об})}{t_{об} - t_{Tcp}} = a_3. \quad (14.11)$$

Обозначим

$$c_{об} G_{об} = a_4, \quad (14.12)$$

тогда (14.10) запишется так:

$$a_4 \frac{dt_{об}}{d\tau} + (a_3 + a_1) t_{об} = a_1 t_T + a_3 t_{Tcp}. \quad (14.13)$$

Уравнение теплового баланса для теплоносителя (элемент 4):

$$\frac{H_{об}}{R_a} (t_{об} - t_{Tcp}) = c_T G_T (t_{2T} - t_{1T}) + (V_T^{A3} \rho_T c_T + c_M^P G_M^P) \frac{dt_{2T}}{d\tau}, \quad (14.14)$$

где  $c_T$  - удельная теплоемкость теплоносителя;

$G_T$  - расход теплоносителя;

$V_T^{A3}$  - объем теплоносителя в активной зоне реактора;

$c_M^P$  - удельная теплоемкость металла реакторного корпуса;

$G_M^P$  - масса корпуса реактора и его внутрикорпусных устройств.

Для стационарного состояния  $\frac{dt_{2T}}{d\tau} = 0$ ,

тогда 
$$c_T G_T = \frac{\frac{H_{об}}{R_a} (\bar{t}_{об} - t_{Tcp})}{t_{2T} - t_{1T}} = \frac{a_3 (\bar{t}_{об} - t_{Tcp})}{t_{2T} - t_{1T}} = a_5. \quad (14.15)$$

Обозначим

$$V_T^{A3} \rho_T c_T + c_M^P G_M^P = a_6. \quad (14.16)$$

С учетом введенных коэффициентов уравнение (14.14) запишется таким образом:

$$\begin{aligned} a_3 (t_{об} - t_{Tcp}) &= a_5 (t_{2T} - t_{1T}) + a_6 \frac{dt_{2T}}{d\tau}, \\ a_6 \frac{dt_{2T}}{d\tau} + a_5 t_{2T} &= a_3 t_{об} - a_3 t_{Tcp} + a_5 t_{1T}. \end{aligned}$$

Представим  $t_{Tcp}$  через  $t_{1T}$  и  $t_{2T}$ :

$$a_6 \frac{dt_{2T}}{d\tau} + (a_5 + 0.5a_3)t_{2T} = a_3 t_{ос} + (a_5 - 0.5a_3)t_{1T} \quad (14.17)$$

Ввиду конечной скорости теплоносителя необходимо учесть запаздывание в передаче теплоты на участке от реактора до парогенератора и обратно (элементы 5 и 6).

Это запаздывание представим экспоненциальной зависимостью:

$$\tau_{TP1} \frac{dt_{ПГ}^{BX}}{d\tau} = t_{2T} - t_{ПГ}^{BX}; \quad (14.18)$$

$$\tau_{TP2} \frac{dt_{ПГ}^{ВЫХ}}{d\tau} = t_{ПГ}^{ВЫХ} - t_{1T}, \quad (14.19)$$

где  $t_{ПГ}^{BX}$ ,  $t_{ПГ}^{ВЫХ}$  - температура теплоносителя на входе и выходе парогенератора соответственно.

Коэффициенты  $\tau_{TP1}$  и  $\tau_{TP2}$  определяются через длину трубопроводов  $l$  и скорость теплоносителя  $w$ :

$$\tau_{TP1} = \frac{l_1}{w_1} = a_7; \quad (14.20)$$

$$\tau_{TP2} = \frac{l_2}{w_2} = a_8, \quad (14.21)$$

где  $l_1, l_2$  - длина трубопровода от реактора до ПГ и от ПГ до реактора соответственно;

$w_1, w_2$  - скорость теплоносителя в соответствующих трубопроводах.

Поскольку потерями теплоты в окружающую среду пренебрегаем, то для стационарного режима

$$\bar{t}_{ПГ}^{BX} = \bar{t}_{2T}$$

$$\bar{t}_{ПГ}^{ВЫХ} = \bar{t}_{1T}$$

Перепишем уравнения (14.18) и (14.19):

$$a_7 \frac{dt_{ПГ}^{BX}}{d\tau} = t_{2T} - t_{ПГ}^{BX}; \quad (14.22)$$

$$a_8 \frac{dt_{ПГ}^{ВЫХ}}{d\tau} = t_{ПГ}^{ВЫХ} - t_{1T}. \quad (14.23)$$

Уравнение теплового баланса ПГ со стороны теплоносителя 1-го контура (элемент 7):

$$c_T G_T (t_{nr}^{BX} - t_{nr}^{ВЫХ}) = \frac{H_{nr}}{R_{nr}} (t_{nr}^{CP} - t_s) + (c_T \rho_T V_{nr}^T + c_M^{nr} c_{M_{MK}}^{nr}) \frac{dt_{nr}^{ВЫХ}}{d\tau}, \quad (14.24)$$

где  $H_{nr}$  - поверхность нагрева ПГ;

$R_{nr}$  - термическое сопротивление теплопередачи в ПГ;

$V_{nr}^{nr}$  - объем теплоносителя 1-го контура;

$c_M^{nr}$  - теплоемкость металла ПГ;

$G_{nr}^{nr}$  - масса металла трубной системы ПГ, участвующая в аккумуляции от теплоносителя 1-го контура;

$t_s$  - температура насыщенного пара.

Для стационарного режима  $\frac{dt_{nr}^{ВЫХ}}{d\tau} = 0$ ,

тогда

$$\frac{H_{nr}}{R_{nr}} = \frac{c_T G_T (t_{nr}^{BX} - t_{nr}^{ВЫХ})}{t_{nr}^{CP} - t_s} = \frac{\alpha_3 (t_{nr}^{BX} - t_{nr}^{ВЫХ})}{t_{nr}^{CP} - t_s}. \quad (14.25)$$

Обозначим

$$c_T \rho_T V_{nr}^{nr} + c_M^{nr} G_{M_{MK}}^{nr} = a_{10}. \quad (14.26)$$

С учетом введенных обозначений

$$a_{10} \frac{dt_{nr}^{ВЫХ}}{d\tau} + (a_3 + 0.5a_9) t_{nr}^{ВЫХ} = (a_3 - 0.5a_9) t_{nr}^{BX} + a_9 t_s. \quad (14.27)$$

Уравнение теплового баланса ПГ со стороны теплоносителя 2-го контура (элемент 8):

$$\frac{H_{nr}}{R_{nr}} (t_{nr}^{CP} - t_s) = D(i^* - i_{пв}) + (c_{T_{2K}} V_{T_{2K}} \chi \rho_{T_{2K}} + c_M^{nr} G_{M_{2K}}^{nr}) \frac{dt_s}{d\tau}, \quad (14.28)$$

где  $i^*$  - энтальпия сухого насыщенного пара;

$c_{T_{2K}}, V_{T_{2K}}$  - удельная теплоемкость теплоносителя и объем 2-го контура парогенератора;

$\rho_{T_{2K}}$  - плотность теплоносителя 2-го контура;

$D$  - паропроизводительность;

$i_{пв}$  - энтальпия питательной воды;

$G_{M_{2K}}^{nr}$  - масса ПГ без трубной системы.

Для стационарного режима  $dt_s/d\tau = 0$ ,

тогда

$$a_9 (\bar{i}_{nr}^* - \bar{i}_s) = \bar{D} (\bar{i}^* - \bar{i}_{пв}),$$

откуда

$$\bar{i}_{\text{тн}} = \frac{\bar{D} \cdot \bar{i}'' - a_9 (\bar{t}_{\text{тн}}^{\text{CP}} - \bar{t}_s)}{\bar{D}} = a_{11}. \quad (14.29)$$

Обозначим

$$c_{T2K} V_{T2K} \rho_{T2K} + c_M G_M^{\text{пр}} = a_{12}. \quad (14.30)$$

Энтальпия  $\bar{i}''$  функционально связана с температурой насыщения  $t_s$ , т.е.  $\bar{i}'' = f(t_s)$ . В случае малого отклонения параметров от установившегося состояния эту зависимость можно представить так:

$$\bar{i}'' = K_1 t_s + K_2, \quad (14.31)$$

где  $K_1, K_2$  - коэффициенты, определяемые аналитически для конкретных параметров пара.

Подставим (14.31) в (14.28):

$$\begin{aligned} a_9 (t_{\text{тн}}^{\text{CP}} - t_s) &= D(K_1 t_s + K_2) - a_{11} D + a_{12} \frac{dt_s}{dt} \\ a_{12} t_s' + (a_9 + K_1 D) t_s &= a_9 t_{\text{тн}}^{\text{CP}} - K_2 D + a_{11} D. \end{aligned}$$

Последнее уравнение является нелинейным, так как содержит произведение переменных  $D$  и  $t_s$ .

Линеаризируем его, записав переменные в отклонениях:

$$a_{12} \Delta t_s' + (a_9 + K_1 \bar{D}) \Delta t_s = a_9 \Delta t_{\text{тн}}^{\text{CP}} + (a_{11} - K_2 - K_1 \bar{t}), \quad (14.32)$$

где  $\bar{D}, \bar{t}_s$  - значения переменных в установившемся состоянии.

Уравнения (14.2), (14.4), (14.9), (14.13), (14.17), (14.22), (14.23), (14.27), (14.32) составляют систему уравнений энергоблока.

При записи указанных уравнений сделаем следующие преобразования.

Уравнение (14.2) проинтегрируем с учетом нулевых начальных условий, все уравнения системы запишем в отклонениях, уравнение (14.9) запишем с учетом (14.3), средние температуры в реакторе и ПГ выразим через соответствующие входные и выходные температуры.

Дополним полученную систему уравнением сумматора для реактивности:

$$\Delta \rho = \rho + \rho_{\text{вн}}, \quad (14.33)$$

где  $\rho_{\text{вн}}$  - реактивность, вносимая со стороны (внешняя) (рис. 14.2).

Тогда получим такую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 n(\tau) &= A_1 \Delta \rho + A_2 \int_0^\tau \Delta \rho(\tau) \Delta \tau \\
 A_3 \Delta t'_f + \Delta t_f &= \Delta t_{об} + A_4 n \\
 A_5 \Delta t'_{об} + \Delta t_{об} &= A_6 \Delta t_f + A_7 \Delta t_{1T} + A_7 \Delta t_{2T} \\
 A_7 \Delta t'_{2T} + \Delta t_{2T} &= A_9 \Delta t_{1T} + A_{10} \Delta t_{об} \\
 A_{11} (\Delta t'_{ПГ})' + \Delta t_{ПГ}^{ВХ} &= \Delta t_{2T} \\
 A_{11} \Delta t'_{1T} + \Delta t_{1T} &= \Delta t_{ПГ}^{ВЫХ} \\
 A_{13} (\Delta t'_{ПГ})' + \Delta t_{ПГ}^{ВЫХ} &= A_{14} \Delta t_{ПГ}^{ВХ} + A_{15} \Delta t_S \\
 A_{16} \Delta t'_S + \Delta t_S &= A_{17} \Delta t_{ПГ}^{ВХ} + A_{17} \Delta t_{ПГ}^{ВЫХ} + A_{18} \Delta D \\
 \rho &= A_{19} \Delta t_{1T} + A_{19} \Delta t_{2T} + A_{20} \Delta t_f \\
 \Delta \rho &= \rho + \rho_{вн}
 \end{aligned} \tag{14.34}$$

В системе (14.34) приняты обозначения:

$$1/\beta = A_1 \tag{14.35} \quad \alpha_7 = \frac{1}{w_1} = A_{11} \tag{14.45}$$

$$\lambda\beta = A_2 \tag{14.36} \quad \alpha_8 = \frac{1}{w_2} = A_{12} \tag{14.46}$$

$$\alpha_2/\alpha_1 = A_3 \tag{14.37} \quad \alpha_{10}/(\alpha_8 + 0,5\alpha_9) = A_{13} \tag{14.47}$$

$$Q_0/\alpha_1 = A_4 \tag{14.38} \quad (\alpha_7 - 0,5\alpha_7)/(\alpha_7 + 0,5\alpha_8) = A_{14} \tag{14.48}$$

$$\alpha_4/(\alpha_1 + \alpha_1) = A_5 \tag{14.39} \quad \alpha_7/(\alpha_7 + 0,5\alpha_8) = A_{15} \tag{14.49}$$

$$\alpha_1/(\alpha_3 + \alpha_3) = A_6 \tag{14.40} \quad \alpha_{12}/(\alpha_9 + K_1 D) = A_{16} \tag{14.50}$$

$$0,5\alpha_3/(\alpha_3 + \alpha_1) = A_7 \tag{14.41} \quad 0,5\alpha_9/(\alpha_9 + K_1 D) = A_{17} \tag{14.51}$$

$$\alpha_6/(\alpha_5 + 0,5\alpha_3) = A_8 \tag{14.42} \quad (\alpha_{11} - K_2 - K_1 t_3)/(\alpha_9 + K_1 D) = A_{18} \tag{14.52}$$

$$\alpha_3/(\alpha_5 + 0,5\alpha_3) = A_9 \tag{14.43} \quad 0,5 K_1 = A_{15} \tag{14.53}$$

$$(\alpha_5 - 0,5\alpha_3)/(\alpha_5 + 0,5\alpha_3) = A_{10} \tag{14.44} \quad K_1 - A_{20} \tag{14.54}$$

Выходными величинами в системе (14.34) являются: относительная мощность реактора  $n$ , температура топлива  $t_f$ , оболочки  $t_{об}$ , теплоносителя на входе  $t_{1T}$  и на выходе реактора  $t_{2T}$ , теплоносителя на входе парогенератора  $t_{ПГ}^{ВХ}$  и выходе  $t_{ПГ}^{ВЫХ}$ . Входными возмущениями являются внешняя реактивность  $\rho_{вн}$  и расход пара  $D$ .

### 14.1.3. Структурная схема энергоблока и уравнения динамики

Дополнив структурную схему реактора и ПГ, изображенную на рис.14.2, структурной схемой для турбогенератора (см.разд.12), получим структурную схему всего энергоблока (рис.14.3).

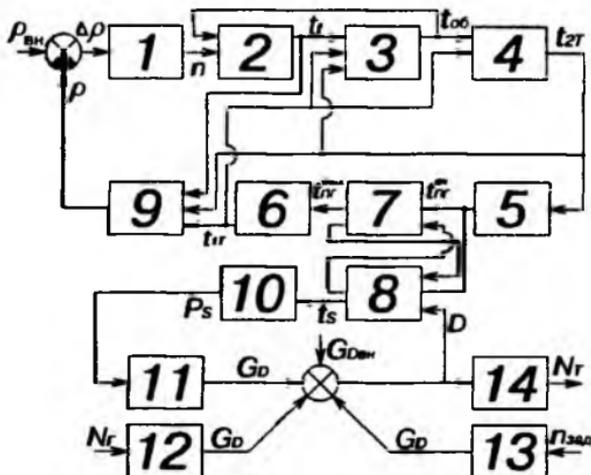


Рис. 14.3. Структурная схема энергоблока

Здесь добавлены следующие элементы:

- 10 – описывает связь между давлением насыщения и температурой насыщения;
- 11 – канал “давление пара перед турбиной – расход пара”;
- 12 – канал “мощность генератора – расход пара”;
- 13 – канал “задание по числу оборотов – расход пара”;
- 14 – канал “расход пара – мощность турбины”.

Как видно, входными возмущениями на энергоблок могут быть:

- внешняя реактивность;
- мощность генератора;
- задание по числу оборотов;
- расход пара (внешнее возмущение).

Выходными параметрами могут быть все остальные переменные энергоблока.

Напомним, что все переменные рассматриваются в отклонениях от установившегося состояния.

Динамика реактора парогенератора описывается системой уравнений (14.34) (см. разд. 14). Турбогенератор в общем случае описывается передаточными функциями (12.18), (12.19), (12.21), (12.23), (12.25), (12.26), (12.28), (12.32), (12.34).

В частности, для наиболее распространенного случая работы ТГ на большую электрическую сеть и конденсационной турбины ТГ описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta N_T &= \frac{N_{T\max}}{G_{D\max}} \Delta G_D \\ \delta_x T_a \Delta G_D + \Delta G'_D &= \frac{G_{D\max}}{N_{T\max}} \Delta N_T \\ \Delta G_D &= \frac{\bar{G}_D}{P_T} \Delta P_T \\ T_C \Delta G_D + \Delta G'_D &= \frac{G_{D\max}}{\delta_x n_0} \Delta n_{\text{зад}} \end{aligned} \right.$$

В частности, если динамику турбогенератора по каналу “ $N_T - G_D$ ” описать упрощенным уравнением (12.33), то динамика турбогенератора по всем каналам будет описываться уравнениями (12.19), (12.25), (12.28), (12.33).

В этом случае динамика энергоблока описывается структурной схемой (рис.14.4).

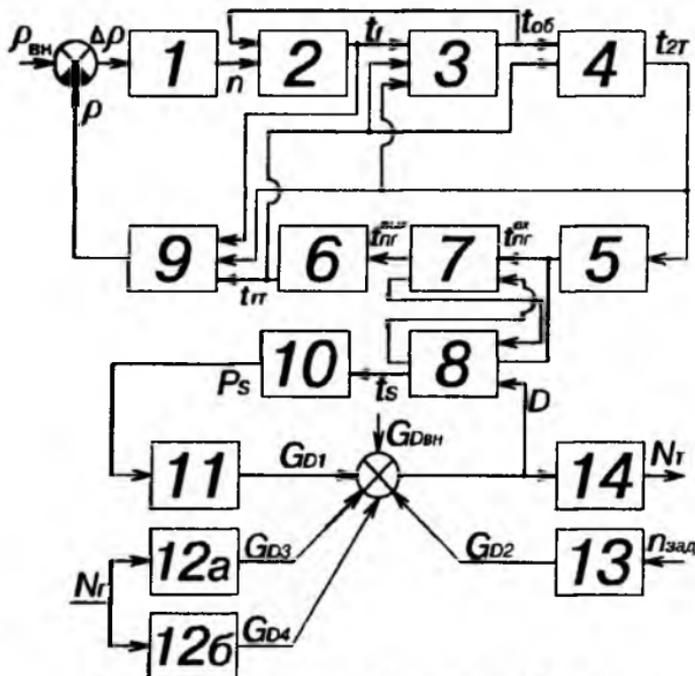


Рис. 14.4. Структурная схема энергоблока

Элементы структурной схемы описываются следующими уравнениями:  
Элемент 10

$$P_S = A_{21} \Delta t_S,$$

где  $A_{21} = \left( \frac{\Delta P_S}{\Delta J_S} \right)_0$ .

Элемент 11

$$G_{D1} = A_{22} \Delta P_S,$$

где  $A_{22} = \frac{\bar{G}_D}{P_S}$ .

Элементы 12а, 12б

$$A_{25} \Delta G_{D3}^* + \Delta G_{D3} = A_{27} \Delta N_{\Gamma};$$

$$\Delta G_{D4} = A_{26} \Delta N_{\Gamma},$$

где  $A_{25} = \alpha T_{II};$

$$A_{26} = \frac{G_{D\max}}{N_{\Gamma\max}} \frac{1}{\alpha};$$

$$A_{27} = \frac{G_{D\max}}{N_{\Gamma\max}} \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right).$$

Элемент 13

$$A_{23} \Delta G_{D2}^* + \Delta G_{D2} = A_{24} \Delta n_{3AD},$$

где  $A_{23} = T_C$

$$A_{24} = \frac{G_{D\max}}{\delta_X n_0}.$$

Элемент 14

$$\Delta N_{\Gamma} = A_{30} \Delta G_D,$$

где  $A_{30} = \frac{N_{\Gamma\max}}{G_{D\max}}.$

## 14.2. Аналитический вывод уравнений динамики реактора

Динамика реактора моделируется по структурной схеме рис.14.5.[8].

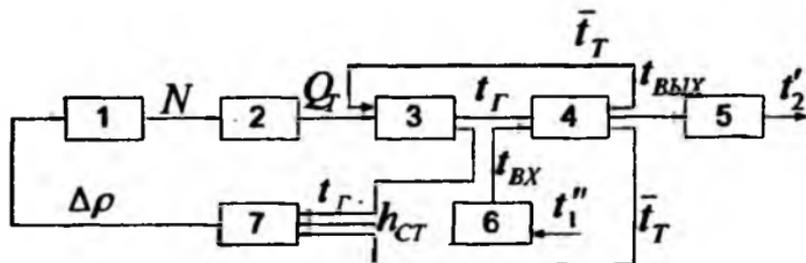


Рис.14.5. Структурная схема реактора

Кинетика реактора (блок 1) рассмотрена в разд. 13, в частности, можно воспользоваться упрощенным уравнением (13.47).

Зависимость тепловыделения от нейтронного потока (блок 2) описывается выражением (14.3).

Средняя температура твэлов  $t_r$  (блок 3) от тепловыделения  $Q_T$  и средней температуры теплоносителя  $\bar{t}_T$  определяется из выражения

$$T_T \frac{dt_r}{dt} + t_r = \bar{t}_T + \frac{q_r T_T}{C_r \rho_r}, \quad (14.55)$$

где  $T_T$  - постоянная времени твэла;

$q_r$  - средняя удельная плотность тепловыделения в твэлах;

$C_r, \rho_r$  - удельная теплоемкость и плотность горючего при средней температуре.

Удельное тепловыделение пропорционально общему тепловыделению

$$q_r = q_{r_0} \frac{Q}{Q_0} = q_{r_0} \frac{N}{N_0}. \quad (14.56)$$

Выходная и средняя температуры теплоносителя (блок 4) определяются приближенными соотношениями:

$$t_{ВЫХ} = t_{ВХ} + \frac{Q_{ВН}}{D_p C}; \quad (14.57)$$

$$\bar{t}_T = 0,5(t_{ВЫХ} + t_{ВХ}) = t_{ВХ} + 0,5 \frac{Q_{ВН}}{D_p C}, \quad (14.58)$$

где  $t_{ВХ}, t_{ВЫХ}$  - температура теплоносителя на входе и выходе каскет реактора;

$D_p$  - расход теплоносителя через реактор;

$C$  - средняя удельная теплоемкость теплоносителя в реакторе;

$Q_{ВН}$  - тепловой поток от твэлов к теплоносителю.

### Тепловой поток

$$Q_{ВН} = \frac{F_T(\bar{t}_T - t_T)}{R/(4\lambda) + 1/\alpha} = K_Q(t_T - \bar{t}_T), \quad (14.59)$$

где  $F_T$  - полная поверхность теплообмена твэлов;

$R$  - радиус твэла;

$\lambda$  - теплопроводность материала твэла;

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи.

Подстановка (14.59) в (14.58) дает

$$\bar{t}_T = \frac{1}{1 + 0,5 \frac{K_Q}{D_p C}} \left[ t_{ВХ} + \frac{0,5 K_Q}{D_p C} t_T \right] \quad (14.60)$$

Подставляя (14.60) и (14.56) в (14.55), получим

$$T_{ТЭ} \frac{dt_T}{dt} + t_T = t_{ВХ} + \frac{q_{TЭ}}{C\rho} T_{ТЭ} \frac{N}{N_0}, \quad (14.61)$$

где  $T_{ТЭ} = T_T \left( 1 + 0,5 \frac{K_Q}{D_p C} \right)$  - эквивалентная постоянная времени.

Оценим величину  $\frac{K_Q}{D_p C}$ . Поскольку в стационарном режиме полный подогрев теплоносителя в реакторе

$$t_{ВЫХ}^0 - t_{ВХ}^0 = \frac{Q_{ВН}^0}{D_p^0 C},$$

из (14.60) получаем

$$\frac{K_Q}{D_p C} = \frac{Q_{ВН}^0}{t_T^0 - \bar{t}_T^0} \cdot \frac{t_{ВЫХ}^0 - t_{ВХ}^0}{Q_{ВН}^0} = \frac{t_{ВЫХ}^0 - t_{ВХ}^0}{\bar{t}_T^0 - t_T^0}. \quad (14.62)$$

Таким образом, расчет средней температуры твэла может быть проведен без вычисления средней температуры теплоносителя, однако постоянная времени твэла при этом должна быть несколько увеличена.

При известной  $\bar{t}_T$  среднюю температуру теплоносителя  $t_T$  находят из (14.60). Выходная температура определяется также из (14.60), если учесть, что

$$t_{ВЫХ} = 2\bar{t}_T - t_{ВХ},$$

откуда

$$t_{ВЫХ} = \frac{1}{1 + 0,5 \frac{K_Q}{D_p C}} \left[ t_{ВХ} \left( 1 - 0,5 \frac{K_Q}{D_p C} \right) + \frac{K_Q}{D_p C} t_T \right] \quad (14.63)$$

Последним уравнением можно пользоваться, если выполняется условие

$$0,5 \frac{K_Q}{DpC} < 1.$$

Рассматривая подреакторный и надреакторный объемы как емкости полного перемешивания, можно записать для подреакторного объема (блок 6):

$$T_1 \frac{dt_{BX}}{d\tau} + t_{BX} = t_1^n; \quad (14.64)$$

для надреакторного объема (блок 5);

$$T_2 \frac{dt_2'}{dt} + t_2' = t_{ВЫХ}, \quad (14.65)$$

где  $T_1, T_2$  - соответствующие постоянные времени.

Зависимость реактивности  $\Delta\rho$  от температуры горючего и теплоносителя определяется выражением

$$\Delta\rho = \alpha_r(t_r - t_r^0) + \alpha_T(t_T - t_T^0). \quad (14.66)$$

Реактивность, вносимая стержнями (внешняя)

$$\rho_{BH} = K_{CT} \Delta h_{CT}, \quad (14.67)$$

где  $K_{CT}$  - коэффициент передачи подключенной к регулятору группы стержней;

$\Delta h$  - перемещение стержней.

В случае использования борного (химического) регулирования необходимо учитывать реактивность, обусловленную изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## 1. ПОНЯТИЕ АСУ ТП, ЕЕ СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ

В соответствии с определением, "автоматизированная система управления" (АСУ) – человеко-машинная система, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления в различных сферах человеческой деятельности.

Управление генерацией и обменом активной мощности в государстве осуществляется с помощью многоуровневой иерархической системы (МИС) управления, включающей в себя объединенное диспетчерское управление, районные диспетчерские управления, АСУ электростанций и АСУ технологическим процессом (АСУ ТП) энергоблока. Основное назначение АСУ АЭС, ТЭС - обеспечение оптимального использования материальных и трудовых ресурсов для надежного и качественного производства электроэнергии в соответствии с заданием энергосистемы. При этом приходится решать вопросы оперативно-диспетчерского и производственно-хозяйственного управления. Вопросы оперативно-диспетчерского управления решаются на уровне АСУ технологическим процессом (АСУ ТП).

Для АСУ ТП управляемым объектом является технологический объект управления, т.е. совокупность технологического оборудования и реализованного на нем технологического процесса производства электроэнергии.

### 1.1. Состав АСУ ТП

Любая АСУ ТП имеет следующие компоненты:

- оперативный персонал;
- организационное обеспечение;
- информационное обеспечение;
- техническое обеспечение;
- программное обеспечение;
- (математическое обеспечение).

Оперативный персонал состоит из технологов-операторов, осуществляющих контроль и управление объектом, и эксплуатационного персонала, обеспечивающего правильность функционирования всех технических и программных средств системы.

Организационное обеспечение - совокупность документов, устанавливающих взаимоотношения между работниками и правила функционирования оперативного персонала (инструкции по эксплуатации и др.).

Информационное обеспечение определяет способы, формы и объем информационного отображения состояния объекта управления.

Техническое обеспечение включает в себя:

- средства получения информации;
- средства формирования и передачи информации;
- средства локального регулирования и управления;
- средства вычислительной техники;
- исполнительные механизмы;
- средства передачи информации в смежные и вышестоящие АСУ.

Математическое обеспечение (МО), формально не входящее в состав АСУ ТП, является исходным материалом для программного обеспечения. Под МО понимается совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, используемых при функционировании систем.

Можно считать, что МО - идеологическое содержание АСУ. Как известно, информационный процесс состоит из 3-х этапов: сбор информации, обработка ее (т. е. выработка и принятие решения) и выдача управляющих воздействий. 1-й и 3-й этапы выполняются в АСУ автоматически с помощью технических средств. Для выполнения 2-го этапа каждую задачу необходимо сформулировать математически.

Математическая формулировка любой задачи оптимального управления включает в себя два элемента: математическую модель (ММ) и критерий управления.

ММ - это система математических соотношений, описывающих поведение объекта управления. Пользуясь моделью, можно проверить различные управляющие воздействия, получить реакцию модели на эти воздействия, проверить достижение принятого критерия управления и выработать оптимальное управляющее воздействие.

Переработка информации осуществляется по алгоритмам.

Программное обеспечение - конкретная реализация машинных алгоритмов функционирования системы управления.

## 1.2. Структурные схемы АСУ ТП

Современные АСУ ТП различаются между собой по составу технических средств, степени автоматизации управления объектом, по выполняемым функциям.

Рассмотрим структурные схемы АСУ ТП и роль вычислительных комплексов в них. Различают централизованные, децентрализованные и АСУ ТП распределенного управления.

В централизованной АСУ все функции контроля и управления сосредоточены в едином центре, т.е. осуществляется непосредственное цифровое управление объектом. Однако при выходе из строя вычислительного комплекса теряются все функции контроля и управления, поэтому такие АСУ не получили еще распространения.

В децентрализованной АСУ на первом уровне управления находятся локальные регуляторы и устройства логического управления, которые

стабилизируют отдельные параметры и могут управлять отдельными операциями по определенной логической программе (так называемое функционально-групповое управление). На втором уровне управления находится вычислительный комплекс, который может выполнять следующие функции:

- информационные;
- изменение задания локальным регулятором;
- изменение параметров настройки регуляторов.

Изменение задания регулятором используется для статической оптимизации технологического объекта управления (так называемое супервизорное управление).

Динамические параметры настройки регуляторов корректируются при динамической оптимизации процессов регулирования.

Таким образом, в децентрализованных АСУ связь между уровнями управления либо вообще отсутствует, либо слабо выражена, что приводит к повышению надежности и живучести АСУ. С появлением быстродействующих и надежных микроЭВМ

появилась возможность разделить общую вычислительную мощность АСУ между несколькими территориально разобщенными подсистемами и построить так называемую АСУ ТП распределенного управления.

На 1-м уровне могут находиться локальные АСР для стабилизации отдельных параметров, на 2-м - микроЭВМ для статической оптимизации технологического процесса с помощью АСР 1-го уровня. На 3-м уровне - микроЭВМ для оптимизации общешлюсовых параметров и режимов. На 4-м уровне - общестанционная микроЭВМ для оптимизации технологического процесса для всей станции (например, оптимальное распределение нагрузок между несколькими энергоблоками).

Структурная схема АСУ ТП серийного энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 показана на рис. 1.1.

Как видно, в комплекс технических средств входят:

- датчики контроля параметров и приводы механизмов управления;
- средства автоматического регулирования, например «Каскад-2»;
- унифицированный комплекс технических средств (УКТС) для обработки дискретных и аналоговых сигналов;
- микропроцессорные управляющие комплексы УЛУ2-МПК для функционально-группового управления;
- управляющая вычислительная система «Комплекс-Титан-2», которая выполняет информационные функции, представляет оператору систематизированную и обобщенную информацию о ходе технологического процесса, режимах работы технологического оборудования и диагностирует аварийные ситуации.

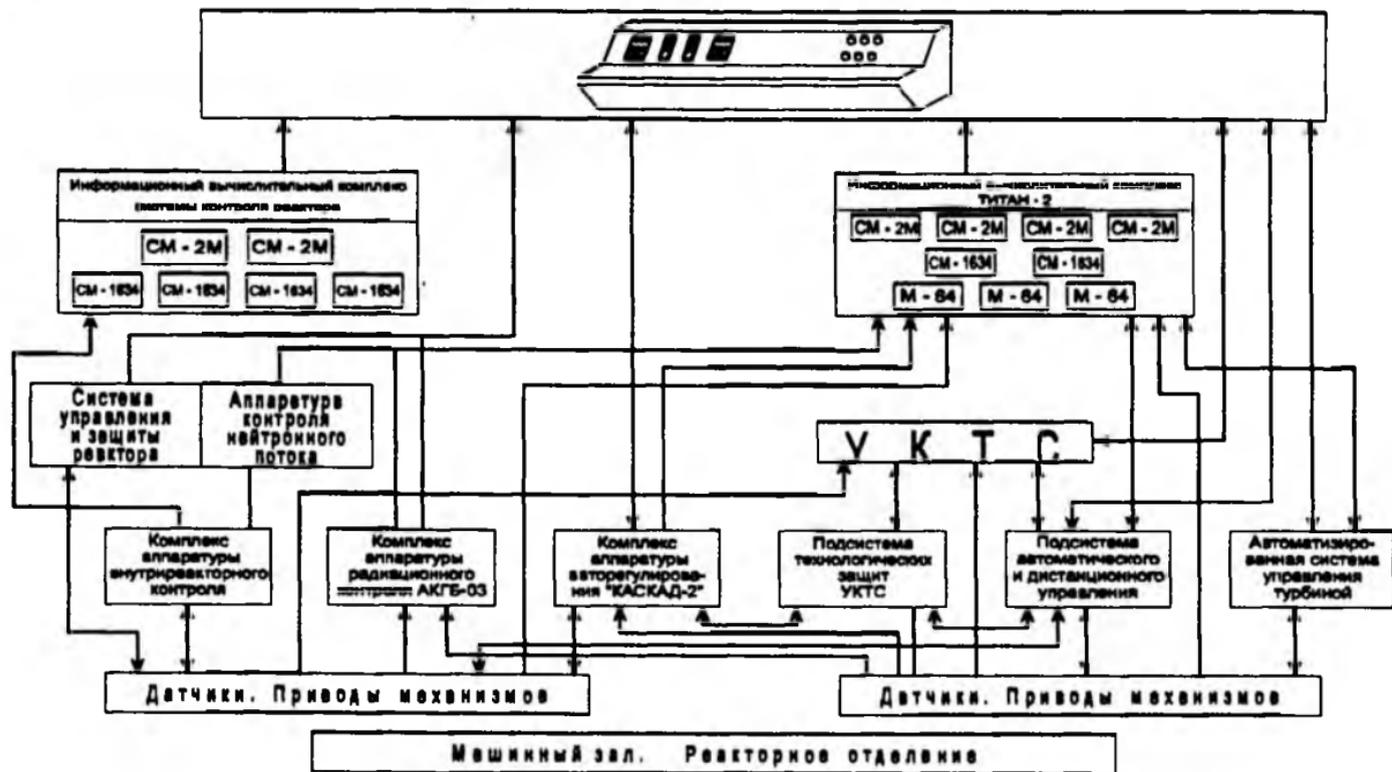


Рис. 1.1. Структурная схема АСУ ТП

Структурная схема технических средств «Комплекс-Титан-2» показана на рис.1.2.

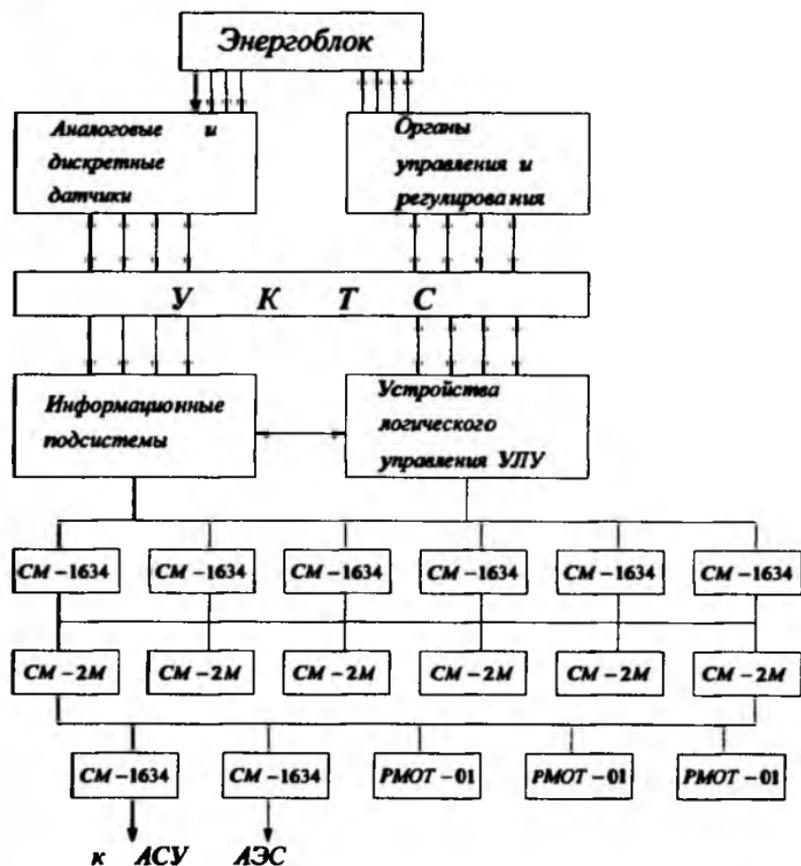


Рис.1.2. Структурная схема технических средств «Комплекс-Титан-2».

Этот комплекс состоит из трех подсистем:

- сбора и обработки информации, выполненной на базе информационного комплекса М-64;
- функционально-группового управления;
- представления информации оператору.

Информационный комплекс М-64 состоит из 15-ти однотипных устройств (ССО – субкомплекс связи с объектом), объединяемых двумя концентраторами ССОУ (рис.1.3).

Все ССО выполнены на базе микропрограммируемого контроллера (МПК) типа А135-1/4. Они включают оперативное запоминающее устройство в составе модуля А211-25 и блока памяти БП-38 и постоянное запоминающее устройство А211-11, аналого-цифровой преобразователь, модули аналогового и дискретного ввода и модуль дискретного вывода сигналов, интерфейс связи МПК с модулями, модуль внутрисистемной связи А123 и блок гальванической развязки.

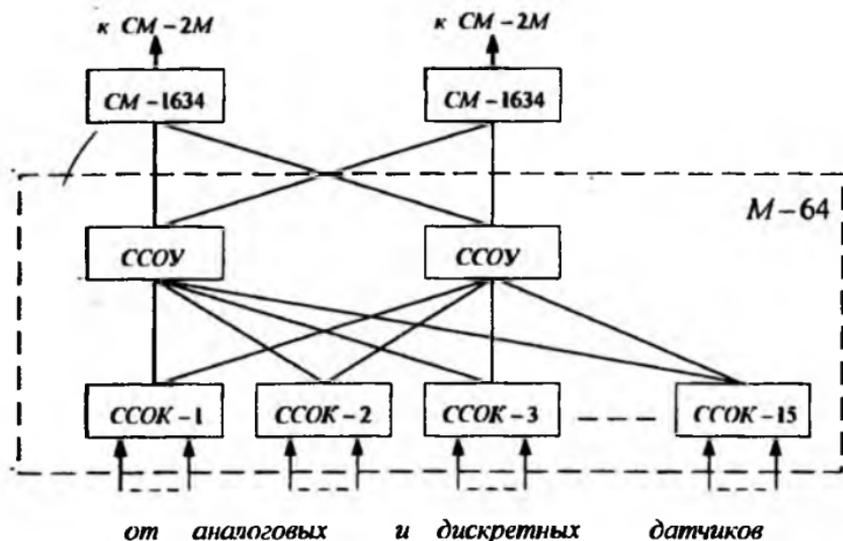


Рис.1.3. Структура информационного комплекса М-64

Каждый субкомплекс может выполнять одну или несколько функций следующего вида: ввод и первичная обработка аналоговых и дискретных сигналов, вывод аналого-дискретных сигналов, обмен данными с ВК, загрузка микропрограмм в ОЗУ по линии связи с ВК. При этом при вводе аналоговой информации ССО обеспечивает: фильтрацию, усиление, нормализацию и преобразование сигналов в двончный код, линеаризацию характеристик, сравнение значений параметров с уставками, усреднение сигналов, компенсацию температуры холодных спаев термопар и др.

Подсистема представления информации оператору в виде графиков, таблиц, мнемосхем, цифробуквенной формы реализуется с помощью автоматизированного рабочего места оператора-технолога РМОТ-01. В состав РМОТ-01 входят два цветных и один монохромные электронно-лучевые индикаторы (ЭЛИ). В памяти РМОТ хранится 100 фрагментов мнемосхем. Отклонившиеся параметры индицируются на экране красным цветом с одновременным печатанием времени и значения отклонения.

Подсистема функционально-группового регулирования описана в разд. 8.

Подсистема ФГУ (управляющие комплексы УК) построена на основе УЛУ-2ЭВМ и решает следующие задачи:

- сбор и первичная обработка информации от аналоговых и дискретных сигналов;
- выработка и выдача в УКТС команд непосредственного цифрового регулирования (НЦР);
- управление структурой и включением контуров НЦР;
- формирование заданий и изменение динамических настроек алгоритмов НЦР;
- выработка и выдача в УКТС команд включения и отключения регуляторов;
- обмен информацией с блочными УВС и др.

Функциональные группы энергоблока с ВВЭР – 1000 состоят из 5 систем:

- первого контура с ГЦН: продувки-подпитки и борного регулирования, компенсатора объема, отвода остаточных тепловыделений и др.;
- второй контур: продувка ПГ;
- вспомогательные системы второго контура: паропроводы, питательные трубопроводы и турбонасосы, деаэраторы и др.;
- спецводоочистка: установки дозирования реагентов, байпасной очистки воды первого контура и др.;
- турбоустановка: турбина с сепаратором-пароперегревателем, ПВД, конденсатор, эжектор и др.

Каждый управляющий комплекс (УК) типа УЛУ2-ЭВМ имеет 256 дискретных, 32 аналоговых входа, 128 каналов управления и включает в себя три равноценных микропроцессорных комплекта (МПК).

Управляющий сигнал формируется по принципу «2 из 3». Управляющие комплексы (всего 15) через концентраторы связаны с верхним уровнем управления (рис.1.4).

Программное обеспечение ФГУ имеет двухуровневую структуру. На нижнем уровне осуществляются сбор и первичная обработка информации, на втором – ввод (вывод) документов в базу данных ФГУ.

Управляющий режим ФГ вводится оператором с пульта.

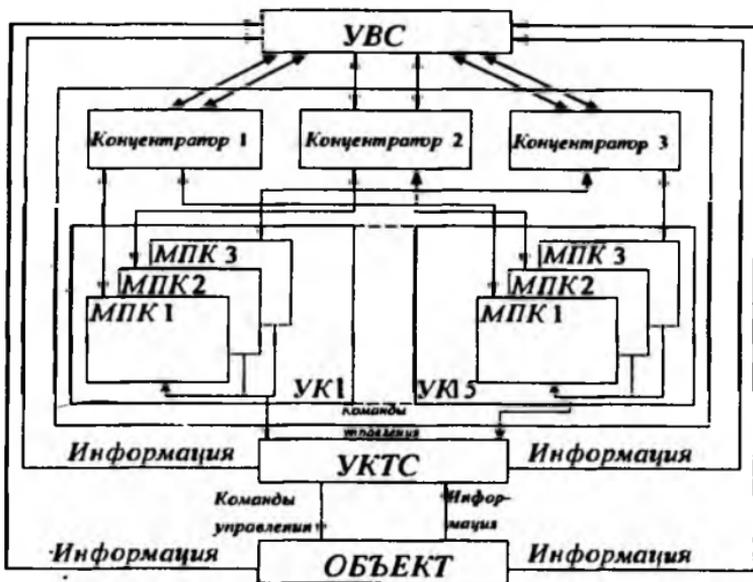


Рис.1.4. Структура связей управляющего комплекса (УК) с объектом и УВС

### 1.3. Функции АСУ ТП

Современные АСУ ТП АЭС и ТЭС являются, как правило, 2-уровневыми, в которых вычислительный комплекс выполняет следующие функции:

- контроль хода технологического процесса;
- расчет коэвенно-определяемых показателей (технико-экономические показатели, расчет энерговыделения в реакторе и др.);
- диагностика оборудования;
- регистрация предаварийных и аварийных ситуаций;
- оптимизация режима работы;
- ведение документации;
- оперативная связь с верхним уровнем управления (АСУ АЭС).

На 1-м уровне управления выполняются такие функции:

- автоматическая стабилизация параметров;
- дистанционное управление объектом с помощью оператора;
- управление функциональными группами в нормальных режимах, в режимах пуска и останова энергоблока;
- автоматические защиты, блокировки и включение резерва;
- автоматический пуск и останов энергоблока.

Поскольку функций АСУ ТП разнообразны и с энергоблока поступает огромное количество информации, то в комплекс технических средств (КТС) АСУ ТП входят информационный (ИК) и вычислительный (ВК) комплексы.

В информационном комплексе осуществляются сбор, первичная обработка и отображение информации от аналоговых и дискретных сигналов.

Устройствами отображения информации могут быть: печатающие устройства, электронно-лучевые индикаторы (ЭЛИ), цифровые приборы, аналоговые показывающие и регистрирующие приборы, сигнализаторы.

В вычислительном комплексе выполняются остальные функции.

Рассмотрим роль оператора-технолога в АСУ ТП. Он выполняет такие функции:

- выбор режима работы технических средств;
- общее наблюдение за работой оборудования и технических средств АСУ ТП с целью выявления отклонений режимов от предписанных норм и принятие мер по их устранению, а также выработка решений по повышению эффективности работы энергоблока;
- проверка готовности к пуску оборудования и технических средств АСУ ТП, выполнение с участием оперативного персонала неавтоматизированных процессов, связанных с подготовкой к начальному пуску или пуску после завершения ремонта оборудования;
- проверка состояния оборудования после аварийных отключений и принятие решений о допустимости его работы;
- выбор состава оборудования, находящегося в работе, резерве, ремонте; выбор очередности работы механизмов, предусматривающих автоматический ввод резерва;
- обнаружение неполадок в технических средствах АСУ ТП и привлечение для их устранения специалистов по обслуживанию ТС АСУ.

Основным местом управления энергоблоком является блочный щит управления (БЩУ).

На БЩУ предусмотрено постоянное присутствие следующего эксплуатационного персонала (для АЭС): заместитель начальника энергоблока и два старших инженера по управлению реактором (СИУР) и по управлению турбиной (СИУТ). Основным средством представления информации на БЩУ являются ЭЛИ, основным средством управления являются устройства ФГУ.

Аварийный останов реактора в случае выхода из строя БЩУ, а также обеспечение его безопасности, контроля и расхолаживания возможны с резервного щита управления (РЩУ). Постоянный дежурный персонал на РЩУ не предусматривается.

Надежность современных УВК, состоящих из многих устройств, еще недостаточно высокая (время наработки на отказ до тысячи часов). Поэтому для повышения надежности дублируют не только отдельные устройства, но и УВК в целом. На современных энергоблоках применяют, как правило, 2-машинный комплекс.

В таком комплексе одна из ЭВМ выполняет наиболее важные оперативные расчеты по энергоблоку, а вторая находится в состоянии "нагруженного" резерва, производя менее важные расчеты (в т.ч. длительные).

Обмен информацией между ЭВМ производится через устройство связи (УС). Каждая из ЭВМ ВК периодически проводит самопроверку путем запуска тест-программ и в случае исправности сообщает об этом второй ЭВМ. Если в течение заданного промежутка времени такой сигнал отсутствует, это воспринимается любой из ЭВМ как сигнал отказа другой. При неисправности первой ЭВМ вторая прекращает выполнение неоперативных расчетов и начинает выполнять функции первой ЭВМ. Для этого в нее из внешнего запоминающего устройства вводится копия программного обеспечения первой ЭВМ.

При отказе второй ЭВМ первая продолжает выполнять свои задачи, а вторую при этом ремонтируют.

Наработка на отказ функции оперативных расчетов при таком 2-машинном комплексе определяется вероятностью выхода из строя одновременно двух ЭВМ и рассчитывается по формуле

$$T_p = \frac{T_H^2}{2\tau_B}$$

где  $T_H$  - наработка на отказ одной ЭВМ;

$\tau_B$  - время восстановления.

В настоящее время  $\tau_B \cong 1$  ч,  $T_H = 1000$  ч, тогда получаем

$$T_p = \frac{1000^2}{2 \cdot 1} = 500\,000 \text{ ч} (\sim 55 \text{ лет}).$$

Такое  $T_p$  превосходит требуемую надежность, поэтому если упразднить ночные смены ремонтного персонала, то  $\tau_B = 6$  ч.

Тогда 
$$T_p = \frac{1000^2}{2 \cdot 6} = 83\,333 \text{ ч} (\sim 9,5 \text{ лет}),$$

что является допустимым значением.

Рассмотрим функции АСУ ТП 2 – го уровня более подробно.

### **1.3.1. Централизованный контроль и сигнализация АСУ ТП осуществляет:**

- непрерывный контроль, графическую регистрацию и сигнализацию отклонений наиболее ответственных параметров;
- контроль остальных параметров (автоматический с помощью системы обегания и по вызову оператора);
- индикацию состояния (положения) запорной арматуры и механизмов;
- контроль состояния аппаратуры управления.

Информация собирается путем опроса датчиков аналоговых и дискретных сигналов, подключенных к ЭВМ через устройства связи с объектом (УСО). Имеются устройства коммутации, в которых производится коммутация

преобразователей, масштабирование и преобразование сигналов в напряжение постоянного тока. Затем эти сигналы с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) превращаются в кодовые двоичные сигналы и заносятся в память машины.

Информация выдается операторам БЦУ на аналоговые и цифровые приборы, а также на экраны электронно-цифровых индикаторов (ЭЛИ).

Имеется шесть постов для представления информации операторам реакторного и турбинного отделений, начальнику смены энергоблока, а также оператору УВС (так называемые рабочие места оператора-технолога РМОТ).

Информация на экранах РМОТ представляется в виде форматов и гистограмм.

Форматы представлены в виде

- форматов групповой сигнализации;
- фрагментов мнемосхем;
- таблиц показаний;
- форматов сообщений.

Период обновления аналоговой информации на экранах РМОТ составляет 8-16 с, а для важных быстроизменяющихся параметров - 4 с.

Нормальные значения параметров представляются зеленым цветом, отклонения за границы контроля - изменением цвета и мерцанием символов.

### ***1.3.2. Регистрация аварийных ситуаций***

Эта функция заключается в фиксации и сохранении информации о событиях и значениях важнейших параметров в предаварийный период и в периоды развития и ликвидации аварии, а также в печати зафиксированной информации за заданный интервал времени в алфавитно-цифровой форме на бланках протоколов регистрации.

Для восстановления предыстории аварии в память ЭВМ с определенным циклом записываются важнейшие параметры и текущие события. Запись в память осуществляется по кольцевому принципу, т.е. каждый новый массив информации записывается на место самого "старого" массива. Время, в течение которого запоминается предыстория, зависит от динамических характеристик объекта (до 1 ч). При появлении аварийного сигнала программа регистрации предыстории прекращает работу, стирание "старой" информации приостанавливается, и включаются программы регистрации аварийной ситуации.

### ***1.3.3. Расчет технико-экономических показателей (ТЭП)***

Основные функции расчета и анализа ТЭП:

- первичная обработка информации и контроль ее достоверности;
- расчет и анализ ТЭП на оперативном интервале;
- расчет и анализ ТЭП на отчетных интервалах (смена, сутки, неделя, месяц);
- анализ работы вахт на отчетных интервалах.

В процессе расчёта ТЭП определяются фактические и нормативные показатели, а также перерасходы тепла по отдельным составляющим.

В число показателей включены: производительность (мощность) агрегатов, удельные расходы тепла, отдельные виды потерь, расходы тепла и электроэнергии на собственные нужды. Поэлементный расчет и анализ ТЭП предусматриваются не только для основного оборудования, но также для крупного вспомогательного оборудования (конденсационные установки, регенеративные подогреватели, питательные турбоустановки и др.).

Особенности расчета ТЭП

В связи с отсутствием контроля расхода теплоносителя в 1-м контуре тепловая мощность реактора

$$Q_P = Q_{П} + Q_{ПР} + Q_{ОС} + Q_{ПК} - Q_{ГЦН},$$

где  $Q_{П}$  - теплота, полученная в парогенераторе;

$Q_{ПР}$  - потери теплоты с водой продувки 1-го контура;

$Q_{ПК}$  - то же с водой промконтура;

$Q_{ОС}$  - то же в окружающую среду;

$Q_{ГЦН}$  - теплота, вносимая в контур за счет работы ГЦН.

Тепловая мощность ПГ

$$Q_{ПГ} = D_{П} h'' + D_{ПР} h' - D_{ПВ} h_{ПВ},$$

где  $D_{П}, D_{ПР}, D_{ПВ}$  - массовый расход пара, продувочной и питательной воды;

$h'', h', h_{ПВ}$  - энтальпия насыщенного пара, насыщенной и питательной воды.

Поскольку расход насыщенного пара измеряется с большой погрешностью, то

$$D_{П} = D_{ПВ} - D_{ПР}.$$

Величины  $D_{ПВ}$  и  $D_{ПР}$  определяются по результатам измерений соответствующих расходомеров с учетом поправки на изменение плотности воды от номинального значения. Значения энтальпии и плотности пара и воды определяются по специальным аппроксимирующим уравнениям в функции давления и температуры.

Теплота от ГЦН принимается равной их электрической мощности. Значения  $Q_{ПР}$  и  $Q_{ПК}$  определяются как произведения расходов на разность энтальпий подаваемой и уходящей воды.

Значение  $Q_{ОС}$  определяется на основании тепловых испытаний и обычно принимается постоянной.

#### 1.4. Недостатки существующих АСУ ТП и перспективы их развития

К недостаткам находящимся в эксплуатации АСУ ТП относятся:

1. Отсутствие унификации технических средств. Вся система управления содержит ряд подсистем и спецсистем, выполняемых организациями различных ведомств на элементно-конструктивной базе общепромышленного применения. Каждая из систем реализуется на своей элементно-конструктивной базе. Такое многообразие типов технических средств приводит к аппаратурной избыточности, увеличению затрат на запчасти, обслуживание, особенно в периоды пуска системы.
2. Унифицированный комплекс технических средств, размещается централизованно, связь между этой аппаратурой и датчиками, исполнительными механизмами осуществляется проводами, что приводит к большим затратам дефицитной кабельной продукции (около 20 тыс. километров кабеля).
3. Иерархическое распределение по трем уровням функций управления и централизация функции непосредственного управления и обработка в верхнем уровне системы (второй уровень УЛУ2-МПК, третий уровень - комплекс "Титан - 2-М") приводят к излишним аппаратурным затратам и снижению надежности системы (поскольку недоиспользуются возможности аппаратуры первого уровня и требуется создание специальных технических средств для реализации управления второго уровня (УЛУ2-МПК)).
4. Недостаточный уровень обеспечения надежности и отказоустойчивости АСУ ТП и безопасности энергоблока. Отказоустойчивость системы обеспечивается за счет введения структурной избыточности и встроенной диагностики средств. Силовая аппаратура управления исполнительными механизмами (магнитные пускатели, реле) применяется без дублирования и без средств диагностики и контроля, что снижает надежность и отказоустойчивость системы управления в целом.

Указанные выше недостатки существующей АСУ ТП приводят к значительному возрастанию объема аппаратуры (аппаратура АСУ ТП серийного энергоблока 1000 МВт занимает более 800 шкафов, что в 5-8 раз превышает объем аппаратуры на аналогичном энергоблоке во Франции). Кроме того, растут затраты при пуске и эксплуатации систем и затягиваются сроки вывода энергоблока на проектную мощность.

При разработке перспективной АСУ ТП необходимо использовать современные методы управления и синтеза многоуровневых иерархических систем с использованием высокопроизводительных мультипроцессорных комплексов.

Следует отметить, что несмотря на развитие новых методов управления, создание широкой номенклатуры средств автоматики и компьютерной техники, новых технологий программирования, в настоящее время по существу нет общепризнанной методики разработки АСУ ТП АЭС.

Практически в проектной работе создание структуры системы управления является творческим процессом, выполняемым системным аналитиком. При этом в разработке больших программных комплексов сложилось две методики структуризации: "сверху вниз" и "снизу вверх".

Первый метод, хорошо отработанный, заключается в последовательном разложении (декомпозиции) глобальной функции управления на подфункции с определенными ограничениями на связи между компонентами разложения. Разложение осуществляют до уровня задач, которые могут быть решены простыми программными модулями.

Второй метод заключается в последовательном слиянии (композиции) простых программных модулей в более сложные, пошаговую их проверку и сопоставление с известной промежуточной подфункцией; дополнение полученного набора недостающими подфункциями, затем осуществляется новая композиция и т.д., пока не будет достигнута заданная глобальная функция.

Практика проектирования "снизу вверх" привела к разработке в рамках АСУ ТП отдельных подсистем, например технологических защит, управления, контроля и др. Однако такая методика проектирования потенциально чревата избыточностью. Например, для энергоблока АЭС число датчиков одного и того же параметра для различных подсистем достигает двадцати и выше (контроль нейтронного потока, уровня в ПГ). Такая избыточность не только повышает стоимость АСУ ТП, но и снижает реальную надежность за счет ухудшения технологического обслуживания датчиков из-за их многочисленности. Ниже излагаются некоторые аспекты проектирования "сверху вниз". Практика создания сложных систем управления, таких как АСУ ТП АЭС, показывает, что структура системы управления должна учитывать: структуру объекта управления, особенности технологического оборудования, правила его эксплуатации, специфику сопряжения его с другими компонентами объекта и интерфейса с оператором и обслуживающим персоналом; особенности технологических процессов и их динамику, режимы работы объекта, роль и место оператора в управлении. Энергоблок АЭС содержит такие компоненты:

- а) основное оборудование и материальные потоки;
- б) вспомогательное оборудование и материальные потоки (смазка и охлаждение оборудования, вентиляция и др.);
- в) оборудование, обеспечивающее подготовку основного оборудования к работе (загрузка, выгрузка);
- г) оборудование для локализации аварий.

При возрастании мощности энергоблоков существенно возрастает объем вспомогательного оборудования и материальных потоков (компоненты б и в), которые являются, как правило, дискретными. Поэтому динамика и методы управления основным оборудованием оказывают не столь существенное влияние на структуру системы. Методика разработки структуры АСУ ТП должна базироваться не столько на теоретическом синтезе (как, например, в

теории логических устройств), сколько на искусстве системного анализа, который на основе анализа структуры объекта и особенностей технологии перестраивает отображение структуры объекта в структуру системы управления, определяет компоненты структуры как блока управления технологическими системами, процессами, агрегатами, исполнительными механизмами, выбирает средства и способы взаимодействия компонент, определяет роль и функции человека - оператора.

При таком подходе основными средствами выработки структуры являются генерация вариантов и их анализ на эффективность. Для точной постановки задачи анализа структуры или ее компонент разрабатывается модель алгоритмов (задач) отдельных компонент. При этом модель должна учитывать методы управления, принятые в сложной системе (по событию и (или) по состоянию), особенности взаимодействия задач (параллелизм и приоритеты) и участие человека (интерактивность) и базироваться на свойствах и особенностях объекта, важных с точки зрения управления.

Как уже указывалось, современные АСУ ТП строятся как распределенные и децентрализованные на основе декомпозиции алгоритмов контроля и управления на компоненты в соответствии с естественным разбиением технологических функций объекта и алгоритмов контроля и управления энергоблоком (по горизонтали) и в соответствии с разбиением алгоритмов управления по иерархическим уровням (по вертикали). В серийном энергоблоке 1000 МВт принято разбиение алгоритмов по вертикали по трем иерархическим уровням:

- 1-й уровень: защиты и блокировки, первичная обработка аналоговых и дискретных сигналов, локальные регуляторы, отработка команд на исполнительные механизмы;
- 2-й уровень: функционально-групповое управление и информационная поддержка оператора;
- 3-й уровень: алгоритмы управления энергоблоком в целом.

Следует отметить, что в современных АСУ ТП фактически не соблюдается иерархическая соподчиненность алгоритмов в управлении по вертикали, как это должно быть в многоуровневых системах.

В перспективных системах представляется возможным отказаться от жесткого вертикального разбиения алгоритмов управления по иерархическим уровням и принять реализацию в виде одно-, двухуровневых управляемых структур контроля и управления. Это возможно в силу того, что основное оборудование и вспомогательные системы предусматривают управление по "событию" (аварийные и технологические защиты). При этом задается ряд пороговых значений параметров, состояний рабочих органов агрегатов, и переход от одного порогового значения к другому составляет событие. В технологических системах и подсистемах осуществляется также управление по состоянию (обычно стабилизация отдельных параметров с помощью регуляторов воздействием на регулирующие органы).

Блоки управления по состоянию работают параллельно с событийными блоками, которые выполняют роль “сторожей” в процессе функционирования энергоблока. При этом соблюдается приоритет выполнения функций.

Горизонтальное разбиение функций алгоритмов контроля и управления должно обеспечивать по возможности функциональную и территориальную децентрализацию и минимальный интерфейс между подфункциями и реализующими их блоками.

Функциональную структуру системы управления энергоблоком можно представить системой следующих параллельно работающих блоков управления технологическими группами (СУТГ) и подсистем (рис. 1.3):



Рис. 1.4. Функциональная структура АСУ ТП

- управляющие системы безопасности (УСБ) каналов 1, 2, 3 (аварийный впрыск бора и др.);
- система управления и защиты реактора (СУТГ<sub>4</sub>);
- вспомогательные системы реакторного отделения (СУТГ<sub>5</sub>);
- системы управления турбиной и вспомогательным оборудованием машинного отделения (СУТГ<sub>6</sub>);
- системы управления генератором и электрическим оборудованием (СУТГ<sub>7</sub>);
- управление технологическими системами спецкорпуса (СУТГ<sub>8</sub>);
- центральная база данных (ЦБД);
- подсистема отображения информации;
- системы регистрации аварийных событий (РАС);
- подсистема расчетов и оптимизации;
- подсистема диагностики оборудования и процессов;
- подсистема анализа состояния и прогноза макроситуаций на основе базы знаний и экспертной системы.

Информационные функции в каждой технологической группе реализуются с помощью локальной базы данных (ЛБД).

Параллельная и независимая работа подсистем осуществляется на основе единой системы коммуникаций и обеспечивает автономность и живучесть систем.

Общая схема управления энергоблоком в одноуровневой структуре выглядит следующим образом.

Каждая подсистема управляет своей технологической системой. События, возникающие в технологической подсистеме, поступают через систему коммуникаций локальной управляющей сети (ЛУС) в соответствующие блоки системы, в локальную и центральную базы данных.

Система поддержания операторского интерфейса выдает информацию оператору и раздает команды от оператора.

Система расчетов и оптимизации вырабатывает рекомендации по режимам работы энергоблока, значения уставок для регуляторов и логических автоматов.

Система диагностики ведет анализ состояния процессов и оборудования и дает сообщения оператору и в систему управления станции.

Система анализа макроситуаций на основе экспертной информации осуществляет вероятностный прогноз состояния процессов и динамики их развития и выдает советы оператору.

Структурная схема комплекса технических средств перспективной АСУ ТП изображена на рис.1.5. Такая АСУ строится как совокупность локальных сетей программируемых контроллеров ПК с подчиненными им микросетями исполнительных автоматов ИА и микропроцессорных локальных регуляторов (МЛР). Каждая локальная сеть включает хотя бы одну координирующую станцию (КС) на базе высокопроизводительных микроЭВМ, а ПК включает набор устройств связи с объектом (УСО) дискретного и аналогового ввода-вывода. Из таких унифицированных локальных сетей строят любые подсистемы управления и контроля. Координирующие станции локальных сетей соединяются через коммутатор в локальную сеть энергоблока.

В качестве главных вычислительных систем применяют высокопроизводительные мультипроцессорные комплексы типа МПК.

На БЦУ выделяются отдельно дисплеи и панели безопасности, организуется рабочее место специалиста по ликвидации аварийных ситуаций. Систему типа "черный ящик" строят с троированием внешней памяти на магнитных дисках типа "Винчестер" и магнитных лентах.

В перспективной АСУ особое внимание должно быть уделено исполнительным механизмам (ИМ), которых в энергоблоке около 4500. Статистика показывает, что на ИМ приходится 42 % отказов, вызвавших останов энергоблока. Основная причина отказов - неправильный выбор режимов эксплуатации. Для управления ИМ используются релейно-контактная аппаратура и управление с применением широтно-импульсной модуляции. Такое регулирование требует частых коротких включений электродвигателей

(600 - 1000 в час), что заставляет работать их постоянно в пусковых режимах с токами, в 8-10 раз превышающими номинальные. Это приводит к выбору в 3-4 раза более мощных двигателей.

В перспективной АСУ предусмотрено использовать принципиально новые способы управления асинхронными электроприводами, позволяющие на порядок повысить надежность и в 2-3 раза сократить энергопотребление и металлоемкость.

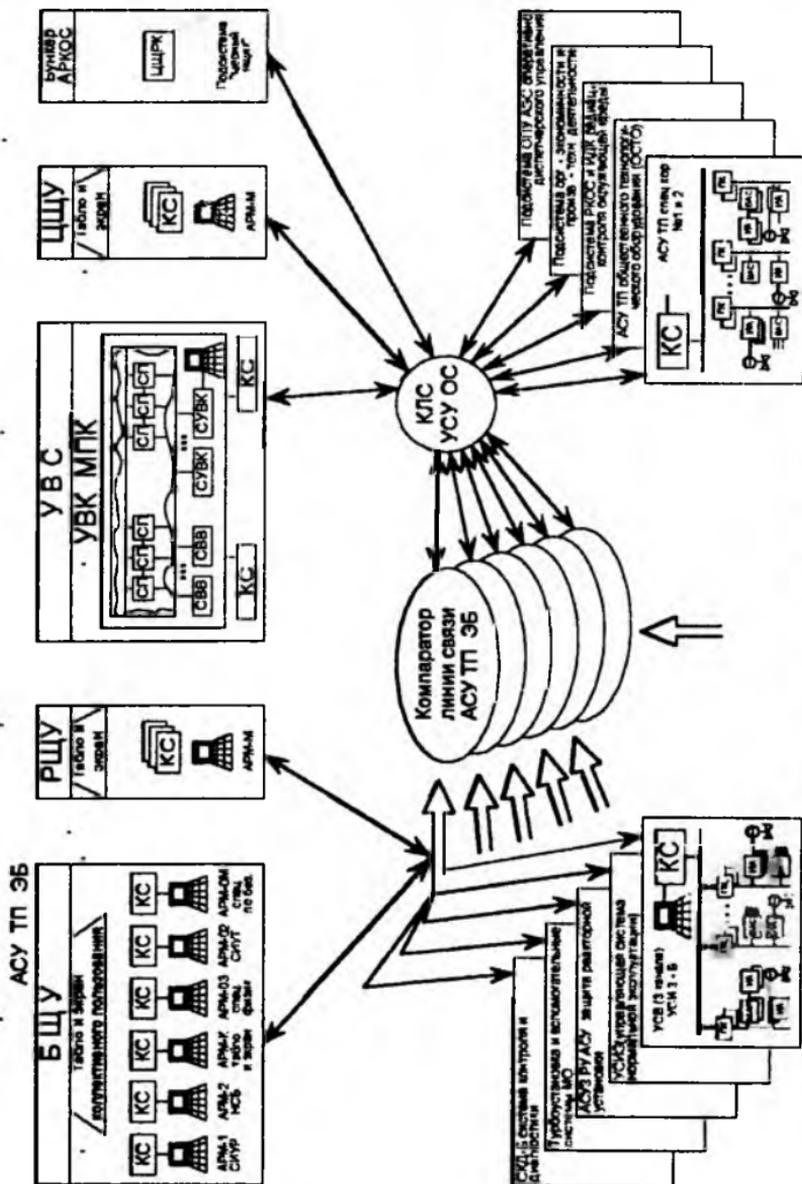


Рис. 1.5. Структурная схема комплекса технических средств АСУ ТП

## **2. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ РЕАКТОРА**

### **2.1. Требования к системе СУЗ**

Система предназначена для оперативного контроля за ходом цепной реакции в реакторе и управления этим процессом в следующих режимах: первоначальная загрузка и перегрузка топлива, пуск и вывод реактора на мощность, работа на мощности и изменение заданной мощности, регламентная или аварийная остановка реактора.

В стационарном режиме мощность реактора должна соответствовать заданному значению, коэффициент размножения должен быть равен единице, а реактивность - нулю. Однако при эксплуатации реактора коэффициент размножения изменяется по ряду причин. Изменение температуры теплоносителя и топлива приводит к изменению реактивности из-за температурного эффекта. При изменении уровня мощности изменяется отравление ксеноном (равновесное и максимальное отравление). При длительной работе реактора топливо выгорает и накапливаются шлаки.

В случае применения выгорающих поглотителей их концентрация со временем уменьшается.

Система регулирования должна компенсировать все изменения реактивности, обусловленные упомянутыми причинами. При этом переходный процесс регулирования должен отвечать заданным требованиям при действии определенных видов возмущений.

Управляющими воздействиями могут быть:

- введение (выведение) в активную зону топлива;
- изменение поглощения нейтронов;
- изменение утечки нейтронов.

В современных энергетических реакторах используется метод поглощения нейтронов. Поглотители могут быть твердыми (стержни) и жидкими, растворенными в теплоносителе (борное регулирование для ВВЭР).

### **2.2. Состав и структура АСР мощности**

В систему регулирования мощности реактора должны входить: система контроля мощности реактора, автоматический регулятор и органы управления. По способу формирования сигнала мощности различают:

- системы регулирования плотности нейтронного потока;
- системы регулирования тепловых параметров;
- комбинированные АСР.

По способу регулирования пространственного распределения мощности:

- системы регулирования интегральной мощности;
- системы регулирования локальной мощности;

- комбинированные АСР.

Поток нейтронов характеризует тепловую мощность реактора с точностью до 8 %. Более точно можно измерить мощность реактора, зная расход теплоносителя  $G$  и разность температур на входе и выходе  $\Delta t$ , т.е.  $N_p = GC_p \Delta t$ . Такой метод отличается хорошей статической точностью, но имеет недостаток - большую инерционность. Для кипящих реакторов сигналом мощности может быть давление пара, изменение которого свидетельствует о небалансе между производством и потреблением энергии.

На малых мощностях сигналы теплотехнических параметров не представительны, поэтому системы регулирования для малых уровней мощности работают только по сигналам ионизационных камер.

В связи с тем, что ионизационные камеры со временем выгорают, а также из-за влияния на их показания содержания борной кислоты в теплоносителе, распределения энерговыделения по объему активной зоны и температуры самой камеры, коэффициент пропорциональности между мощностью реактора и сигналом камер со временем изменяется. Поэтому на больших уровнях мощности для повышения статической точности применяется регулирование по теплотехническим параметрам или комбинированные схемы.

В случае регулирования по нейтронному потоку требуется периодическая корректировка значения заданной величины тока камер в соответствии с действительной тепловой мощностью реактора.

Системы регулирования локальной мощности применяются в реакторах больших размеров (типа РБМК), где возможны пространственные перекосы поля энерговыделения. Ко всем системам регулирования мощности реактора предъявляется требование высокой надежности.

Рассмотрим особенности динамических свойств реактора. Если не учитывать в реакторе наличие обратных связей по температурному эффекту и отравлению, то такой реактор "нулевой" мощности является неустойчивым объектом. Однако при работе реактора в составе энергетической установки проявляется температурный эффект реактивности по топливу, теплоносителю, замедлителю, вследствие чего реактор становится устойчивым объектом. На рис.2.1 показан характер изменения мощности реактора при возмущении перемещением регулирующих стержней.

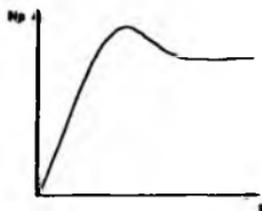


Рис. 2.1. Изменение мощности при перемещении стержней

Влияние температурной обратной связи существенно зависит от уровня мощности реактора. По мере снижения мощности влияние обратной связи постепенно сводится к нулю.

Второй особенностью реактора является его нелинейность. Коэффициент передачи реактора пропорционален плотности нейтронов, на которой он работает. Поэтому контур регулирования должен иметь устройство, устраняющее указанную зависимость.

На динамические свойства реактора существенное влияние оказывает концентрация борной кислоты в теплоносителе.

В начале кампании реактора содержание борной кислоты в теплоносителе максимальное, а самовыравнивание слабое.

По мере уменьшения концентрации борной кислоты самовыравнивание возрастает.

Выбор структуры АСР мощности реактора диктуется многими причинами: назначением и конструкцией реактора, динамическими свойствами реактора и энергоблока в целом, технологической схемой энергоблока, типом возмущающих воздействий и режимом работы энергоблока в энергосистеме.

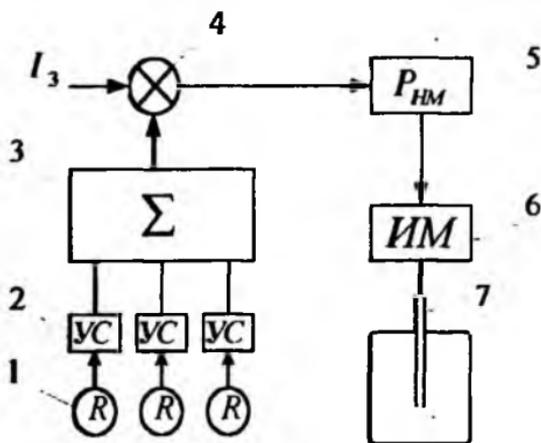


Рис. 2.2. Структурная схема АСР мощности

АСР интегральной плотности нейтронного потока изображена на рис.2.2.

Сигнал от ионизационных камер 1, усиленный аппаратурой контроля нейтронного потока 2, через сумматор 3 поступает на элемент сравнения 4. В последнем вырабатывается сигнал, пропорциональный отношению

$$U = \frac{I - I_3}{I_3} = \frac{N - N_3}{N_3}, \quad (2.1)$$

где  $I, I_3$  - действительный и заданный токи камеры;

$N, N_3$  - действительная и заданная плотности нейтронов.

Реализация сигнала  $U$  вида (2.1) осуществляется подачей на задатчик сигнала логарифма тока ионизационных камер. В этом случае при малых отклонениях  $I$  и  $I_3$  в задатчике вырабатывается сигнал

$$\ln I - \ln I_3 = \ln \frac{I}{I_3} = \ln \left( 1 + \frac{I - I_3}{I_3} \right) \approx \frac{I - I_3}{I_3}. \quad (2.2)$$

Сигнал с задатчика поступает на регулятор РНМ 5, где вырабатывается сигнал управления исполнительным механизмом ИМ 6, перемещающим управляющие стержни 7. Обычно для регулирования плотности нейтронного потока используется интегральный закон регулирования (совместно с ИМ).

Регулирование мощности самого реактора играет в АСР энергоблока подчиненную роль. Назначение энергоблока - выработка электроэнергии заданного качества при работе энергоблока в базовом или регулирующем режиме. Поэтому АСР мощности реактора входит в состав АСР энергоблока.

Структура и работа последней будут рассмотрены специально. Поэтому в данной теме рассмотрим кратко назначение, устройство и работу основных структурных элементов АСР мощности: системы контроля мощности реактора, исполнительного механизма, регулирующих органов и регулятора мощности применительно к реактору типа ВВЭР-1000.

### 2.3. Принципы измерения ядерного излучения

Как было показано ранее, около 92% тепловой энергии выделяется мгновенно при делении ядер горючего. Поскольку число делений ядер пропорционально потоку нейтронов, следовательно, генерация тепла также пропорциональна потоку нейтронов.

Рассмотрим ионизационный метод регистрации ядерных излучений. Различают заряженное излучение ( $\alpha, \beta$  - частицы), электромагнитное излучение ( $\gamma$  - кванты) и электронейтральное - нейтронное излучение. Заряженное излучение ионизирует атомы в столкновениях с электронами. Для детектирования ядерных излучений применяют газонаполненные приборы с двумя вмонтированными электродами, к которым подводится электрическое напряжение (рис. 2.3).

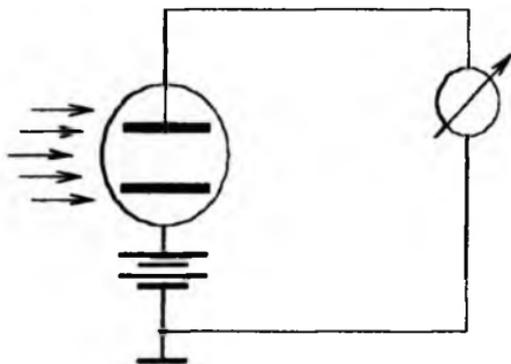


Рис.2.3. Принципиальная электрическая схема газонаполненного детектора

Под действием излучения газ ионизируется и между электродами течет ток. Величина силы тока при газовом разряде зависит от приложенного напряжения, потока ионизирующих частиц и их ионизирующей способности. Зависимость разрядного тока от напряжения, приложенного к электродам (при постоянстве излучения), называется вольт-амперной характеристикой (рис. 2.4).

На I участке, называемом областью закона Ома, ток пропорционален приложенному напряжению. На этом участке не все ионы, образованные в газе, достигают электродов. Часть ионов рекомбинирует, т.е. при столкновении положительных и отрицательных ионов они превращаются в нейтральные атомы и молекулы. Участок II называется областью насыщения, ток почти постоянен.

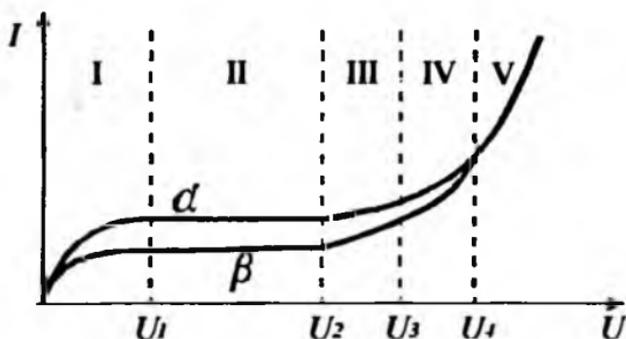


Рис. 2.4. Вольт-амперная характеристика ионизационного детектора

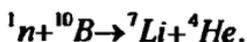
При напряжении  $U > U_2$  подвижные электроны ускоряются под действием приложенного напряжения до такой кинетической энергии, которая приводит к вторичной ионизации газа. Это область газового усиления. В III области

газовое усиление не зависит от величины первичной ионизации, в IV - начинает зависеть. При  $U > U_4$  для возникновения газового разряда достаточно появиться в детекторе хотя бы одной ионной паре, происходит "пробой" между электродами. Это участок Гейгера-Мюллера. Участки I-IV являются участками самостоятельного разряда, так как ток прекращается с прекращением излучения. Для детектирования излучения используются лишь II, III и V области характеристики. При этом интенсивность излучения измеряется по среднему значению ионизационного тока или подсчетом числа импульсов ионизированного газа. Соответственно различают два режима работы камеры: токовый и импульсный.

Во II области работают ионизационные камеры. Детектирование заряженных частиц происходит вследствие непосредственной ионизации этими частицами газа, наполняющего камеру.  $\beta$ -излучение ионизирует газ за счет вторичных электронов, образующихся при взаимодействии  $\gamma$ -квантов со стенками камеры.

Для детектирования тепловых нейтронов используются вторичные эффекты - образование заряженных частиц в результате реакции радиационного захвата нейтронов либо реакций деления.

Так, если положительные пластины камеры покрыть трехфтористым бором  $\text{BF}_3$ , содержащим изотоп  $^{10}\text{B}$ , то протекает следующая реакция:



Изотоп  $^4\text{He}$  является газообразной  $\alpha$ -частицей.

В камерах деления поверхности пластины положительного электрода покрываются делящимся нуклидом, например  $^{235}\text{U}$ . При облучении камеры потоком тепловых нейтронов происходит деление ядер  $^{235}\text{U}$  с образованием осколков, которые вызывают ионизацию газа, наполняющего камеру. Вследствие большой энергии осколков деления ( $\sim 200$  МэВ) по сравнению с энергиями других ионизирующих частиц ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) ионизация, вызванная осколками деления, оказывается в несколько десятков раз больше, чем от других частиц. С помощью амплитудного дискриминатора удастся отделить импульсы от нейтронов.

Из сказанного выше следует, что ионизационные камеры с борным покрытием регистрируют как нейтроны, так и  $\gamma$ -частицы. На больших уровнях мощности ток от  $\gamma$ -излучения составляет незначительную долю в общем токе камеры и им можно пренебречь. Однако на пониженных мощностях реактора ток от  $\gamma$ -излучения становится соизмеримым с током от нейтронного потока. Поэтому для дискриминации сигнала от  $\gamma$ -излучения применяют так называемые компенсированные камеры (рис. 2.5).

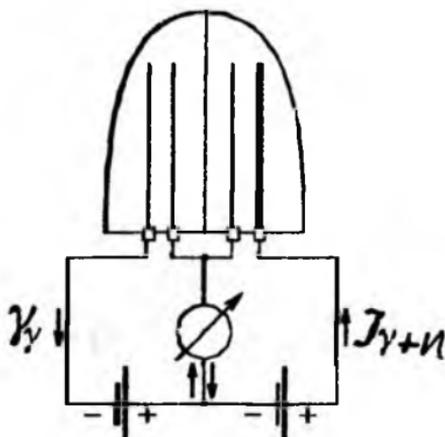


Рис. 2.5. Принципиальная электрическая схема компенсированной ионизационной камеры

Камера имеет два объема, объемы разделены тремя электродами и электрически соединены так, что имеют общий электрод-коллектор и два других - положительный и отрицательный. Прибор, измеряющий ток, включен последовательно с коллектором. Одна камера имеет борное покрытие и чувствительна как к нейтронному, так и к  $\gamma$ -излучению. Вторая камера не имеет борного покрытия (заполнена газом  $Kr$ ) и реагирует только на  $\gamma$ -излучение. Суммарный ток от  $\gamma$ -излучения равен нулю.

Пример маркировки детекторов:

КНК-57 - камера нейтронная компенсированная;

КНТ-8 - камера нейтронная (деления) с твердым покрытием.

Цилиндрические ионизационные камеры имеют диаметр 50 мм. Длина для рабочих - 245 мм, для пусковых - 750 мм.

Пропорциональные счетчики работают в области газового усиления (III - область вольт-амперной характеристики). Для детектирования тепловых нейтронов счетчики наполняют газом  $BF_3$ , а быстрых - водородом.

Счетчик представляет собой цилиндр с торцовыми изоляторами, по оси которого натянута металлическая нить - собирающий электрод. Напряжение питания до 1000 В. Счетчики применяют для контроля реактора в диапазоне источника (при перегрузке топлива).

## 2.4. Измерительные каналы детекторов

В соответствии с различными режимами работы реактора каналы контроля нейтронного потока разделены на отдельные подсистемы: пусковые каналы; каналы контроля реактора на энергетических уровнях мощности; каналы аварийной защиты.

Диапазон контроля разделен на три поддиапазона: источника, промежуточный, энергетический. Основные технические характеристики аппаратуры контроля нейтронного потока типа АКНП 3 приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Характеристики АКНП 3

Наименование параметра	Диапазон		
	источника	промежуточн.	энергетич.
Диапазон изменения плотности потока тепловых нейтронов, $n/m^2 \cdot c$	$10^3 \div 10^8$	$10^6 \div 10^{11}$	$5 \cdot 10^9 \div 3 \cdot 10^{12}$
Нейтронная мощность, %	$10^8 \div 10^{-2}$	$10^{-3} \div 10$	$0.2 \div 120$
Диапазон изменения периода T, с	$999 \div 10$	$999 \div 10$	$999 \div 10$

Детекторы контроля мощности устанавливаются за пределами активной зоны (между корпусом и защитой) по следующим причинам:

- находясь вне реактора, детекторы регистрируют нейтроны утечки, которые пропорциональны среднему потоку нейтронов в реакторе, а следовательно, мощности реактора. Для лучшего усреднения потока нейтронов утечки обычно устанавливают несколько детекторов (для ВВЭР-1000 - три) симметрично относительно оси реактора вблизи центральной горизонтальной плоскости;
- в местах установки детекторов вне реактора плотность потока нейтронов на 3-4 порядка ниже, чем в активной зоне, что приводит к меньшему выгоранию чувствительного элемента детекторов (бора или урана) и меньшему влиянию излучения на электрическую изоляцию;
- в месте установки детекторов нет существенных ограничений габаритных размеров;
- более благоприятные температурные условия работы детекторов.

В качестве детекторов используются счетчики, ионизационные камеры с компенсацией  $\gamma$ -фона и обычные ионизационные камеры.

Для регистрации сигналов детекторов используют токовый и импульсный методы. В пусковом режиме плотность потока нейтронов изменяется в реакторе

в пределах значений от  $(10^{-10} - 10^3) \frac{H}{cm^2 \cdot c}$  до  $(10^{10} - 10^{12}) \frac{H}{cm^2 \cdot c}$ , поэтому необходимо применение различных типов детекторов и каналов измерения (импульсных, токовых).

Система регулирования мощности начинает работать при плотности потока нейтронов выше  $(10^{10} - 10^{12}) \frac{H}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ , поэтому в качестве детекторов нейтронов могут быть использованы компенсированные и некомпенсированные ионизационные камеры.

Типовые схемы токовых каналов измерения нейтронного потока изображены на рис.2.6.

На рис.2.6,а изображена схема непосредственного измерения тока детектора 1 с гальванометром 3 и переключателем диапазонов работы 2. На рис.2.6,б изображена схема с детектором и автоматическим показывающим и регистрирующим прибором 4 с переключателем диапазонов 2. На рис.2.6,в изображена схема измерения в системе защиты реактора по превышению мощности. Ток детектора 1 сравнивается в устройстве 5 с током заданной мощности  $I_{\text{зд}}$ , сигнал разбаланса усиливается усилителем постоянного тока (УПТ) 6 до значения, необходимого для срабатывания триггерного устройства и работы показывающего устройства 7. Схема рис.2.6,г используется для получения информации о мощности в логарифмическом масштабе и о периоде  $T$ . Схема содержит логарифматор 8, показывающий прибор с логарифмической шкалой 9, дифференциатор 10, показывающий прибор с гиперболической шкалой 11. Кроме того, выходы измерительного канала обычно используются в системе защиты по периоду 12 и в системе автоматического пуска 13. Логарифмирование и дифференцирование сигнала детектора используются для измерения периода реактора  $T$ . Это можно пояснить следующим образом. При внесении положительной реактивности  $\rho$  изменение плотности нейтронов в реакторе можно приближенно описать выражением

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\beta}{\beta - \rho} \exp\left(\int_0^t \frac{d\tau}{T}\right), \quad (2.3)$$

где  $\beta$  - доля запаздывающих нейтронов;

$\tau$  - время;

$T$  - период реактора;

$N_0$  - плотность нейтронов в установившемся состоянии.

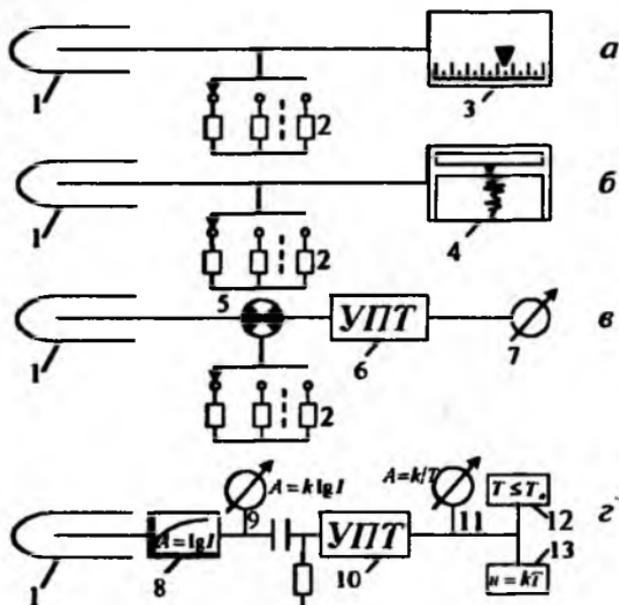


Рис. 2.6. Типовые схемы токовых каналов

Так как ток детектора приблизительно пропорционален плотности нейтронов, то можно записать

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\beta}{\beta - \rho} \exp\left(\int_0^t \frac{d\tau}{T}\right). \quad (2.4)$$

Если прологарифмировать (2.4), то получим

$$\ln I - \ln I_0 = \ln \frac{\beta}{\beta - \rho} + \int_0^t \frac{d\tau}{T}. \quad (2.5)$$

Если  $\rho = const$ , то  $T = const$  и из последнего выражения получаем

$$\ln \frac{I}{I_0} = \ln \frac{\beta}{\beta - \rho} + \frac{\tau}{T}. \quad (2.6)$$

Таким образом, при постоянной положительной реактивности логарифм тока детектора изменяется во времени по линейному закону. Скорость изменения определяется величиной внесенной реактивности  $\rho$ .

Если продифференцировать (2.5), то при медленном изменении  $\rho$  можно считать, что

$$\frac{d}{d\tau} \left( \ln \frac{\beta}{\beta - \rho} \right) \approx 0 \quad (2.7)$$

и тогда

$$\frac{d \ln I}{d \tau} = \frac{1}{T}, \quad (2.8)$$

т.е. на выходе дифференциатора получаем сигнал, обратно пропорциональный периоду.

Рассмотрим импульсный метод измерения нейтронного потока. Как было показано, детектор регистрирует как нейтроны, так и  $\gamma$ -кванты. Однако поскольку напряжение на емкости детектора от нейтрона больше, чем от  $\gamma$ -кванта, то можно с помощью амплитудного дискриминатора выделить импульсы, образованные только нейтронами. Амплитудный дискриминатор - это усилитель, который пропускает на выход только те импульсы, которые выше некоторого заданного уровня напряжения.

Рассмотрим вопрос максимальной скорости счета детектора. При попадании заряженной частицы в детектор образуются свободные электроны и ионы. Поскольку электроны имеют меньшую массу, то они первыми достигают положительного электрода и определяют формирование начального фронта импульса. Время собирания электронов  $\tau_2$  составляет 0,1-0,2 мкс. Затем приходят положительные ионы на отрицательный электрод, так что общая длительность импульса составляет несколько миллисекунд. При достижении плотности потока  $10^8 - 10^9$  н/м<sup>2</sup>с детектор переходит в токовый режим.

Если предположить, что импульсы с детектора идут равномерно один за другим, то при длительности импульса  $\tau_{имп}$  максимальная частота импульсов составляет

$$f_{max} \leq \frac{1}{\tau_{имп}} \approx 1000 \text{ имп/с}$$

Действительная частота счета из-за наложения импульсов будет меньше. Для расширения диапазона измерений частоты следования импульсов используют только начальный фронт сигнала детектора, а остальное "срезают" путем дифференцирования. Длительность импульса при этом составляет примерно  $2\tau_2 \approx 0,4$  мкс, что позволяет получить

$$f_{max} \leq \frac{1}{2\tau_2} \approx 2\,500\,000 \text{ имп/с}$$

Скорость счета измерительных каналов на АЭС составляет  $10^4 - 10^5$  имп/с.

Схема импульсных каналов измерения изображена на рис.2.7. Во всех измерительных каналах имеется детектор 1, предусилитель 2 и импульсный усилитель 3 с амплитудным дискриминатором и формирователем. Предусилитель предназначен для предварительного усиления импульсов детектора перед подачей их в линию связи к импульсному усилителю. Для уменьшения влияния на амплитуду импульса емкости кабеля предусилитель располагают непосредственно около подвески камеры.

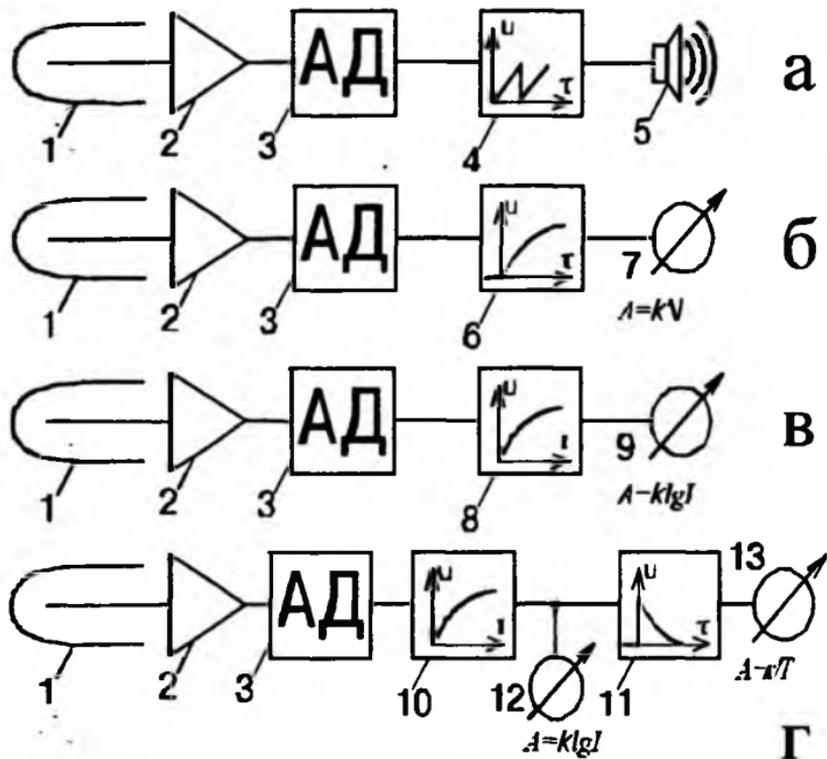


Рис. 2.7. Схемы импульсных каналов измерения, контроля и защиты

Канал на рис. 2.7,а позволяет подсчитывать с помощью пересчетного устройства 4 количество нормализованных импульсов и через определенное количество импульсов подавать импульс на устройство выдачи звукового сигнала 5.

Канал на рис. 2.7,б позволяет измерять скорость счета нормализованных импульсов (до  $10^5$  имп/с) с помощью аналогового прибора 7 с предвключенным аperiodическим звеном 6. При этом рабочий диапазон канала составляет 5 декад. Если в цепи установить логарифмический преобразователь 8, то можно по одной шкале прибора 9 измерять скорость счета до пяти декад (рис. 2.7,в).

Канал, изображенный на рис. 2.7,г, содержит логарифматор 10, дифференциатор 11, показывающие приборы 12 и 13, предназначен для измерения скорости и периода реактора.

## 2.5. Автоматический регулятор мощности (АРМ)

Регулятор АРМ-5С применяется на блоках ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 и предназначен для поддержания в заданных пределах нейтронной мощности и давления пара перед турбиной. Регулирующим воздействием во всех режимах является перемещение регулирующих стержней реактора.

АРМ работает в следующих режимах:

- режим "Н" - астатическое поддержание нейтронной мощности реактора в диапазоне  $(3 \div 20)\% N_{НОМ}$  с зоной нечувствительности  $\pm 1,5\%$  относительно заданного уровня. Заданным уровнем мощности является уровень мощности на момент включения регулятора в режим "Н";
- режим "Т" - астатическое поддержание давления в главном паровом коллекторе (ГПК) с зоной нечувствительности 49 кПа. Диапазон уставки по давлению - от 5,4 до 7,2 МПа;
- режим "С" - стерегущий режим ограничения давления второго контура при повышении давления на 196 кПа от заданного. При этом формируется команда на уменьшение мощности реактора;
- режим "К" - компромиссный (для некоторых модификаций АРМ). Это режим поддержания давления в ГПК при  $N \leq 80\% N_{НОМ}$ , при  $N > 80\%$  регулятор поддерживает заданную среднюю температуру теплоносителя на входе и выходе реактора.

При работе АРМ в ручном режиме он отслеживает текущие значения нейтронной мощности и давления в ГПК.

АРМ автоматически переходит из режима "Н" в режим "Т" при повышении давления пара в ГПК более чем на 147 кПа от уровня уставки, если режим "Н" был выбран вручную. Такая ситуация возникает при отключении турбогенератора.

АРМ переходит в режим "Н" из любого режима при достижении нейтронной мощности  $1,025N_{НОМ}$ .

При работе в режимах "Т" и "С" при уменьшении давления в I-м контуре менее 15,5 МПа формируется запрет на уменьшение мощности реактора.

Автоматический регулятор состоит из трех одинаковых комплектов электронно-релейной аппаратуры и пульта управления. Выходной сигнал формируется по принципу "2 из 3".

Ниже рассмотрено моделирование АРМ.

Как уже указывалось, автоматический регулятор мощности реактора может работать в двух режимах: стабилизации давления пара в паровом коллекторе и стабилизации нейтронного потока.

В соответствии с этим АРМ состоит из двух регуляторов - регулятора давления (РД) и регулятора мощности (РМ) (рис.2.8).

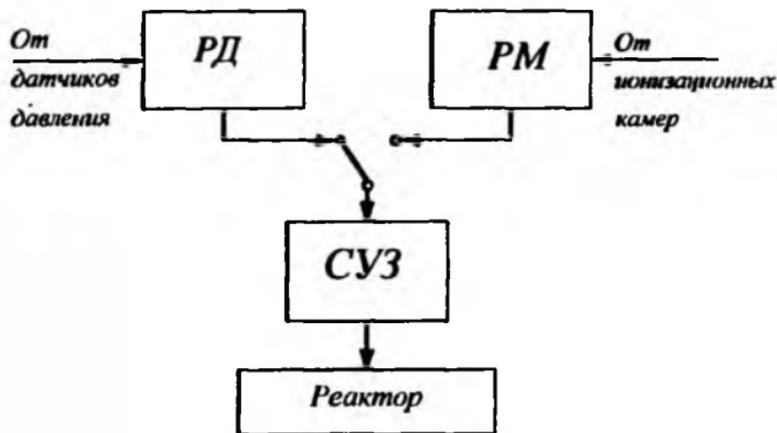


Рис. 2.8. Схема АРМ

Выходной сигнал этих регуляторов через переключатель подается на приводы стержней СУЗ. Структурная схема модели регулятора АРМ в режиме РД приведена на рис.2.9.

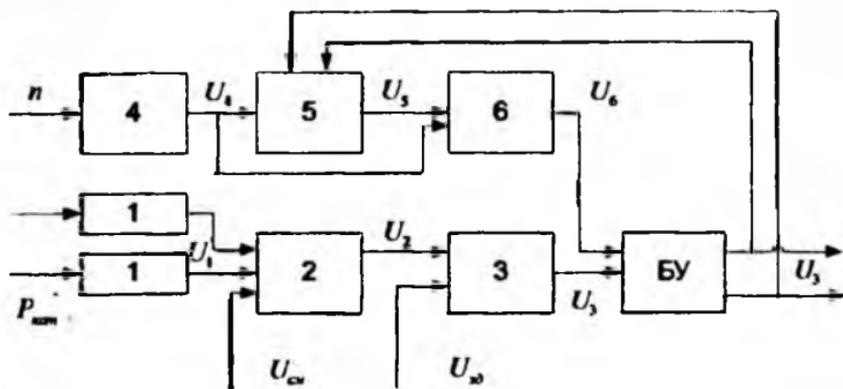


Рис.2.9. Расчетная схема регулятора АРМ в режиме «Т»

На схеме обозначено:

- 1 – датчик давления;
- 2 – блок смещения;
- 3 – блок сравнения;
- 4 – логарифматор;
- 5 – блок обратной связи;
- 6 – усилитель;

БУ – релейный блок управления.

Работа регулятора в режиме РД описывается системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = K_1 \cdot P_{гпк} \\ U_2 = K_2 \cdot (2 \cdot U_1 + U_{см}) \\ U_3 = \begin{cases} -K_3 \cdot (U_2 - U_{ю}) & \text{при } |K_3 \cdot (U_2 - U_{ю})| < U_{оп} \\ U_{оп} \cdot \text{sign} [ -K_3 \cdot (U_2 - U_{ю}) ] & \text{при } |K_3 \cdot (U_2 - U_{ю})| > U_{оп} \end{cases} \\ U_4 = f(\ln \bar{N}_n) \\ T_5 \frac{dU_5}{dt} + U_5 = -U_4 \quad \text{при } U_v = 0 \\ \frac{dU_5}{dt} = 0 \quad \text{при } U_v = \pm 1 \\ U_6 = K_6 \cdot (U_5 + U_4) \\ U_v = \begin{cases} +1 \text{ при а) } U_3 + U_6 \geq 1 \\ \quad \text{б) } U_3 + U_6 \geq U_n \text{ и } U_v = +1 \text{ на предыдущем шаге} \\ 0 \text{ при } -U_n < (U_3 + U_6) < U_n \\ -1 \text{ при а) } U_3 + U_6 \leq -1 \\ \quad \text{б) } U_3 + U_6 \leq -U_n \text{ и } U_v = -1 \text{ на предыдущем шаге} \end{cases} \end{array} \right.$$

В приведенных уравнениях обозначено:

$U_1, U_2, \dots, U_6, U_y$  - напряжения на выходе соответствующих усилителей;

$U_{см}$  - напряжение смещения ( задается постоянным );

$U_{зд}$  - напряжение, соответствующее давлению  $P_{гпк}$  в паровом коллекторе;

$K_1, K_2$  - постоянные коэффициенты;

$T_1, T_5$  - постоянные времени;

$f(\ln \bar{N}_n)$  - заданная функция относительного нейтронного потока;

$U_v$  - напряжение возврата релейного блока.

Значения коэффициентов  $K_3, K_6$ , постоянная времени  $T_5$ , напряжение  $U_{зд}$  и напряжение возврата релейного блока  $U_v$  могут изменяться при настройке регулятора.

Из математического описания видно, что когда регулирующие стержни неподвижны, т.е.  $U_y=0$ , то напряжение  $U_5$  стремится к  $U_4$  с постоянной времени  $T_5$ . С такой же скоростью напряжение  $U_6$  стремится к нулю. При  $U_y = \pm 1$ , т.е. когда регулирующие стержни движутся, напряжение  $U_5$  остается неизменным, и под действием обратной связи по нейтронному потоку напряжение  $U_6$  непрерывно изменяется, стремясь сбалансировать  $U_3$ . После

того, как их сумма по абсолютному значению станет меньше напряжения возврата релейного блока, стержни останутся. Таким образом, обеспечивается издромное регулирование.

Зона нечувствительности регулятора составляет  $\pm 1$  В. Это соответствует погрешности поддержания давления в паровом коллекторе  $\pm 0.05$  МПа, а нейтронного потока  $\pm 3\%$ . На медленные изменения нейтронного потока регулятор также не реагирует, ибо в этом случае напряжение  $U_5$  успевает следовать за напряжением  $U_4$  и балансировать его, так что напряжение  $U_6$  не выходит за пределы зоны нечувствительности регулятора. Быстрые изменения нейтронного потока регулятор отрабатывает, сглаживая выбеги.

Структурная схема регулятора АРМ в режиме стабилизации нейтронного потока изображена на рис.2.10.

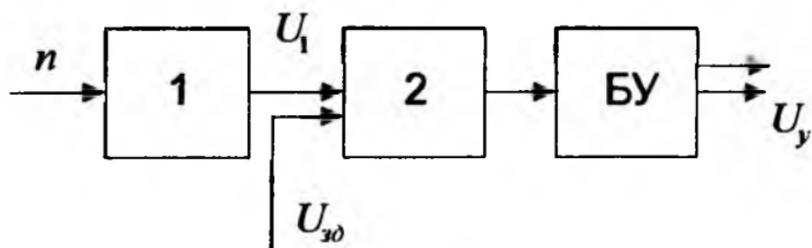


Рис.2.10. Расчетная схема регулятора АРМ в режиме «Н»

Измерительный блок 1 описывается уравнением

$$TU_1/dt + U_1 = -K_1 \cdot n$$

где  $K_1$  - переменный коэффициент передачи, зависящий от величины нейтронного потока;

$U$  - относительный нейтронный поток;

$T$  - постоянная времени.

Усилитель 2:

$$U_2 = -K_2(U_{30} + U_1),$$

где  $K_2$  - коэффициент передачи.

Блок управления БУ работает так же, как и в предыдущем случае.

Зона нечувствительности АРМ по нейтронному потоку равна 1% от заданного значения.

При отключении одного или нескольких главных циркуляционных насосов или одного из двух питательных турбонасосов нет смысла полностью останавливать реактор, достаточно снизить мощность на соответствующую величину. Для этой цели служит регулятор ограничения мощности реактора.

Принцип работы устройства основан на непрерывном сравнении значений нейтронной и тепловой мощности реактора.

Нейтронная мощность сравнивается с уставкой, значение которой постоянно для каждого числа работающих ГЦН и уменьшается ступенчато на фиксированную величину при отключении каждого ГЦН. Управляющее воздействие направлено на органы регулирования. Тепловая мощность вычисляется по формуле  $Q = k(t_r - t_x)n$ ,

где  $(t_r - t_x)$  - средняя разность температур в горячей и холодной нитках реактора;

$n$  - число работающих ГЦН.

Разность температур измеряется включенными встречно термомпарами. Регулятор состоит из трех независимых каналов, выходной сигнал формируется по принципу "2 из 3".

## **2.6. Механизмы управления ядерных реакторов**

Механизмы управления (МУ) предназначены для перемещения твердых органов регулирования, выполненных из материалов, поглощающих нейтроны. В механизм управления обычно входят двигатель, приводная пара и соединительные элементы (МУ для ВВЭР-1000 будет рассмотрен отдельно).

Конструкцию МУ определяют следующие факторы:

- тип реактора (корпусной или каналный);
- тип теплоносителя;
- размещение приводов относительно активной зоны (верхнее, нижнее);
- температурный режим;
- требования к размерам МУ (энергетические реакторы, космические аппараты и др.).

В МУ входят следующие структурные элементы: двигатель, редуктор, преобразователь вида движения (вращательного в поступательное), датчики крайних положений регулирующего органа (РО), датчик текущего положения РО, тормозные и удерживающие устройства.

В канальных реакторах РО размещаются в специальных каналах, поэтому МУ можно вынести в специальные зоны, где они могут работать в нормальных условиях.

В корпусных реакторах все механизмы управления размещены внутри внешней камеры и работают при повышенных давлениях и температурах.

В реакторах ВВЭР-440 применяется герметичный синхронно-реактивный двигатель погруженного типа. В качестве преобразователя вида движения используется преобразователь рейка-шестерня. К рейке жестко крепится штанга, на конце которой имеется байонетный захват для крепления органа регулирования. Электродвигатель питается напряжением низкой частоты.

В канальном реакторе РБМК-1000 используется электродвигатель постоянного тока с встроенной электромагнитной муфтой и преобразователем движения типа барабан-трос. Такой тип преобразователя позволил получить (при ходе стержня 6250 мм) компактную конструкцию. Привод устанавливается в биологической защите под настилом центрального зала. Во избежание попадания воды из канала СУЗ во внутренней полости привода поддерживается избыточное давление азота. Недостаток такого привода – быстрое изнашивание троса.

В реакторах ВВЭР-1000 используется шаговый электромагнитный механизм (ШЭМ), который перемещает орган регулирования – кластер шагами по 20 мм. В таком механизме управления нет преобразователя вида движения. Функции двигателя, редуктора и преобразователя выполняет одно устройство. Следует отметить, что разработке такого МУ способствовал малый вес кластера (около 18 кг).

ШЭМ состоит из чехла, блока электромагнитов, блока перемещения, штанги и датчика положения (рис.2.11).

На чехле 1 размещаются внутренние и наружные части исполнительного органа. В нижней части чехла имеется фланец для крепления к крышке реактора.

Блок электромагнитов состоит из трех электромагнитов: тянущего 2 (ТМ), запирающего 3 (ЗМ) и фиксирующего 4 (ФМ). Они предназначены для создания тяговых усилий.

Блок перемещения находится в среде первого контура и предназначен для перемещения штанги 5, соединенной с кластером. Электромагниты, расположенные снаружи чехла, и полюсы электромагнитов, расположенные внутри, взаимодействуя друг с другом, образуют тянущий и фиксирующий блоки. Тянущий блок состоит из тянущего 2, запирающего 3 электромагнитов и тянущего узла. В состав тянущего узла входит подвижный полюс тянущего электромагнита (якорь) 6, неподвижный 8 и подвижный 7 полюсы запирающего электромагнита, полюс запирающего электромагнита 9, запирающая защелка 10 и запорная втулка 11.

Неподвижный полюс запирающего магнита 8 жестко связан с пружинным блоком, а якорь тянущего магнита 6 жестко связан с полюсом запирающего

магнита 9 и имеет ход 20 мм. Якорь запирающего магнита 7 связан с запорной втулкой 11 запирающей защелки 10 и имеет ход 12 мм.

Фиксирующий блок состоит из фиксирующего электромагнита 4 и фиксирующего узла с подвижным 13 и неподвижным 12 полюсами. Полюс 13 связан с запорной втулкой 14 фиксирующей защелки 15 (ход 15 мм).

Штанга представляет собой цилиндрическую рейку с шагом 20 мм. Штанга к кластеру крепится с помощью байонетного захвата.

Имеется также пружинный блок для демпфирования штанги при сбросах в режимах аварийной защиты реактора.

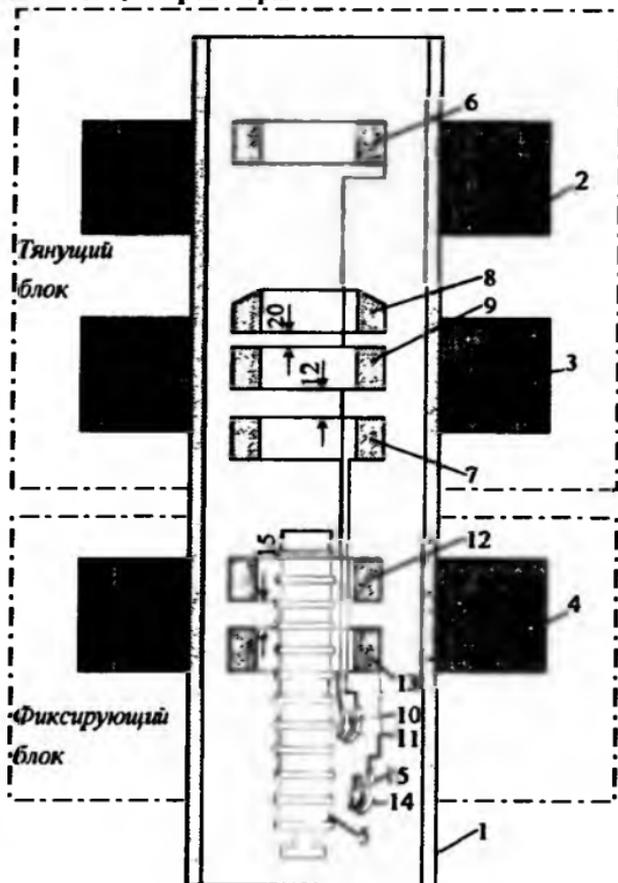


Рис. 2.11. Схема шагового электромагнитного привода

Перемещение привода обеспечивается подачей форсирующих импульсов тока, коммутируемых в определенной последовательности, на катушки электромагнитов. В результате этого связанная с подвижными полюсами запирающая защелка перемещает штангу, а фиксирующая защелка удерживает

ее между перемещениями. Режим стоянки привода обеспечивается подачей импульса тока на фиксирующий электромагнит 4, в результате чего фиксирующая защелка обеспечивает удержание штанги. Тянущий и запирающий электромагниты в это время обесточены, запирающая защелка открыта (расцеплена со штангой). В режиме аварийной защиты все три электромагнита обесточены, защелки открыты и штанга с кластером свободно падает вниз.

Рассмотрим операции при перемещении привода вверх. Возбуждается ЗМ 3 тянущего блока. Якорь 7 перемещается вверх на 12 мм. При этом запорная втулка 11 закрывает кулачок запирающей защелки 10. Обесточивается ФМ 4, его якорь 13, связанный с запорной втулкой 14, перемещается вниз (свободное падение) на величину 15 мм и открывает кулачки фиксирующей защелки 15. Штанга с кластером повисает на кулачках запирающей защелки 10. Подается возбуждение на ТМ 2. Якорь ТМ 6 перемещается вверх, и запирающая защелка 10 со штангой и кластером перемещается вверх на 20 мм. Уменьшается ток на ЗМ 3 и возбуждается ФМ 4. При перемещении якоря 13 с запорной втулкой 14 на 12 мм закрываются кулачки фиксирующей защелки 15. Так как величина перемещения якоря 13 равна 15 мм, то дальнейшее перемещение якоря происходит вместе с фиксирующей защелкой с закрытыми кулачками на величину 1,5 мм до момента контакта рабочей поверхности кулачков со штангой. Оставшийся ход якоря в 1,5 мм происходит вместе со штангой. При этом в запирающей защелке тянущего блока обеспечивается гарантированный зазор 1,5 мм между кулачками 10 и рабочей поверхностью штанги. Затем уменьшается ток на ТМ, а на фиксирующем электромагните 3 устанавливается ток удержания («стопа»). Обесточивается ЗМ 3 тянущего блока, якорь 7 ЗМ с запорной втулкой 11 перемещается вниз (свободное падение) на величину 12 мм, открываются кулачки запирающей защелки 10. Уменьшается ток на ТМ, якорь 6 с запирающей защелкой и открытыми кулачками 10 перемещается вниз на величину 20 мм, соответствующую ходу штанги. Одновременно на эту же величину опустится вниз и якорь 7 с запорной втулкой 11. Перемещение происходит под действием собственного веса с использованием эффекта соленоида при уменьшенном токе в ТМ. Обесточивается ТМ. Привод находится в исходном состоянии, т.е. штанга с кластером подвешена на фиксирующей защелке фиксирующего блока, обесточены ТМ и ЗМ, полюсы 8, 9 и 7 запирающего электромагнита имеют рабочие зазоры 12 и 20 мм.

Контроль положения штанги с кластером через каждые 350 мм хода осуществляется с помощью датчика положений типа ДПЛ.

В датчике имеется семь катушек основного канала контроля и две катушки резервного канала конечных положений. К штанге прикреплен шунт в виде трубы 22x1 мм из магнитомягкой стали. При перемещении шунта вместе со штангой вдоль корпуса датчика через зоны катушек их индуктивность изменяется. Обработка и кодирование сигнала положения производятся в панели контроля и управления.

Исходное состояние привода: штанга с кластером подвешена на фиксирующей защелке фиксирующего блока. К регулятору АРМ можно подключить любую группу органов регулирования, при этом эта группа перемещается на  $\pm 160$  мм относительно номинального положения. Номинальное положение – 2000 мм от нижнего концевого выключателя.

## 2.7. Органы регулирования ядерных реакторов

Во время работы ядерного реактора происходят различные процессы, приводящие к изменению реактивности. К таким процессам относятся: выгорание топлива, отравление, шлакование, действие температурного и мощностного эффектов. Для поддержания реакторов в критическом состоянии необходимо изменять размножающие свойства активной зоны для компенсации указанных эффектов. Воздействие на реактивность принципиально возможно следующими способами:

- увеличением или уменьшением количества делящегося вещества в активной зоне;
- изменением величины утечки нейтронов из активной зоны;
- изменением величины поглощения нейтронов.

Изменение количества топлива в активной зоне достигается либо перемещением ТВС, либо изменением концентрации урана в топливной композиции для реакторов на жидком топливе. Из-за различных сложностей этот способ практически не применяется.

Величина утечки может быть изменена такими способами: перемещением отражателей нейтронов, перемещением расположенных на периферии стержней, рассеивающих быстрые нейтроны, сдвигом спектра нейтронов за счет изменения свойств замедлителя. Этот способ эффективен для реакторов с небольшой активной зоной (например, на быстрых нейтронах).

Наибольшее распространение получил способ изменения реактивности за счет изменения величины поглощения нейтронов. При этом возможны такие способы:

- регулирование подвижными твердыми поглотителями нейтронов;
- так называемое жидкостное регулирование, когда изменяется уровень или плотность жидкого поглотителя в специальных каналах;
- газовое регулирование, когда изменяется высота поглощающего столба газа, либо его концентрация, либо плотность;
- химическое регулирование, когда изменяется концентрация поглотителя в теплоносителе.

Последний способ используется в реакторах типа ВВЭР для компенсации медленных эффектов реактивности при выгорании топлива. При этом в начале кампании в теплоноситель вводится борная кислота с большой концентрацией, затем, по мере выгорания топлива, концентрацию борной кислоты уменьшают

за счет прокачки части теплоносителя через специальные ионообменные фильтры. Основное достоинство этого способа – равномерное воздействие на энерговыделения в реакторе;

- компенсация реактивности подвижными выгорающими поглотителями.

Такой поглотитель загружается вместе с ядерным топливом и постоянно выгорает. При этом компенсируется реактивность за счет выгорания и зашлаковывания топлива.

Несмотря на большое количество способов управления реактивностью, регулирование реакторами осуществляется твердыми поглотителями (с дополнительным применением химического регулирования в ВВЭР).

Поскольку СУЗ реакторов служит для компенсации реактивности, регулирования мощности и защиты, то различают такие органы регулирования:

- компенсирующие стержни;
- регулирующие стержни;
- стержни аварийной защиты.

Компенсирующие стержни (КС) или ручного регулирования (РР) предназначены для компенсации больших, но медленных изменений реактивности (избыточная начальная реактивность топлива, выгорание, шлакование топлива, температурный эффект реактивности). Скорость изменения реактивности таких стержней  $\partial\rho/dt \leq (2 + 4)10^{-4} c^{-1}$ .

Стержни автоматического регулирования (АР) предназначены для компенсации быстрых, но малых изменений реактивности, при этом  $\partial\rho/dt \geq (0.5 + 1)10^{-3} c^{-1}$ . В то же время из-за недопустимости мгновенной критичности при случайном быстром извлечении стержней максимальный физический вес одной группы ограничен значением  $0.8\beta_{эф}$ .

Стержни аварийной защиты (АЗ) предназначены для быстрого прекращения цепной реакции в аварийных случаях. В наиболее опасных ситуациях производится сброс стержней АЗ в активную зону. Эффективность стержней АЗ задается обычно из условия  $\rho_{АЗ} = \beta_{эф}$ .

Приведенное деление органов регулирования по функциональному назначению имеет место в реакторах РБМК.

В реакторах ВВЭР вместо твердых компенсирующих стержней применяется химическое регулирование, однако деление стержней на стержни АР и АЗ сохраняется.

К материалам поглощающих стержней предъявляются основные требования:

- большое сечение поглощения нейтронов;
- высокая концентрация атомов поглотителя в единице объема (от этого зависят габариты стержня);
- желательно, чтобы эффективность стержня в процессе эксплуатации существенно не изменялась. Это возможно в том случае, если при

поглощении нейтронов образуются новые изотопы, имеющие также большое сечение поглощения;

- совместимость с материалом оболочки;
- коррозионная и эрозийная стойкость в теплоносителе;
- стержень под действием нейтронного облучения не должен изменять своих размеров (что возможно при выделении газообразных продуктов деления);
- реакция поглощения нейтронов не должна сопровождаться выделением большого количества тепла.

Перечисленным требованиям не удовлетворяет ни один существующий в природе материал.

Наибольшее применение находят борсодержащие материалы – бористая сталь, карбид бора ( $B_4C$ ). Для органов регулирования ВВЭР обычно используется естественная смесь изотопов бора: 20% изотопа  $^{10}B$  и 80% изотопа  $^{11}B$ . Применяется также бористая нержавеющая сталь, содержащая около 18% Cr, 14% Ni и до 2.4% В. Большой эффективностью и жаропрочностью обладает карбид бора. Это химически устойчивое соединение, однако он хрупок и при температуре теплоносителя (воды) свыше  $380^{\circ}C$  нуждается в защитной оболочке.

Общим недостатком борсодержащих материалов является то, что на ядрах бора идет реакция замещения  $(n, \alpha) \ ^{10}B + ^1_0n \rightarrow ^7_3Li + ^4_2He + 2.78 \text{ МэВ}$ , сопровождающаяся выделением газообразного гелия и большого количества тепла в самом поглотителе. Указанные недостатки требуют применения охлаждения органов регулирования, а для предотвращения большого повышения давления внутри оболочки – предусматривать внутри специальный объем.

Из кадмийсодержащих материалов используются  $CdO_2$  и сплавы кадмия с индием на основе серебра.

Из редкоземельных материалов применяется европий Eu, который может длительное время работать в активной зоне без уменьшения эффективности, кроме того, в нем протекает реакция  $(n, \gamma)$ , при которой энергия  $\gamma$ -квантов рассеивается во всем объеме реактора. Последнее обстоятельство приводит к тому, что существенно уменьшается нагрев стержня и исключается распухание поглотителя.

Форма поперечного сечения определяется в основном конструкцией технологических каналов. Имеются стержни цилиндрические (ВВЭР-1000), шестигранные (ВВЭР-440), кольцевые, крестообразные, трехлепестковые.

Кривая интегральной эффективности одной группы органов СУЗ ВВЭР-1000 (кластера) от глубины погружения в активную зону в процентах показана на рис.2.9. Как видно, в центральной части характеристика близка к линейной.

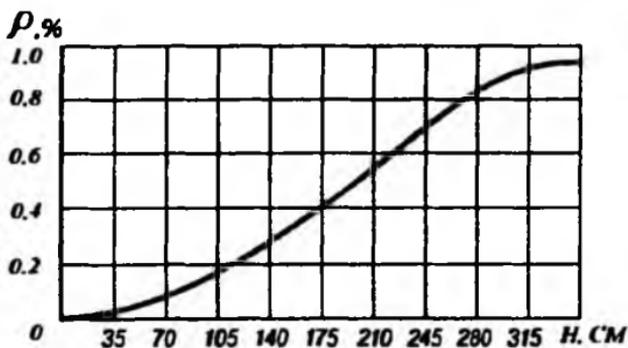


Рис. 2.10. Интегральная эффективность одной группы органов СУЗ ВВЭР-1000

Количество ОР в реакторах различного типа следующее:

#### ВВЭР-1000

АР - 6 шт.

АЗ - 45 шт.

#### РБМК-1000

РР - 89

АР-1 - 4; АР-2 - 4; АР-3 - 4;

АЗ - 57

УСП - 21 (укороченные стержни)

Камер деления - 2

$IK_{роб}$  - 20;  $IK_{пуск}$  - 4.

Диаметр кластера - 8,2 мм.

Причем для ВВЭР-1000 конструкция приводов и поглощающих стержней-кластеров для целей АР и АЗ одинакова.

## 2.8. Системы аварийной защиты реакторов

Системы аварийной защиты (АЗ) предназначены для быстрого прекращения цепной реакции в аварийных ситуациях, при которых может произойти разрушение ТВЭЛ и выход продуктов деления во вне реакторное пространство. Причины разрушения ТВЭЛ:

- пережог из-за превышения мощности выше допустимого предела или из-за ухудшения теплоотвода (разрыв контура, отключение насосов);
- изменение мощности со скоростями, превышающими допустимые.

Предотвращение перечисленных аварийных режимов возможно при условии быстрого прекращения цепной реакции деления ядер топлива в случае отклонения параметров за допустимые пределы и при обеспечении надежного теплоотвода из реактора и парогенератора.

В связи с этим необходимо непрерывно контролировать физические (нейтронная мощность и скорость ее изменения) и технологические параметры. Причем контроль уровня мощности и скорости ее изменения должен осуществляться непрерывно в любых состояниях реактора: в подкритическом состоянии, при пуске и на рабочих нагрузках.

В качестве технологических выбирают параметры, которые несут наибольшую и достоверную информацию о состоянии реактора. Независимо от типа реактора такими параметрами могут быть:

- давление или температура первого контура;
- расход теплоносителя.

Реактор должен быть остановлен при обесточивании ГЦН, потере питания на щите СУЗ.

Есть параметры, которые нельзя измерить непосредственно в действующем реакторе. Например, не измеряются локальные тепловые потоки от ТВЭЛ к теплоносителю, температура ядерного топлива и оболочка, скорости теплоносителя в ТВС.

В этом случае необходимые параметры определяются косвенным путем. Примером может служить расчет кризиса теплообмена в водо-водяных реакторах по расходу, давлению и температуре теплоносителя.

Для обеспечения ядерной безопасности система АЗ должна обладать высокой надежностью. Этого можно достичь:

- применением специальных принципов проектирования систем АЗ сложных технологических систем;
- дублированием М каналов (многоканальностью);
- применением надежного основного и резервного питания.

Рассмотрим некоторые принципы проектирования. Одним из них является принцип прямого измерения параметра. Например, расход теплоносителя через активную зону можно контролировать либо непосредственно по расходу, либо по напряжению на клеммах ГЦН. Хотя сигнал напряжения является безынерционным, но он не извещает о разрыве трубопровода первого контура. Наиболее удачное решение – совмещение этих двух сигналов в системе АЗ.

В качестве второго примера принципа проектирования можно назвать принцип независимости и физического разделения сигналов для одних и тех же функций защиты, например, контроль распределения энерговыделения в активной зоне в канальном реакторе можно организовать двумя способами: непосредственным измерением локального энерговыделения детекторами внутриреакторного контроля и локальным замером “тепловой” мощности по расходу воды через канал и разности температур на входе и выходе канала. “Тепловой” канал защиты более универсален, такая аномалия, как локальное исчезновение расхода, будет зафиксирована только “тепловым” каналом защиты, и в то же время он среагирует на локальное исчезновение мощности, хотя и с большим запаздыванием. Но “физический” канал более надежен

(прямое измерение). Поэтому для повышения надежности следует использовать оба канала.

Рассмотрим защитные (управляющие) воздействия в системах АЗ.

Эти воздействия дифференцируются в зависимости от возникшего нарушения и опасности. Есть аварии, которые можно предотвратить быстрым уменьшением реактивности (например, возрастание плотности нейтронов). При этом стержни АЗ вводятся в активную зону. Есть аварии, связанные с технологическими нарушениями (например, разрыв трубопровода первого контура). В этом случае аварийную защиту дополняют системой аварийного охлаждения зоны.

В серийном ВВЭР-1000 используются следующие виды защит.

Аварийная защита (АЗ) - одновременное падение всех органов регулирования в активную зону до крайнего нижнего положения под действием собственного веса (время падения 1,5-4 с). Действие АЗ не прекращается независимо от того, снялся сигнал или нет.

Предупредительная защита (ПЗ) двух видов: ПЗ-1 - вызывает поочередное движение групп ОР вниз с рабочей скоростью, начиная с рабочей группы. Исчезновение сигнала первопричины приводит к снятию команды;

ПЗ-2 - формируется запрет на движение ОР вверх. Запрет сохраняется до исчезновения сигнала первопричины. При этом аппаратура электрооборудования АЗ и ПЗ разделена на три независимых комплекта - два комплекта АЗ и один комплект ПЗ, расположенных в различных помещениях.

В серийном реакторе ВВЭР-1000 к срабатыванию АЗ приводят 23 причины (нарушения). Приведем некоторые из них:

- период разгона во всех трех диапазонах (источника, промежуточном; энергетическом) менее 10 с;
- уровень плотности нейтронного потока в энергетическом диапазоне  $N > 107\% N_{ном}$ ;
- давление над активной зоной менее 15 МПа при мощности  $N > 75\% N_{ном}$ ;
- давление в любом из 4-х парогенераторов более 8 МПа;
- снижение уровня воды в любом из 4-х ПГ на 650 мм от номинального;
- давление под оболочкой более 0,03 МПа;
- давление над активной зоной более 18 МПа;
- исчезновение силового питания 220 В и др.

Некоторые причины, приводящие к срабатыванию ПЗ-1:

- период разгона реактора во всех трех диапазонах менее 20 с;
- давление над активной зоной более 17,3 МПа и др.

Формирование сигналов АЗ и ПЗ происходит по принципу 2 из 3. Предусмотрена возможность опробования систем без воздействия на регулирование.

### 3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСАТОРА ОБЪЕМА

Первый контур реакторов ВВЭР заполнен водой под давлением. С изменением нагрузки энергоблока изменяется температура теплоносителя, что приводит к изменению объема и соответственно давления теплоносителя. Для компенсации этих изменений в первом контуре устанавливается компенсатор объема (КО). Для ВВЭР-1000 - это вертикальный цилиндрический сосуд высотой 13,66 м и диаметром 3,5 м. Нижняя часть КО заполнена водой при температуре насыщения, верхняя - насыщенным паром.

Водяная часть соединена с горячей ниткой циркуляционного трубопровода. Для поддержания состояния насыщения в КО установлены трубчатые электронагреватели (ТЭНы). В стационарном состоянии мощность ТЭНов компенсирует потери теплоты в окружающую среду через термоизоляцию и в контур теплоносителя через водяную соединительную линию.

Рассмотрим процессы при изменении температуры теплоносителя. При снижении температуры теплоносителя часть его переходит из КО в контур, пар в КО расширяется и давление его падает. Для восстановления его необходимо увеличить мощность ТЭНов. При повышении температуры теплоносителя последний расширяется, перетекает в КО и давление в нем повышается. Для восстановления давления необходимо уменьшить мощность ТЭНов. При больших и быстрых повышениях давления применяют впрыск воды из холодной нитки циркуляционного контура. Подача воды осуществляется вследствие разности давления в холодной и горячей нитках циркуляционной системы, определяемой гидравлическим сопротивлением активной зоны реактора. Если после открытия клапанов впрыска давление в КО продолжает расти, то пар сбрасывается в барботер.

Таким образом, одной из регулируемых величин в КО есть давление теплоносителя. Основными возмущающими величинами на давление являются: изменение нагрузки блока, сброс нагрузки, отключение турбопитательного насоса (ТПН) (1 из 2), отключение ГЦН (1 из 4), отключение подогревателей высокого давления (ПВД).

Другой регулируемой величиной в КО является уровень воды. Причинами изменения уровня могут быть: протечки воды через неплотности, попадание воды через уплотнения ГЦН, изменение температуры теплоносителя.

Снижение уровня воды в КО может привести к оголению и пережогу трубчатых электронагревателей, а увеличение уровня приводит к уменьшению парового объема и снижению компенсирующей способности КО по давлению. Для компенсации протечек служат подпиточные насосы. В современных энергоблоках расход подпитки регулируется плавно насосами с гидромуфтой.

При повышении уровня воды часть теплоносителя сливается. Необходимость слива воды возникает при пусках, когда теплоноситель в

контуре разогревается и существенно расширяется. Расчеты показывают, что для ВВЭР-1000 изменение температуры воды на 27 °С приводит к изменению объема воды на 24 м<sup>3</sup>, что при диаметре КО 3,5 м приводит к изменению уровня на 3,4 м.

Схема автоматического регулирования давления и уровня в КО изображена на рис.3.1. Давление в 1-м контуре измеряется с помощью манометра 1, сигнал давления подается на логическое устройство 2, вырабатывающее дискретные сигналы, управляющие силовыми устройствами 3 электронагревателей 4, либо клапанами впрыска воды 6 через пусковые устройства 5.

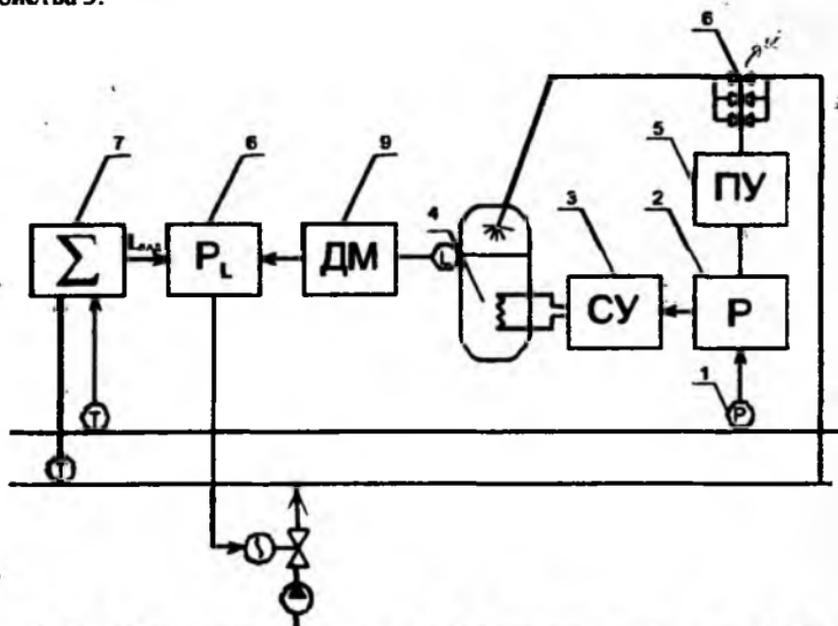


Рис.3.1. Принципиальная схема АСР давления и уровня в КО

Логическое устройство 2 представляет собой два регулятора. Первый регулятор, имеющий ПД-закон регулирования, воздействует на регулирующий клапан впрыска воды. П-закон реализован охватом ПИ-регулятора жесткой обратной связью по положению регулирующего органа. Дифференциальная составляющая реализуется с помощью дифференциатора.

Второй многоканальный регулятор - позиционный с дифференциальной составляющей управляет двумя быстродействующими задвижками и четырьмя группами электронагревателей. Применение дифференциальной составляющей вызвано тем, что при открытии клапанов впрыска давление в КО снижается с большой скоростью и для предотвращения значительного снижения давления при сбросах нагрузки необходимо с упреждением закрыть клапаны впрыска и включить ТЭНы.

Мощность нагревателей изменяется дискретно, ступенями по несколько сотен киловатт, что упрощает систему и делает ее более надежной по сравнению с устройствами плавного регулирования мощности.

Количество ступеней мощности нагревателей определяется конструкцией нагревателей и динамикой объекта управления.

Включение и отключение одной и той же секции происходит при различном давлении. Кривые разгона КО при различных возмущениях показаны на рис.3.2. Как видно, объект по давлению нелинейный. Уставки срабатывания клапанов впрыска и включения ТЭНов для одного из энергоблоков с ВВЭР-1000 приведены в табл.3.1.

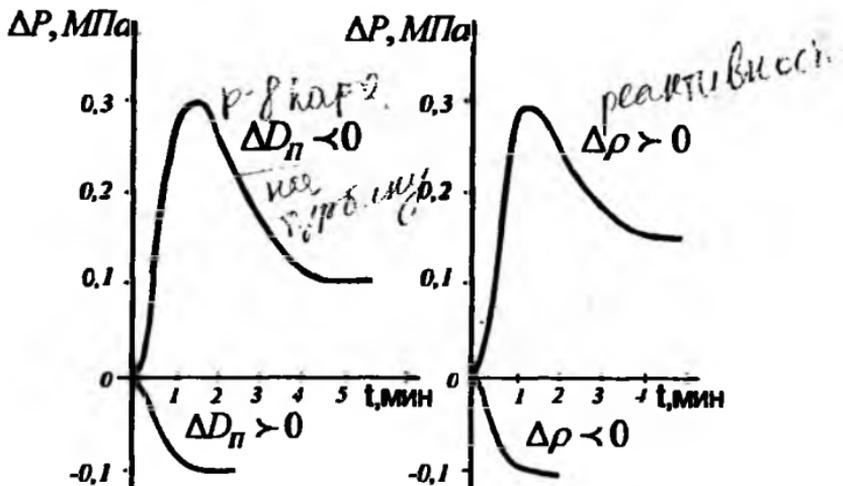


Рис. 3.2. Кривые разгона КО по давлению

Таблица 3.1

Уставки срабатывания клапанов

Тип клапана или группы ТЭНов	Открытие P, МПа	Закрытие P, МПа
<u>Первый регулятор</u>		
Клапан I	ГД-регулятор со статической неравномерностью 0.3 МПа в диапазоне 16,1 -16,4 МПа	
<u>Второй регулятор</u>		
Задвижка I	16,4	16,3
Задвижка 2	16,6	16,5
<u>Нагреватели</u>		
I гр.270 кВт	15,85	16,1
II гр.270 кВт	15,7	15,95
III гр.120 кВт	15,5	15,8
IV гр.1260	15,3	15,7

Если после включения группы давление в течение определенного времени не восстанавливается, то с выдержкой времени поступает команда на включение следующей группы. Выдержка времени на включение II гр. составляет 3 мин, на включение III гр. - 2 мин, на включение IV гр. - 1 мин.

Для повышения надежности АСР датчик давления дублируется с применением схемы контроля исправности. При отклонении сигнала основного датчика за пределы  $14,0 \div 20,0$  МПа, что свидетельствует о его неисправности, к регуляторам подключается сигнал резервного датчика. Точность поддержания давления в установившемся режиме  $16,0^{+0,1}_{-0,15}$  МПа.

Рассмотрим работу регулятора уровня в КО. С изменением нагрузки энергоблока средняя температура теплоносителя изменяется, что приводит к изменению уровня воды в КО. Для того, чтобы не изменять массу воды в КО, заданное значение уровня  $L_{зад}$  изменяется в соответствии со средней температурой воды в горячей и холодной нитках.

Приближенно зависимость  $L_{зад} = f(T_{ср})$  можно определить из следующих соображений. Для неизменной массы воды в контуре справедливо равенство

$$\Delta G_{КО} + \Delta G_K = 0,$$

где  $\Delta G_{КО}$  - изменение массы воды в КО;

$\Delta G_K$  - изменение массы воды в остальном контуре (реакторе, ПГ, трубопроводах).

Поскольку давление (плотность) воды в КО поддерживается постоянным, то можно записать

$$\Delta G_{КО} = \rho' S_{КО} \Delta H_{КО},$$

где  $\rho'$  - плотность воды в КО;

$S_{КО}$  - площадь поперечного сечения КО;

$\Delta H_{КО}$  - изменение уровня в КО.

Для изменения массы воды в контуре

$$\Delta G_K = V_K \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta T_{ср},$$

где  $V_K$  - объем первого контура (без КО);

$\Delta T_{ср}$  - изменение средней температуры воды в контуре;

$\partial \rho / \partial t$  - изменение плотности воды при изменении температуры.

Из приведенных уравнений получаем

$$\Delta H_{\text{КО}} = -\frac{V_{\text{к}}}{\rho' S_{\text{КО}}} \cdot \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} \Delta T_{\text{ср}}$$

Так как  $\partial \rho / \partial t < 0$ , то уровень воды с ростом температуры повышается. Для энергоблока с ВВЭР-1000 заданное значение уровня принимает такие значения: при  $T_{\text{ср}} = 280^\circ\text{C}$   $L_{\text{зад}} = 5700$  мм, при  $T_{\text{ср}} = 300^\circ\text{C}$   $L_{\text{зад}} = 8770$  мм, промежуточные значения изменяются по линейному закону.

Сигнал средней температуры формируется в АСР (см. рис.3.1) восемью термопарами типа ТХА (2х4 петли) с нормирующими преобразователями в сумматоре 7.

Сигнал средней температуры каждой петли поступает в схему селектирования, где выделяется максимальный сигнал из четырех, после чего поступает в регулятор уровня 8. Уровень в КО измеряется дифманометром 9 (база измерения 6,3 м).

Управляющее воздействие - изменение расхода подпитки.

В модернизированной АСР уровня в КО входным сигналом в регулятор, кроме уровня и задания, является материальный баланс КО. Сигнал материального баланса теплоносителя складывается из 4-х сигналов: расхода подпитки, расхода продувки, расхода уплотняющей воды на ГЦН, расхода возврата из уплотнений ГЦН. Сигнал расхода подпитки является сигналом жесткой обратной связи регулятора уровня. При этом реализуется ПИ-закон регулирования во внутреннем контуре стабилизации расхода подпитки и П-закон во внешнем контуре регулирования уровня. Остальные сигналы являются воздействиями по возмущению, обеспечивая инвариантность системы.

Синтез подобной системы будет рассмотрен для АСР уровня в ПГ. Точность поддержания уровня в статике  $\pm 50$  мм, в динамике  $\pm 150$  мм.

Задачей пускового регулятора уровня в КО является поддержание постоянного уровня воды (а не массы).

Поскольку при пуске температура воды, а следовательно, и ее объем изменяются существенно, то приходится сливать около 30% начальной массы теплоносителя. В связи с изменением температуры изменяется также показание уровнемера, поэтому в регулятор вводится температурная коррекция. Температура в КО измеряется термометром сопротивления типа ТСР с преобразователем. В схему коррекции входят нелинейные преобразователи.

Для пускового регулятора база уровнемера выбрана большей, чем для основного (для ВВЭР-1000 - 10 м).

Математическое описание КО по давлению при возмущении реактивностью и расходом пара приведено в разд. II, ч. I.

При моделировании АСР давления в КО необходимо знать динамические свойства объекта по регулирующим каналам - мощности ТЭНов и впрыска воды. Свойства объекта по обоим указанным каналам описываются

интегральным звеном с передаточной функцией  $W(S)=K/S$ . Коэффициент передачи  $K$ :

- по мощности ТЭНов  $K=7 \cdot 10^{-7}$  МПа/(кВт·с);
- по расходу воды на впрыск  $K= - 625 \cdot 10^{-6}$  МПа·с/кг.

#### **4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПИТАНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА**

##### **4.1. Автоматическое регулирование уровня воды в парогенераторе**

Регулирование питания парогенератора (ПГ) сводится к поддержанию материального баланса между отводом пара, продувкой и подачей питательной воды. Параметром, характеризующим материальный баланс, является уровень воды в ПГ.

К стабилизации уровня предъявляются довольно жесткие требования. Для ПГ с ВВЭР-1000 номинальный уровень  $L_{НОМ}$  составляет 2450 мм от внутренней образующей корпуса. Точность поддержания уровня в статических режимах составляет  $\pm 50$  мм от  $L_{НОМ}$ , в динамике -  $\pm 150$  мм от  $L_{НОМ}$  (с учетом нечувствительности регулятора). Повышение уровня воды от  $L_{НОМ}$  не допускается из-за затопления и нарушения работы сепарационных устройств (заброс воды в турбину), а снижение уровня - из-за оголения поверхности нагрева.

Возмущающими воздействиями на уровень являются:

- расход пара (нагрузка);
- изменение расхода питательной воды;
- изменение температуры питательной воды";
- изменение расхода продувки;
- изменение теплоподвода со стороны первого контура (изменение средней температуры первого контура или отключение ГЦН).

Динамические свойства ПГ по уровню при некоторых возмущениях показаны на рис.4.1 [17]. При возмущении расходом пара (нагрузка) или отключении ГЦН (изменение теплоподвода) проявляется явно выраженное "набухание" уровня, т.е. изменение его в начальные моменты времени в сторону, не соответствующую знаку возмущающего воздействия. Явление "набухания" можно объяснить так.

При изменении расхода пара, например увеличении, давление в ПГ уменьшается, происходит дополнительное вскипание воды, увеличение количества и объема пузырьков пара и, как следствие, увеличение уровня.

В дальнейшем уровень начинает падать, поскольку расход пара увеличился, а расход питательной вода остался прежним. При отключении ГЦН теплоподвод в ПГ резко уменьшается, интенсивность кипения и объем

пузырьков пара уменьшаются, что приводит к снижению уровня. Однако уменьшение парообразования приводит к снижению давления и некоторому увеличению парообразования. Тем не менее первый фактор более существенный. В дальнейшем уровень увеличивается, поскольку расход питательной воды остался неизменным.

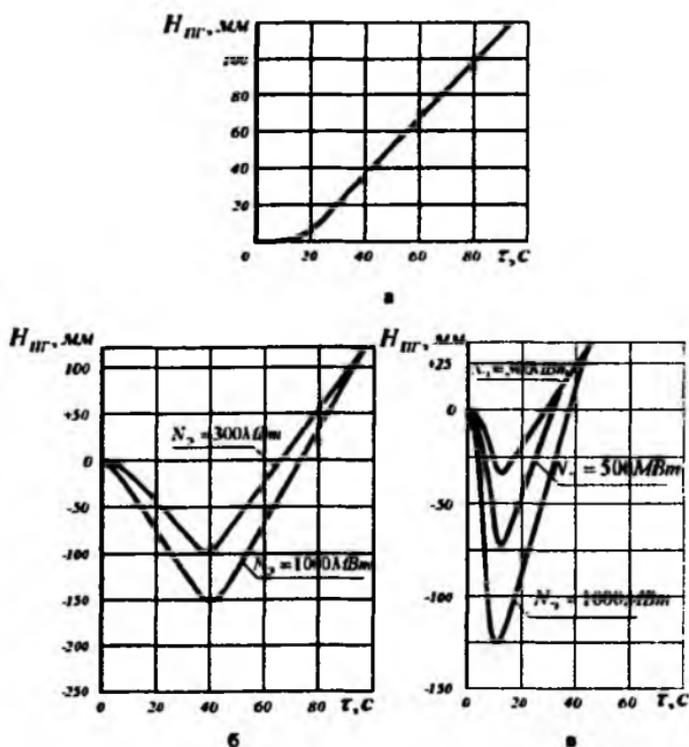


Рис. 4.1. Кривые разгона ПГ по уровню при возмущении:  
 а - расходом питательной воды,  $\Delta G=150 \text{ т/ч}$ ;  
 б - сбросом нагрузки;  
 в - отключением ГЦН

Рассмотренные динамические свойства ПГ являются крайне неблагоприятными с точки зрения стабилизации уровня воды. Этим объясняется тот факт, что для автоматического регулирования уровня непригодны обычные одноконтурные системы регулирования.

Динамику ПГ по уровню по всем входным возмущениям можно описать передаточной функцией вида

$$W(S) = \frac{1}{S} \cdot \frac{B_1 S + B_0}{A_1 S A_0}$$

т.е. произведением передаточных функций интегрального и интегро-дифференцирующего звеньев.

Передаточную функцию (4.1) можно представить суммой передаточных функций инерционного и интегрального звеньев (см. ч.1, разд. 6).

*Выбор схемы и закона регулирования уровня*

Применение пропорционально-интегрального (ПИ) закона регулирования для астатического объекта с явлением "набухания" не обеспечивает требуемого качества регулирования (длительные слабо затухающие колебания уровня при ступенчатом входном возмущении). Интегральный (И) закон также дает плохую устойчивость системы. Пропорциональный (П) закон не допустим из-за статической ошибки регулирования. Поэтому для регулирования уровня в ПГ применяют комбинированную АСР: регулирование по отклонению с П-регулятором и контуром инвариантности по основному возмущающему воздействию - расходу пара.

Рассмотрим синтез такой АСР.

Схема АСР с устройством ввода сигнала по расходу пара изображена на рис. 4.2,а. На схеме обозначено:

ИП - измерительный преобразователь;

УВ - устройство ввода сигнала по расходу пара;

Р - регулирующий прибор;

ИМ - исполнительный механизм.

Структурная схема такой АСР изображена на рис.4.2,б, где обозначение передаточных функций следующее:

$W_{OB}(S)$ ,  $W_{OP}(S)$  - передаточные функции объекта по возмущающему и регулирующему каналам соответственно;

$W_y(S)$  - передаточная функция устройства ввода (с измерительным преобразователем);

$W_p(S)$  - передаточная функция регулятора.

Приведем возмущение D по расходу пара ко входу в регулятор (рис.4.2,в) и запишем передаточную функцию по каналу "расход пара D - уровень L":

$$W_{D-L}(S) = \left( W_y(S) + \frac{W(S)_{OB}}{W(S)_P W(S)_{OP}} \right) W(S)_{L_{\text{шт}}-L} \quad (4.1)$$

где

$$W(S)_{L_{\text{шт}}-L} = \frac{W(S)_P W(S)_{OP}}{1 + W(S)_P W(S)_{OP}}$$

Выражение (4.1) можно записать так:

$$W(S) = W_{\Phi}(S) W_{L_{\text{зд}}-L}(S),$$

где 
$$W_{\Phi}(S) = W_y(S) + \frac{W_{OB}(S)}{W_p(S) W_{OP}(S)} \quad (4.2)$$

передаточная функция фильтра по возмущающему каналу.

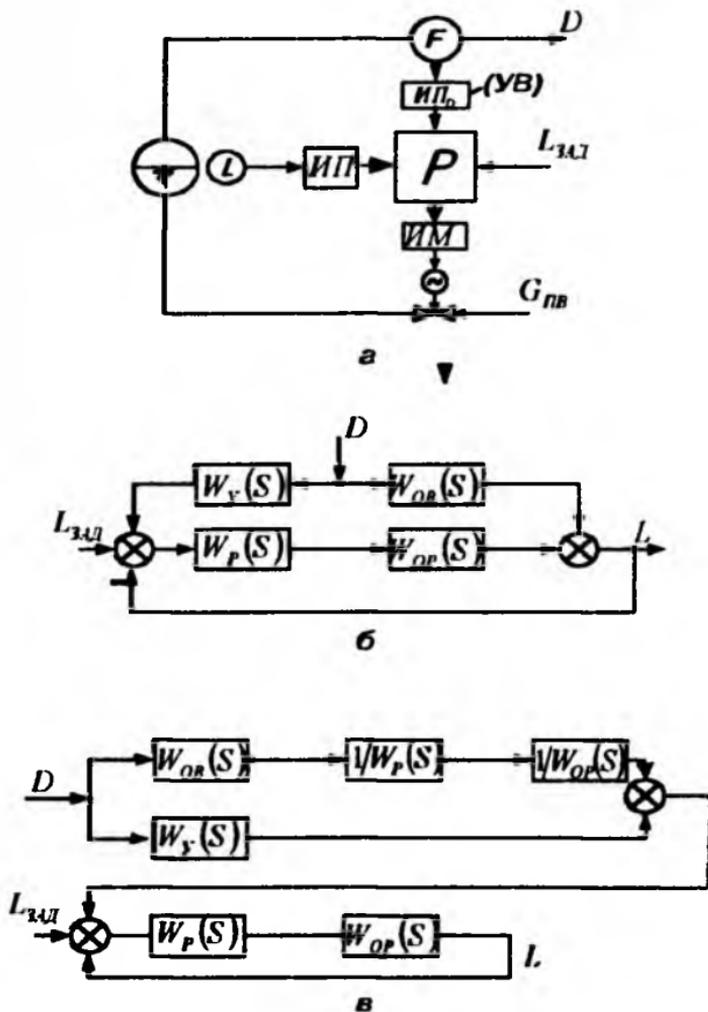


Рис.4.2. Принципиальная схема АСР уровня с устройством ввода по возмущению

Для того, чтобы система была инвариантной к возмущению по расходу пара  $D$ , должно выполняться условие:

$$W(S) = 0. \quad (4.3)$$

При этом условии из (4.2) получаем

$$W(S) = \frac{W(S)}{OB} \frac{1}{W(S) W(S)} \cdot \quad (4.4)$$

Если предположить, что динамические свойства ПГ по возмущающему и регулирующему каналам одинаковы, но противоположны по знаку, т.е.

$$W(S) = -W(S). \quad (4.5)$$

то

$$W(S) = \frac{1}{W(S)}. \quad (4.6)$$

Поскольку для П-регулятора  $W(S) = K_p$ , то получаем

$$W(S) = \frac{1}{K_p} = K_y. \quad (4.7)$$

Таким образом, в предположении (4.5) устройство ввода должно описываться уравнением пропорционального звена с коэффициентом передачи  $K_y$ . Однако в таком случае необходимость в специально создаваемом устройстве ввода отпадает, так как преобразователи расхода (дифманометры) описываются уравнением пропорционального звена, а необходимый коэффициент передачи  $K_y$  можно получить с помощью ручки "чувствительность" в самом регуляторе.

Однако рассмотренная 2-импульсная схема регулирования в промышленности не применяется по следующим причинам:

- 1) расход питательной воды через регулирующий питательный клапан зависит не только от положения клапана, но и от перепада давления на нем, который в процессе эксплуатации может изменяться;
- 2) в дифманометрах-расходомерах прежних лет выпуска выходной сигнал был пропорционален корню квадратному из перепада давления.

Указанные недостатки 2-контурной АСР устраняются введением в регулятор третьего импульса по расходу питательной воды от дифманометра-расходомера. Такая 3-импульсная АСР изображена на рис.4.3. Принцип работы АСР следующий. Сигналы по расходу пара и питательной воды вводятся в регулятор с противоположными знаками. В установившемся состоянии эти сигналы равны, противоположны по знаку и, следовательно, компенсируют друг друга.

Сигнал по уровню воды в ПГ компенсируется сигналом задания. При изменении расхода пара мгновенно изменяется соответствующий сигнал на входе в регулятор и последний пропорционально изменяет расход питательной воды, не дожидаясь изменения уровня.

В регуляторе используется ПИ-закон регулирования, однако вследствие ввода в регулятор практически безынерционной отрицательной обратной связи по расходу питательной воды в нем реализуется П-закон регулирования (аналогия жесткой обратной связи по положению регулирующего органа). Статическая неравномерность П-регулятора устраняется корректирующим сигналом по расходу пара.

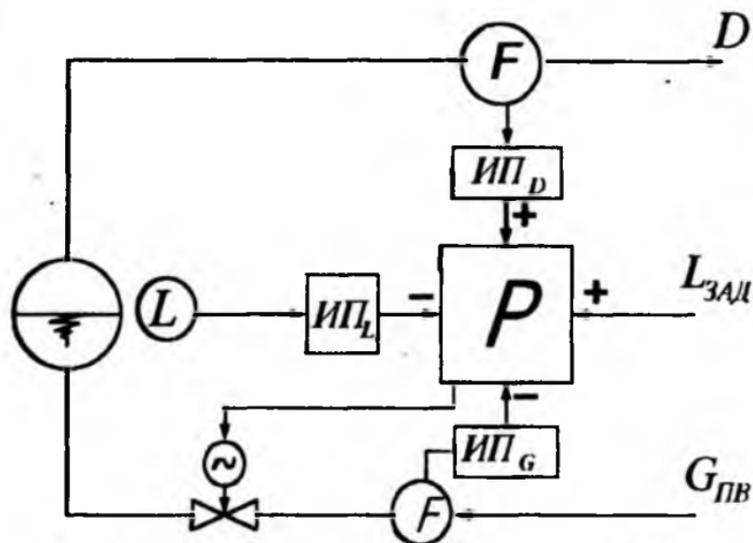


Рис. 4.3. Принципиальная схема 3-импульсной АСР уровня

Рассмотрим методику расчета 3-импульсной АСР с импульсом по расходу пара.

1. Определяются коэффициенты передачи дифманометров уровнемера  $K_L$ , мА/м, расхода пара  $K_D$ , мА·с/кг, расхода питательной воды  $K_G$ , мА·с/кг

(напоминаем, что шкала расходомеров градуируется обычно в т/ч или м<sup>3</sup>/ч, однако для расчета АСР предел измерений необходимо выразить в кг/с).

2. Определяют передаточную функцию условного объекта по регулируемому каналу "расход питательной воды  $G_{ПВ}$  - уровень  $L$ ".

$$W_{G_{ПВ}-L}(S) = \frac{K_2}{S} e^{-\tau S}; \quad K_2 = \frac{dH/dt}{\Delta G_{ПВ}} \quad (4.8)$$

Коэффициенты  $K_2$ , м/кг и  $\tau$ , с передаточной функции определяют по аппроксимированной кривой разгона.

3. Определяют передаточную функцию условного объекта

$$W_{об}^* = W_{G-H}(S) \cdot W_L(S) = \frac{K_2}{S} e^{-\tau S} \cdot K_L = \frac{K^*}{S} e^{-\tau S}, \quad (4.9)$$

где  $K^*$  выражен в тА/кг.

4. Находят по номограммам или формулам коэффициент передачи  $K_p^*$ , кг/(тА·с) условного П-регулятора. В частности, можно воспользоваться формулами А.П. Копеловича

$$K_p^* = \frac{0.4}{K^* \tau} \quad \text{для аperiodического процесса;}$$

$$K_p^* = \frac{0.7}{K^* \tau} \quad \text{для процесса с 20% перерегулированием}$$

либо формулой Е.П. Стефани

$$K_p^* = \frac{1}{K^* \tau} \quad \text{для процесса с } \psi = 0.75;$$

5. Определяют требуемый коэффициент передачи дифманометров расходомеров

$$K_G^{TP} = K_D^{TP} = \frac{1}{K_p^*} \quad (4.10)$$

6. Принимают уставку ручки "чувствительность" по уровню, равной 1, т.е.  $\alpha_L = 1$ . Определяют уставки ручек "чувствительность" регулятора по расходу пара и питательной воды:

$$K_G^{mp} = \alpha_G K_G, \quad (4.11)$$

откуда

$$\alpha_G = \frac{K_G^{TP}}{K_G};$$

$$K_D^{mp} = \alpha_D K_D,$$

откуда

$$\alpha_D = \frac{K_D^{TP}}{K_D}.$$

Здесь  $K_D, K_G$  определены в п.1.

Если в результате расчета окажется, что  $K_G^{TP} > K_G$  и  $K_D^{TP} > K_D$ , то следует ввести  $\alpha_L < 1$  и заново произвести расчет с п.3.

7. Рассчитывают настройки ПИ-регулятора контура стабилизации расхода питательной воды. Передаточная функция этого объекта по регулирующему каналу

$$W_{вн}(S) = W_{по}(S) W_{тп}(S) W_G(S),$$

где  $W_{по}(S)$ ,  $W_{тп}(S)$ ,  $W_G(S)$  - передаточные функции регулирующего питательного клапана, трубопровода по каналу "расход-расход" и дифманометра-расходомера.

Последняя, как правило, не известна, однако вследствие небольшой длины участка трубопровода и несжимаемости среды такой объект практически безынерционен. Для получения возможности использования номограмм для расчета настроек регулятора можно задать

$$W_{TP}(S) = \frac{1}{T_{mp}S + 1} e^{-\tau_{mp}S} \quad (4.12)$$

Рассмотренная 3-импульсная схема регулирования уровня многие годы используется в барабанных парогенераторах, однако в последние годы на некоторых АЭС она претерпела некоторые изменения.

Это связано с желанием исключить необратимые потери давления в сужающем устройстве для измерения расхода пара. Эти потери, не столь существенные для крупных энергоблоков ТЭС, являются существенными для атомных энергоблоков, вырабатывающих насыщенный пар относительно низкого давления. В модернизированной схеме в регулятор вместо сигнала по расходу пара вводится сигнал по разности температур теплоносителя в горячей и холодной нитках циркуляционных трубопроводов  $\Delta T = T_G - T_X$ .

Однако указанный сигнал при резком изменении расхода пара изменяется с существенным емкостным запаздыванием, вследствие чего регулятор ложно срабатывает по фактору "набухания" уровня, не обеспечивая требуемого качества регулирования. Обнаружились и другие недостатки такой схемы:

- при возрастании электрической мощности вследствие изменения температуры питательной воды возникает существенная погрешность оценки расхода пара непосредственно по сигналу  $\Delta T$ , что приводит к изменению поддерживаемого регулятором уровня в ПГ на 0,1 м;
- при отключении ГЦН сигнал изменяется с большой инерционностью, вследствие чего регулятор уменьшает подачу питательной воды также с большой инерционностью, что приводит к перепитке соответствующего ПГ.

Для устранения указанных недостатков были приняты следующие технические решения. Для исключения статической неравномерности по уровню применена коррекция сигнала  $\Delta T$  по температуре питательной воды  $T_{ПВ1}$  и  $T_{ПВ2}$  в двух нитках. Для более быстрого реагирования АСР на возмущение по пару в регулятор введен дополнительный сигнал по скорости изменения давления в ГПК (рис.4.4). Для устранения перепитки ПГ при отключении ГЦН было введено управление регулятором питания по возмущению: при отключении ГЦН проводится принудительное закрытие по блокировке соответствующего основного регулирующего питательного клапана РПК и задвижки перед ним. Регулирование уровня в этом ПГ переводится на регулятор питания пускоостановочный (РППО), работающий в стерегушем режиме по П-закону. При включении ГЦН под действием блокировки проводится принудительное открытие РПК в течение 1 мин при закрытой задвижке перед ним и затем, когда по окончании "набухания" уровень в ПГ начинает уменьшаться, производится открытие задвижки и включение в работу регулятора питания основного (РПО).

Рассмотрим моделирование 3-импульсной АСР с импульсами по уровню воды и расходом пара и питательной воды. Как уже указывалось, динамику объекта с "набуханием" уровня воды можно моделировать с помощью передаточных функций вида (4.2).

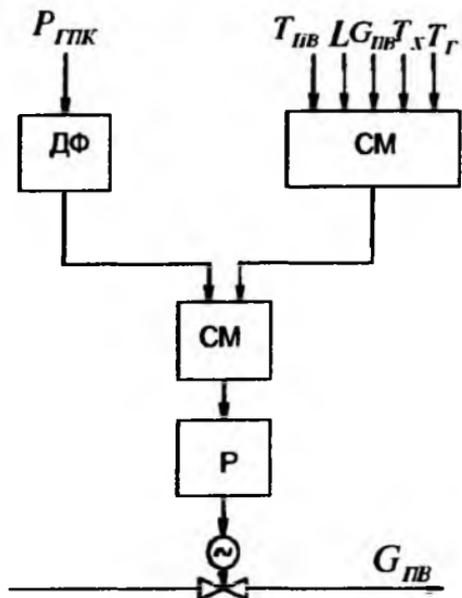


Рис. 4.4. Принципиальная схема модернизированной АСР уровня

На рис. 4.5 изображена структурная схема модели АСР уровня, позволяющая моделировать возмущающие воздействия по расходу пара  $D$  и воды  $G$ .

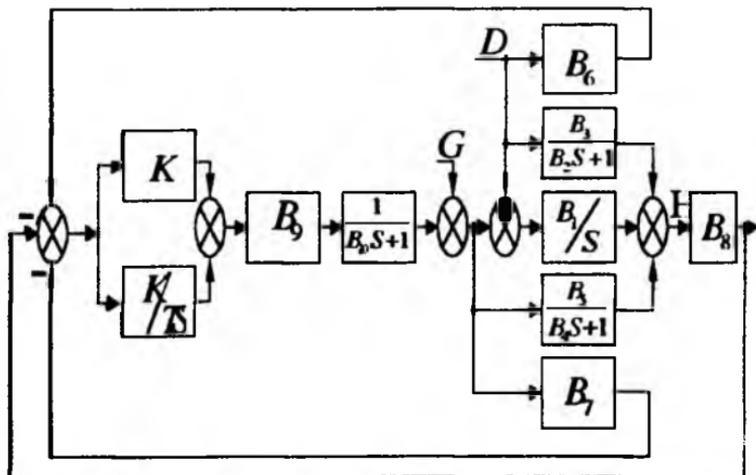


Рис. 4.5. Структурная схема модели 3-импульсной АСР питания

Собственно объект по каналу регулирующего воздействия моделируется параллельно включенными звеньями с передаточными функциями  $B_1/S$ ,  $B_5/(B_4S+1)$ , а по каналу расхода пара  $D$  - передаточными функциями  $B_1/S$ ,  $B_3/(B_2S+1)$ .

Таким образом, астатизм объекта моделируется общим для обоих интегральным звеном, знак воздействия на уровень воды при возмущении расходом пара  $D$  и воды  $G$  учитывается в сумматоре перед указанным звеном. Динамические свойства ПГВ-1000 в номинальном режиме удовлетворительно описываются при следующих коэффициентах передаточных функций:

$$B_1 = 37 \cdot 10^{-6};$$

$$B_2 = 10 \text{ с};$$

$$B_3 = 0,0038;$$

$$B_4 = 13 \text{ с};$$

$$B_5 = -0,0006.$$

При этом расход среды выражен в кг/с, а уровень воды - в метрах. Звенья с коэффициентами  $B_6$ ,  $B_7$  и  $B_8$  моделируют динамику дифманометров соответственно по расходу пара, воды и уровню воды. А именно:

$$B_6 = K_D \alpha_D;$$

$$B_7 = K_G \alpha_G;$$

$$B_8 = K_H \alpha_H,$$

где  $K_D, K_G, K_H$  - коэффициенты передачи дифманометров;

$\alpha_D, \alpha_G, \alpha_H$  - положения ручек "чувствительность" регулятора по соответствующим входам.

Выходной сигнал дифманометра - мА.

Коэффициент  $B_9$  - коэффициент передачи регулирующего органа, кг/(с·%)

Участок питательного трубопровода от РО до сужающего устройства моделируется инерционным звеном с передаточной функцией  $1/(B_{10}S+1)$ .

Пропорциональная и интегрирующая составляющие ПИ-регулятора моделируются раздельно.

## 4.2. Автоматическое регулирование производительности турбопитательных насосов

Регулирование производительности турбопитательных насосов (ТПН) при изменении нагрузки реакторной установки является очень важной задачей регулирования энергоблока. Система регулирования производительности ТПН, тесно связанная с системой регулирования питания парогенераторов, способствует повышению экономичности работы энергоблока, его динамической устойчивости в переходных режимах и надежности работы регулирующих питательных клапанов (РПК).

Рассмотрим некоторые теоретические вопросы регулирования производительности ТПН. При изменении нагрузки энергоблока и расхода пара на турбину соответственно изменяется подача питательной воды в ПГ с помощью РПК регулятором уровня ПГ. Если на номинальной нагрузке РПК почти полностью открыт и перепад давления на нем относительно невелик, то с уменьшением нагрузки клапан прикрывается и перепад на нем возрастает. Характер изменения перепада давления на клапане  $\Delta P_{кл}$  при неизменной скорости вращения ТПН показан на рис.4.6. Кривая  $\Delta P_{л}$  характеризует потери в питательной линии при изменении расхода питательной воды без учета потерь в РПК. При номинальной нагрузке энергоблока и расходе питательной воды в ПГ  $G_{нв}^n$  на РПК устанавливается перепад давления  $\Delta P_{кл}^n$ . При снижении нагрузки на ПГ регулятор уровня в ПГ устанавливает пониженный расход питательной воды  $G_{нв}^i$ . При этом в случае неизменной скорости вращения  $n_H$  ТПН на клапане устанавливается больший перепад давления  $\Delta P_{кл}^i$ , что приводит к повышенному износу РПК и потерям энергии на дросселирование. В то же время требуемую пониженную производительность по питательной воде можно обеспечить путем уменьшения скорости вращения ТПН до величины  $n_l$ , однако перепад давления на клапане  $\Delta P_{кл}^l$  в этом случае будет существенно меньше, чем при прежней скорости вращения. Таким образом, возникает задача выяснить, как должен изменяться перепад давления на клапане при изменении нагрузки ПГ (блока) при постоянном (примерно на 80 %) открытии клапана.

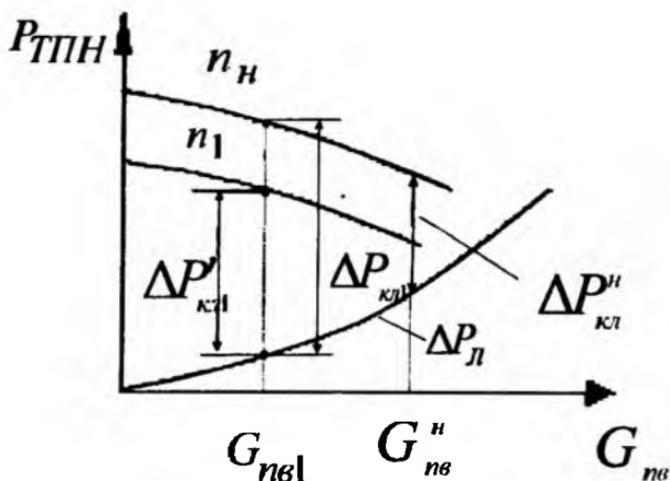


Рис. 4.6. Гидравлические характеристики питательной линии и ТПН.

Массовый расход питательной воды через регулирующий клапан

$$G_{пв} = \mu S_{кл} \sqrt{2\rho \Delta P_{кл}} . \quad (4.13)$$

где  $\mu$  - коэффициент расхода клапана;

$S_{кл}$  - площадь проходного сечения клапана;

$\rho$  - плотность питательной воды.

$$\text{Отсюда} \quad S_{кл} = \frac{G_{пв}}{\mu \sqrt{2\rho \Delta P_{кл}}} \quad (4.14)$$

Расход питательной воды пропорционален нагрузке блока и, в частности, тепловой мощности циркуляционной петли реактора

$$Q = K_1 (T_r - T_x) \sqrt{\Delta P_{пг}} , \quad (4.15)$$

где  $T_r$ ,  $T_x$  - температура воды в горячей и холодной нитках ПГ;

$\Delta P_{пг}$  - перепад давления на ПГ, характеризующий расход воды в петле.

Таким образом,

$$G_{пв} = K_2 Q = K_3 (T_r - T_x) \sqrt{\Delta P_{пг}} = K_3 \Delta T \sqrt{\Delta P_{пг}} . \quad (4.16)$$

В (4.14) перепад давления на клапане  $\Delta P_{кл}$  можно заменить перепадом давления  $\Delta P$  между коллектором питательной воды и главным паровым коллектором (ГПК), поскольку потери в питательном трубопроводе, в самом

ПГ и в паропроводе от ПГ до ГПК также пропорциональны квадрату расхода воды (пара), т.е.

$$\mu\sqrt{2\rho\Delta P_{кл}} = K_4\sqrt{\Delta P} \quad (4.17)$$

Тогда (4.14) с учетом (4.16) и (4.17) можно записать

$$S_{кл} = \frac{K_3\Delta T\sqrt{\Delta P_{ПГ}}}{K_4\sqrt{\Delta P}} \quad (4.18)$$

Поставив требование  $S_{кл} = const$ , получаем

$$\sqrt{\Delta P} = K\Delta T\sqrt{\Delta P_{ПГ}} = KQ \quad (4.19)$$

Таким образом, корень квадратный из  $\Delta P$  должен быть пропорционален тепловой мощности энергоблока, в частности, циркуляционной петли реактора. Из сказанного следует, что регулятор производительности ТПН должен при изменении мощности блока изменять расход питательной воды таким образом, чтобы выдерживалось соотношение (4.19). Сигнал по тепловой мощности петли формируется в схеме основных регуляторов питания.

В связи с тем, что РПК и ПГ находятся на разных геометрических отметках, левая часть (4.19) представляет собой величину

$$\sqrt{\Delta P} = \sqrt{\Delta P_{ИЗМ} - \Delta P_z} \quad (4.20)$$

где  $\Delta P_{ИЗМ}$  - измеряемый перепад давления между коллектором питательной воды и ГПК;

$\Delta P_z$  - постоянная потеря давления в трубопроводе из-за подъема питательной воды от коллектора до ПГ.

Схема автоматического регулирования производительности ТПН показана на рис.4.7. Регулятор производительности  $P_{ПГ}$  ПИ-действия получает сигнал, пропорциональный корню квадратному из  $\Delta P$  (с учетом (4.20)), в качестве задающего сигнала на его вход поступает сигнал  $Q$  тепловой мощности петли. Регулятор воздействует на механизм управления турбиной (МУТ) регулятора скорости вращения  $P_n$  каждого из ТПН, что приводит к изменению расхода пара на приводную турбину, скорости ее вращения и соответственно производительности насоса. В качестве сигнала  $Q$  используется максимальный сигнал из сигналов четырех циркуляционных петель. Предусматривается также синхронизация работы ТПН по сигналам расхода питательной воды в нитках А и Б, ограничение производительности ТПН и, в случае необходимости, принудительная разгрузка ТПН.

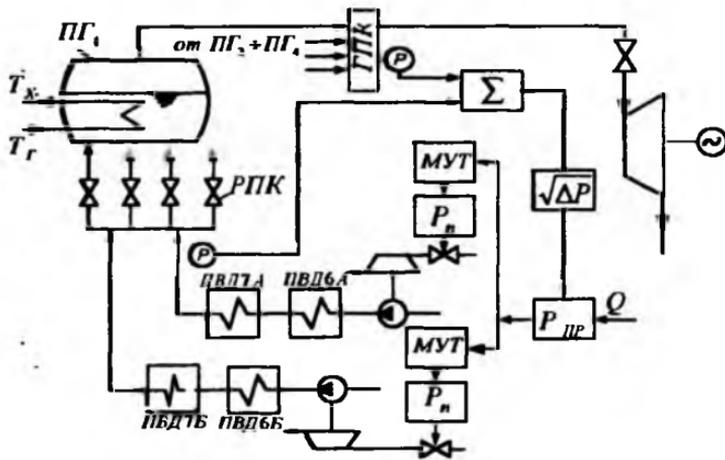


Рис. 4.7. Принципиальная схема автоматического регулирования производительности ПТН

### 4.3. Применение современных методов цифрового управления участком питания парогенератора

Появление микропроцессорной техники, имеющей низкую стоимость, малые размеры, высокую надежность и универсальность в функциональном отношении, открывает новые возможности для совершенствования систем контроля и управления технологическими процессами АЭС и ТЭС.

С внедрением микропроцессорной техники появляются условия:

- реализации сложных, в том числе новых алгоритмов регулирования и управления и перехода к непосредственному цифровому управлению;
- построения более надежных распределенных систем управления и обработки информации на основе принципа децентрализации, дающего ряд существенных преимуществ перед централизованными системами;
- высокой степени параллелизма в обработке информации, перехода к системам многопроцессорной и сетевой обработки информации;
- осуществления функционального преобразования сигналов, их первичной и статистической обработки и др.

В настоящее время на АЭС и ТЭС Украины осуществляется модернизация систем контроля и управления технологическими процессами. Однако такая модернизация систем управления сводится, как правило, к замене устаревших технических средств с ограниченными функциональными возможностями и низкой надежностью на микропроцессорные средства с сохранением прежних алгоритмов управления. Это относится и к системам управления питанием парогенератора, в которых сохранена трехимпульсная система регулирования

уровня воды в ПГ. В качестве примера исключения из общей тенденции можно назвать введение корректирующего сигнала по нагрузке энергоблока в системы регулирования уровня воды в конденсаторе и регенеративных подогревателях для устранения неравномерности регулирования (составляла около 200 мм).

В связи с этим представляет интерес применение новых современных методов и алгоритмов регулирования для управления участком питания барабанного парогенератора АЭС, имеющего, как было показано, сложные динамические свойства.

#### 4.3.1. Дискретный оптимальный с наблюдателем состояния ПИ-регулятор уровня воды в барабанном парогенераторе

Рассмотрим синтез оптимального цифрового ПИ-регулятора уровня воды для парогенератора ПГВ-1000 АЭС с ВВЭР. Для синтеза оптимального регулятора воспользуемся ранее разработанной моделью парогенератора по уровню воды и трубопровода от РПК до ПГ (рис. 4.8) (в модели ПГ для получения большей адекватности модели объекту добавлено еще одно инерционное звено [20]).

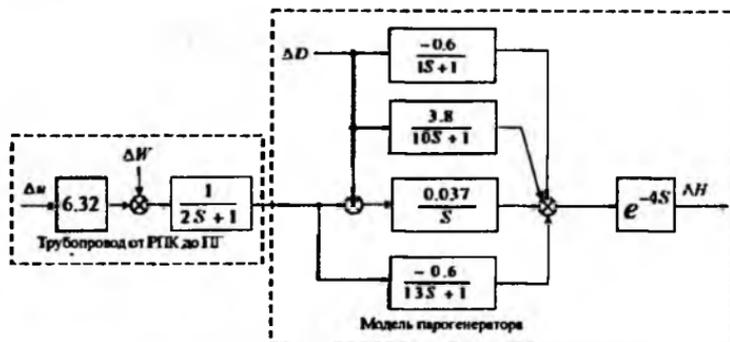


Рис. 4.8. Структурная схема парогенератора

При этом математическая модель представляется системой разностных уравнений с периодом дискретности  $\Delta t = 1$  с (дискретность в 1 с принята в цифровых системах ПО "Монолит", которое внедряет цифровые АСУ ТП на АЭС:

$$\begin{cases} x_{i+1} = A \cdot x_i + B \cdot (u_i + f_i), \\ y_i = C \cdot x_i, \end{cases} \quad (4.13)$$

где  $x_i$  – вектор внутреннего состояния системы;  $y_i$  – выход системы (изменение уровня воды);  $u_i$  – изменение управляющего воздействия (положение штока регулирующего органа);  $f_i$  – вектор возмущений (расходы свежего пара  $\Delta D$  и

питательной воды  $\Delta W$ );  $A, B, C$  – матрицы параметров модели;  $i$  – номер такта времени.

При моделировании учтена реальная скорость перемещения штока регулирующего питательного клапана, используемого в ПГВ-1000, которая равна одному проценту в секунду.

Введем переменные  $dx_i = u_i - u_{i-1}$ ,  $e_i = (z - y_i)$  ( $z$  – сигнал задания) и функционал энергии вида [21]

$$J = 0.5 \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \{e_i^T \cdot Q \cdot e_i + du_i^T \cdot R \cdot du_i\},$$

где  $Q, R$  – положительно-определенные матрицы, значения которых подбираются в процессе синтеза регулятора;  $\tau$  – символ транспонирования.

Обозначив  $dx_{i+1} = x_{i+1} - x_i$ , уравнения системы (4.1) можно переписать следующим образом:

$$\begin{cases} dx_{i+1} = A \cdot dx_i + B \cdot du_i, \\ dy_i = C \cdot dx_i, \end{cases}$$

а записав  $e_{i+1} = e_i - C \cdot dx_{i+1}$  и введя вектор  $s_i = [e_i, dx_i]^T$ , получим систему в стандартной форме записи, но уже для переменных  $s$  и  $du$

$$\begin{cases} ds_{i+1} = \bar{A} \cdot ds_i + \bar{B} \cdot du_i, \\ e_i = \bar{C} \cdot ds_i, \end{cases}$$

и соответственно функционал энергии

$$J = 0.5 \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \{s_i^T \cdot Q' \cdot s_i + du_i^T \cdot R \cdot du_i\}, \quad (4.14)$$

$$\text{где } \bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & -C \cdot A \\ 0 & A \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} -C \cdot B \\ B \end{bmatrix}, \bar{C} = [1 \quad 0], Q' = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Приведенный критерий следует минимизировать на траекториях движения системы с учетом ограничений на скорость изменения управляющего воздействия и величину динамического отклонения регулируемого параметра.

Коэффициенты в весовых матрицах  $Q$  и  $R$  выбираются из соображений получения требуемого качества переходного процесса регулирования.

Вследствие решения стандартной задачи конструирования получаем регулятор состояния вида  $du_i = -K \cdot ds_i$ , матрица  $K$  в котором может быть разделена на блоки  $K = [K_1, K_2]$ , а регулятор состояния переписан в виде  $du_i = -K_1 \cdot e_i - K_2 \cdot dx_i$ , или  $u_i = -K_1 \cdot \sum_{j=0}^i e_j - K_2 \cdot x_i$ , что соответствует структуре ПИ-

регулятора, обеспечивающего астатичность системы [22]. Коэффициент при интегральной составляющей является скалярной величиной, а коэффициент пропорциональной составляющей является вектором, размерность которого определяется количеством дифференциальных уравнений первого порядка, необходимых для описания регулирующего канала.

Так как уравнения в приращениях не зависят от векторов  $z$  и  $f$ , то для восстановления недостающих координат можно использовать обычный наблюдатель состояния (наблюдатель Луенбергера полного порядка) [21]  $\hat{dx}_{i+1} = \bar{A} \cdot \hat{dx}_i + \bar{B} \cdot du_i + L \cdot (dy_i - \bar{C} \cdot \hat{dx}_i)$ , где  $L$  – матрица наблюдателя состояния системы.

Особенностью синтезированной системы управления (рис. 4.9) является использование лишь одного сигнала по уровню воды, вместо трех в типовой системе.

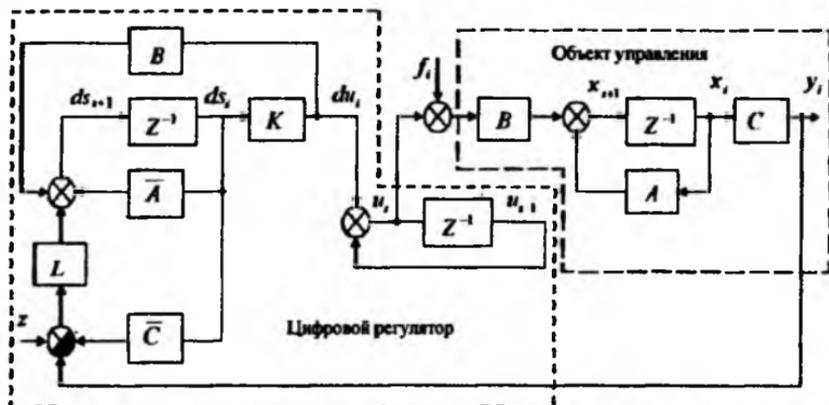


Рис. 4.9. Структурная схема дискретной оптимальной с наблюдателем состояния АСР уровня воды в барабанном парогенераторе ПГВ-1000

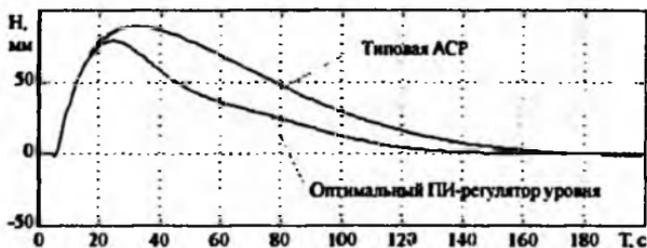


Рис. 4.10. Изменение уровня (возмущение – расход пара)

Переходные процессы регулирования по уровню воды  $H$  в синтезированной цифровой системе сравним с переходными процессами в типовой трехимпульсной системе с импульсом по расходу пара, которая

обеспечивает лучшее качество регулирования при действии основного возмущающего воздействия – расхода пара по сравнению с АСР с импульсом “по теплу” (рис. 4.10).

В качестве оптимального выбран апериодический процесс регулирования, как это принято на АЭС. Скачкообразное возмущающее воздействие по расходу пара было принято равным 10 % от номинального расхода пара, т.е. 40.8 кг/с.

В схеме с дискретным оптимальным с наблюдателем состояния ПИ-регулятором для минимизации (4.14) приняты следующие весовые матрицы:  $Q = [1]$ ,  $\text{мм}^{-2}$  и  $R = [1000]$ ,  $\%^{-2}$ .

Как видно из результатов моделирования, оптимальный цифровой ПИ-регулятор обеспечивает на 10 % меньший динамический заброс по уровню воды и меньшее время регулирования (примерно на 30 с) (рис. 4.10). Управляющее воздействие  $u$  в оптимальной системе больше, чем в типовой, однако по абсолютной величине (около 9 %) вполне допустимо в реальных системах (рис. 4.11).

Использование для управления лишь одного сигнала от дифманометра-уровнемера повышает надежность системы и удешевляет ее стоимость, поскольку при этом не требуются дифманометры-расходомеры свежего пара и питательной воды либо датчики температуры для модернизированных систем.

Такой оптимальный ПИ-регулятор может быть также использован в барабанных парогенераторах ТЭС.



Рис. 4.11. Изменение положения РПК (возмущение – расход пара)

### 4.3.2. Дискретное многомерное оптимальное управление с наблюдателем состояния участком питания барабанных парогенераторов энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000

Рассмотрим возможности использования дискретного многомерного оптимального управления с наблюдателем состояния для управления всем участком питания ПГ, т.е. с учетом питательных турбонасосов. В энергоблоке с ВВЭР-1000 имеется четыре циркуляционных петли с четырьмя парогенераторами, объединенными питательными трубопроводами и паропроводами второго контура. Для синтеза многомерного дискретного регулятора необходимо иметь математическую модель всего участка питания. Необходимо также учитывать взаимное влияние каждого РПК на расход питательной воды к другим парогенераторам. Для этого воспользуемся [23].

Ниже рассмотрен синтез многомерных АСР для двух режимов:

- все регулирующие питательные клапаны ПГ открыты на 70-80%, воздействие многомерного регулятора осуществляется на все РПК и на ППН (вариант 1);
- один РПК открыт полностью, т.е. поддерживается минимальное дросселирование, управление осуществляется остальными тремя РПК и ППН (вариант 2).

Рассмотрим синтез многомерного регулятора по 1-му варианту (рис. 4.11).

Структурная схема многомерной АСР состоит из многомерного ПИ-регулятора участка питания, на вход которого поступают сигналы по уровню воды в четырех парогенераторах, сигнал разности давлений питательной воды перед РПК и давления пара в ГПК, сигналы задания по уровню воды в парогенераторах и квадрат сигнала задания по тепловой мощности соответственно. Выходом многомерного регулятора являются сигналы по перемещению РПК парогенераторов и сигнал по перемещению регулирующих клапанов приводных турбин ППН, работа которых синхронизируется.

Весовые матрицы для расчета многомерного регулятора для этого случая имеют следующие коэффициенты:

$$Q' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10000 \end{bmatrix} \text{ и } R = \begin{bmatrix} 10000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix}.$$

Размерность коэффициентов такова:  $q_{ii}$  - в  $\text{мм}^{-2}$ ,  $i=1,4$ ;  $q_{55}$  - в  $\text{МПа}^{-2}$ ;  $r_{ii}$  - в  $\%^{-2}$ ;  $i=1,5$ .

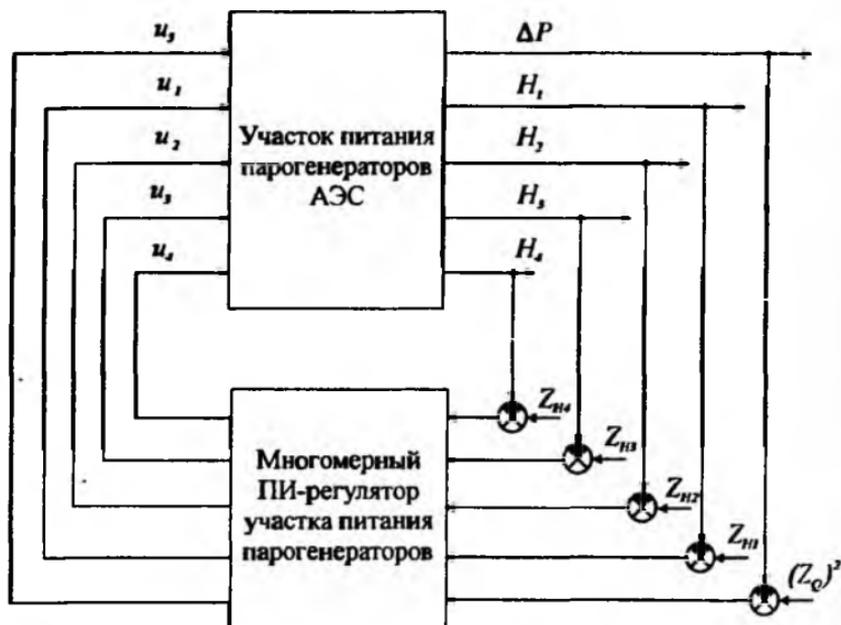


Рис. 4.11. Структурная схема многомерной АСР участка питания парогенераторов АЭС с ВВЭР (вариант 1)

Величина положительного возмущения расходом пара соответствует изменению мощности блока на 100 МВт.

Переходные процессы приведены на рис. 4.12–4.15. Для сравнения на этих же рисунках представлены переходные процессы в типовой АСР, состоящей из регулятора производительности ПТН и четырех трехимпульсных АСР уровня воды в парогенераторе. Результаты моделирования показывают, что переходные процессы по уровню в модели участка питания парогенераторов с многомерным ПИ-регулятором имеют меньшее динамическое отклонение уровня и время переходного процесса. В связи с увеличением расхода заданное значение регулируемого перепада давления  $\Delta P$  на входе в регулятор производительности ПТН увеличивается, что видно из рис. 4.13. При этом динамическое отклонение управляющего воздействия по изменению положения РПК меньше, чем в типовой, и не превышает шести процентов (рис.4.14). Основное регулирующее воздействие осуществляется изменением производительности ПТН, динамическое отклонение регулирующих клапанов приводных турбин составляет  $\approx 7\%$  и является вполне приемлемым (рис.4.15).

Таким образом, использование многомерного ПИ-регулятора для управления участком питания является эффективным.

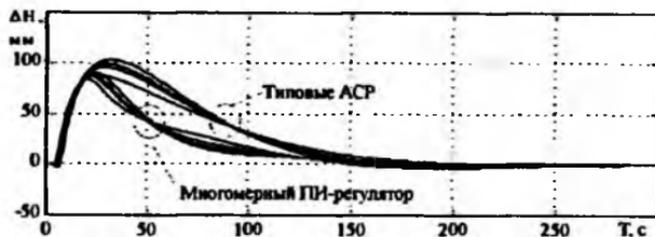


Рис. 4.12. Изменение уровня воды в парогенераторах

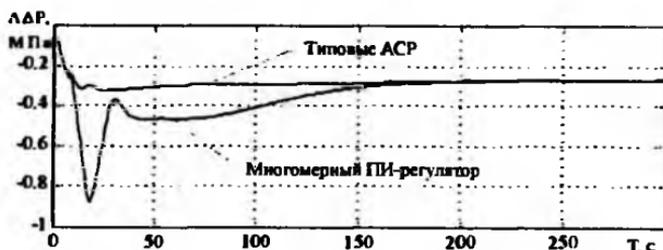


Рис. 4.13. Изменение регулируемой разности давлений



Рис. 4.14. Изменение положения РПК

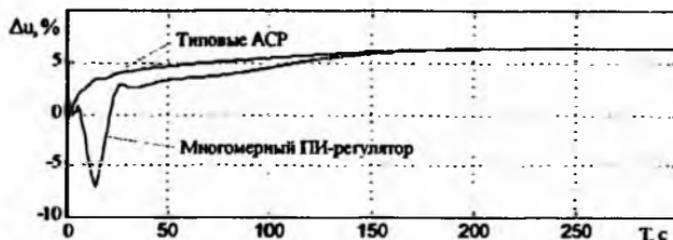


Рис. 4.15. Изменение положения клапанов приводных турбин ПТН

Рассмотрим синтез многомерного регулятора по 2-му варианту. В этом режиме энергоблок работает на 100 % своей мощности. Один из РПК

полностью открыт, и номинальное значение уровня в этом парогенераторе фактически поддерживается регулятором производительности ПТН, на вход которого подается сигнал по уровню воды в парогенераторе. Структурная схема АСР изображена на рис.4.16.

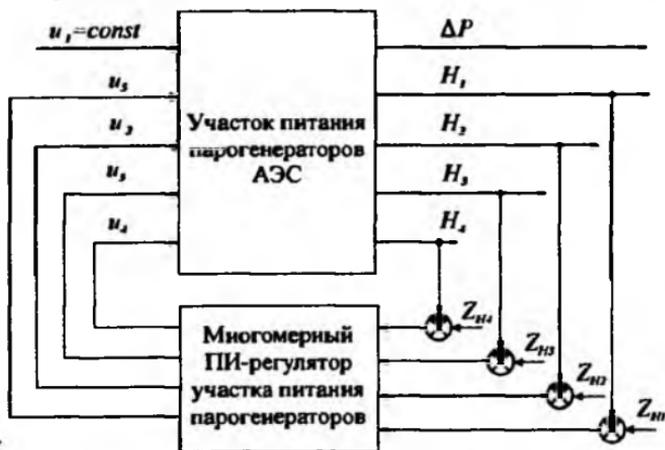


Рис. 4.16. Структурная схема многомерной АСР участка питания в режиме минимального дросселирования (вариант 2)

Весовые матрицы для расчета многомерного регулятора для этого случая имеют коэффициенты:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 10000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10000 \end{bmatrix}$$

Размерность коэффициентов следующая:  $q_{ii}$  - в  $мм^{-2}$ ,  $i=1,4$ ;  $r_{ii}$  - в  $\%^{-2}$ ;  $i=1,4$ .

Переходные процессы в типовой и многомерной АСР представлены на рис. 4.17 - 4.20.

Регулятор производительности ПТН в типовой (штатной) АСР работает по пропорционально-интегральному закону, и его использование для регулирования уровня приводит к большому динамическому отклонению уровня в парогенераторе и колебательному переходному процессу (4.17). Как видно, уровень воды в том парогенераторе, который управляется лишь изменением производительности ПТН, отклоняется существенно больше, чем в остальных парогенераторах, управляемых непосредственно регулируемыми питательными клапанами. Поскольку изменение производительности ПТН оказывает влияние на уровень во всех четырех ПГ, то это приводит к большому отклонению РПК трех парогенераторов, которым приходится компенсировать

колебания, вносимые регулятором производительности ПТН (рис. 4.19). Многомерный регулятор, как и следовало ожидать, дает минимальное динамическое отклонение уровня воды в ПГ, меньшую длительность переходного процесса и небольшие перемещения РПК. В связи с изменением паровой нагрузки парогенераторов положение регулирующих клапанов ПТН также увеличилось (4.20).

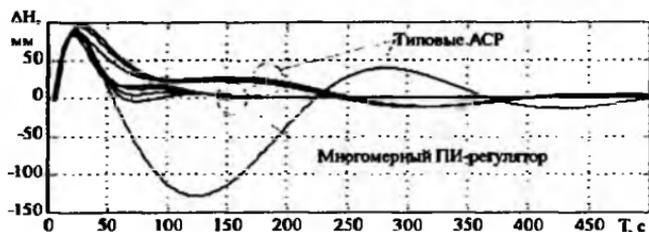


Рис. 4.17. Изменение уровня воды в парогенераторах

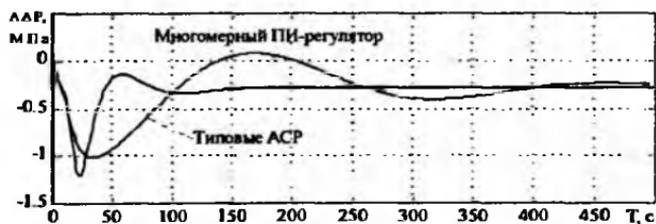


Рис. 4.18. Изменение регулируемой разности давлений

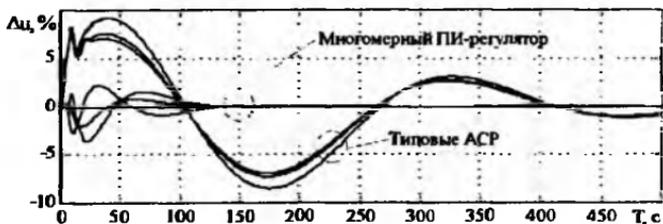


Рис. 4.19. Изменение положений РПК

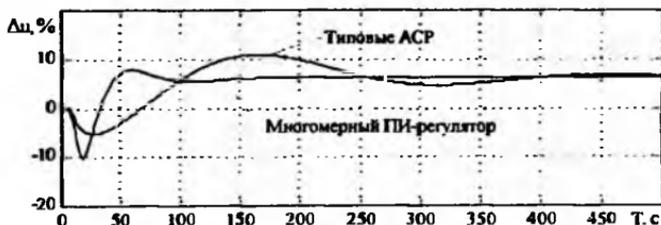


Рис. 4.20. Изменение положения регулирующих клапанов ПТН

## 5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРА И РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

### 5.1. Автоматическое регулирование конденсатора

Уровень воды в конденсаторе должен поддерживаться по возможности постоянным независимо от нагрузки турбины. Снижение уровня воды может привести к кавитации конденсатных насосов, а повышение - к затоплению части теплообменной поверхности, ухудшению теплообмена и ухудшению экономичности энергоблока. Единственным регулирующим воздействием при стабилизации уровня может быть изменение производительности конденсатных насосов с помощью регулирующего клапана 1 (рис.5.1), установленного за конденсатными насосами 2 и охладителями пара эжекторов 3. Однако при снижении нагрузки турбины и уменьшении расхода конденсата может нарушиться работа как конденсатных насосов, так и холодильников пара эжекторов, что приведет, в свою очередь, к срыву вакуума в конденсаторе. С этой целью регулирование уровня воды в конденсаторе осуществляется с помощью трехходового клапана и линии рециркуляции 4, по которой часть конденсата сбрасывается обратно в конденсатор.

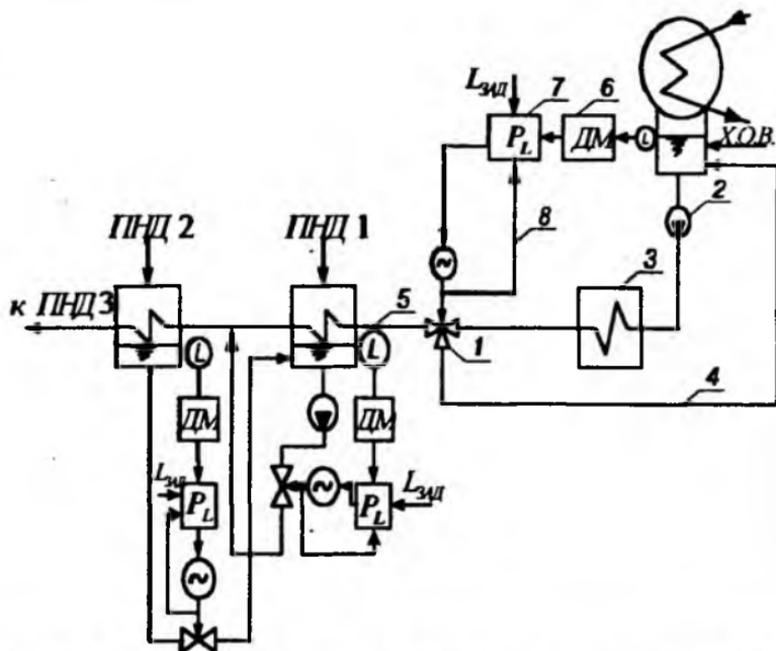


Рис. 5.1. Принципиальные схемы АСР уровня в конденсаторе и ПНД

Возможны два варианта работы линии рециркуляции. В первом варианте линия рециркуляции открывается при достижении энергоблоком определенной малой нагрузки, когда обеспечивается определенный пропуск воды в систему регенеративных подогревателей. При этом оба клапана, основной и рециркуляции, выполнены в одном корпусе.

Во втором варианте регулирование осуществляется с помощью трехходового клапана, характеристики которого подобраны так, что при любом его положении расход через насос 2 и холодильники эжекторов 3 постоянен, а меняется соотношение расходов через линию рециркуляции 4 и основную магистраль 5. Таким образом, расход конденсата в линии 5 устанавливается равным сумме расходов пара и химочищенной воды.

Рассмотрим вопрос выбора закона регулирования. Как объект регулирования уровня конденсатосборник представляет собой герметичный бак с насосом на сливе, т.е. не обладает самовыравниванием. Его передаточная функция  $W(s) = K/s$ . Применение ПИ-закона регулирования для такого объекта приводит к длительному колебательному процессу регулирования, что нежелательно. Кроме того, для конденсатора допускается неравномерность регулирования.

Поэтому применяют П-закон регулирования, который реализуется охватом ПИ-регулятора 7 жесткой обратной связью по положению регулирующего органа 8. Уровень в конденсатосборнике измеряется дифманометром 6, сигнал от которого поступает на регулятор, где сравнивается с сигналом задания  $L_{зад}$ .

Таким образом, на вход регулятора поступают два сигнала: по уровню конденсата и по положению клапана. Настройками регулятора являются положения ручек "коэффициент пропорциональности" для указанных двух входов.

Абсолютная неравномерность регулирования уровня обычно составляет 250 мм, или 2,5 мм/% хода клапана. Поскольку регулирующий орган находится на стоке конденсата, то положение уровня, которое стабилизируется регулятором, с увеличением нагрузки блока возрастает. Для устранения неравномерности в регулятор можно ввести импульс, пропорциональный тепловой мощности петли  $\Delta T \cdot \sqrt{\Delta P}$  первого контура.

Рассмотрим методику расчета коэффициента передачи П-регулятора  $K_p$  и уставки регулятора.

Для пропорционального закона регулирования имеем

$$\Delta h = K_p \Delta l,$$

где  $\Delta h$  - перемещение регулирующего клапана, %;

$\Delta l$  - отклонение регулируемого параметра на выходе измерительного преобразователя, мА.

Абсолютную неравномерность регулирования параметра в статике для П-регулятора обычно задают в единицах регулируемой величины, например 0,2 м отклонения уровня воды на 100 % хода клапана. Тогда абсолютная неравномерность регулирования на выходе измерительного преобразователя

$$\Delta I_{MAX} = 0.2 K_{ИП},$$

где  $K_{ИП}$  - коэффициент передачи измерительного преобразователя.

Искомый коэффициент передачи

$$K_P = \frac{\Delta h_{MAX}}{\Delta I_{MAX}},$$

где  $\Delta h_{MAX} = 100\%$ .

Как уже указывалось, П-закон регулирования в электронных регуляторах реализуется охватом ПИ-регулятора жесткой обратной связью по положению регулирующего органа. В этом случае ручки "скорость связи" и "время издрёма" ставят на минимальные значения и рассчитывают положения ручек "чувствительность" по параметру (например уровню воды) и жесткой обратной связи. Рассмотрим экспериментально аналитический метод расчета.

1. Устанавливают  $\alpha_{ПАР} = 0$ ,  $V_{СВ} = V_{СВ_{MIN}}$ ,  $T_{И} = T_{И_{MIN}}$  и экспериментально определяют такое  $\alpha_{ЖОС}$ , чтобы при изменении задания регулятор обрабатывал задание за 1-2 включения. Получаем значение  $\alpha_{ЖОС}$ .

2. Рассчитывают  $\alpha_{ПАР}$  по формуле

$$\alpha_{ПАР} = \frac{\alpha_{ЖОС} K_{ДП}}{K_{ИП} \delta},$$

где  $\delta$  - неравномерность регулирования, единиц регулируемого параметра на % хода регулирующего органа;

$K_{ДП}$  - коэффициент передачи датчика положения, мА/%;

$K_{ИП}$  - коэффициент передачи измерительного преобразователя, мА/единицы регулируемого параметра.

3. Определяют зону нечувствительности

$$\alpha_{НЕЧ} = \frac{\Delta_{НЕЧ} \alpha_{ПАР} 100}{D}, \%$$

где  $\Delta_{НЕЧ}$  - нечувствительность регулятора в мА;

$D$  - полный диапазон изменения параметра в мА.

При регулировании уровня воды в конденсаторе П-регулятор (расход пара) каналу описывается передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{1/(K_p K_{PO})}{TS + 1},$$

где  $T = \frac{1}{K_p K_{PO} K K_{ин}}$  - постоянная времени;

$$K = \frac{1}{F_3 \rho};$$

$F_3$  - площадь зеркала воды в конденсатосборнике;

$\rho$  - плотность конденсата.

Таким образом, при ступенчатом входном возмущении переходный процесс регулирования уровня воды будет иметь вид кривой разгона инерционного звена 1-го порядка, причем установившееся значение уровня

$$\Delta l(\infty) = \frac{1}{K_p K_{PO}} \Delta G_{п}.$$

## 5.2. Автоматическое регулирование регенеративных подогревателей

Регенеративные подогреватели низкого (ПНД) и высокого (ПВД) давления предназначены для подогрева конденсата и питательной воды паром, поступающим из отборов турбины. Конденсат (дренаж) греющего пара либо отводится самотеком в паровое пространство предыдущего по ходу воды подогревателя, либо подается насосом в линию основного конденсата (см. рис.5.1).

Величина подогрева воды в каждом подогревателе зависит от параметров пара нерегулируемых отборов турбины и определяется из статических расчетов. С изменением нагрузки турбины параметры и расход пара в отборах изменяются пропорционально нагрузке, что приводит к соответствующим изменениям подогрева воды в подогревателях. Таким образом, температура воды после подогревателей не регулируется.

Единственной регулируемой величиной в подогревателях является уровень конденсата пара. При повышении уровня заталкивается поверхность теплообмена, что ухудшает конденсацию пара. Кроме того, большой запас конденсата пара в подогревателях нежелателен, потому что при аварийной разгрузке турбогенератора давление в отборах резко понижается, что приводит к вскипанию конденсата и возможному попаданию его через паропроводы в турбину (для этого специально предусмотрены обратные клапаны).

Снижение уровня конденсата в подогревателях нежелательно из-за возможного "проскока" пара либо в нижестоящий (по давлению) подогреватель, что снижает КПД цикла, либо в дренажный насос, что вызывает кавитацию насоса.

Динамические свойства подогревателей с дренажным насосом на сливе, подобно конденсатору, описываются уравнением интегрального, астатического звена. Динамические свойства подогревателей со сливом воды самотеком формально описываются уравнением инерционного звена 1-го порядка, однако из-за больших значений постоянной времени и коэффициента передачи такие подогреватели также можно приближенно описывать уравнением интегрального звена. По этой причине для регулирования уровня воды в подогревателях применяют П-закон регулирования (ПИ-регулятор с обратной связью по положению клапана).

При регулировании уровня, например в ПНД2 (см. рис.5.1), изменяется слив конденсата из данного подогревателя, что является возмущающим воздействием для ПНД1. Для улучшения процессов регулирования в ПНД1 иногда между регуляторами устанавливают устройства динамической связи (на схеме не показано).

Динамические свойства устройства связи определяют из условия инвариантности.

## **6. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕАЗРАТОРА**

### **6.1. Автоматическое регулирование давления**

Деаэратор является смешивающим подогревателем питательной воды, в котором одновременно осуществляется ее термическая деаэрация. Принцип деаэрации заключается в том, что с повышением температуры воды при неизменном давлении растворимость газов ( $O_2$ ,  $CO_2$ ) уменьшается и становится равной нулю при температуре кипения. Деаэрация осуществляется в головке деаэрата, в верхнюю часть которой подается конденсат после подогревателей низкого давления, а в нижнюю часть - греющий пар из отбора турбины. Конденсат, сливаясь с одной дырчатой тарелки на другую, движется вниз и нагревается движущимся кверху греющим паром до температуры кипения.

Выделившиеся газы вместе с излишками пара удаляются из верхней части головки (выпар). Различают деаэраторы атмосферные ( $P=0,01\div 0,02$  МПа) и высокого давления ( $P=0,6\div 0,7$  МПа). В мощных энергоблоках применяются деаэраторы давлением 0,7 МПа. Деаэрированная вода скапливается в деаэраторном баке объемом  $100\text{ м}^3$  и более (аварийный запас воды для питания парогенератора).

Как известно, в паросиловом цикле имеются потери воды и пара. Для покрытия этого недостатка в контур добавочно подводится химически очищенная вода либо чистый конденсат из испарителей.

Косвенным показателем баланса между расходом питательной воды и расходом конденсата, возвращающегося из турбины, служит уровень воды в

деаэрационном баке. Таким образом, при автоматическом регулировании деаэратора возникают две задачи: стабилизация состояния насыщения в головке и уровня воды в баке. С точки зрения стабилизации режима деаэрации (насыщения) безразлично, как регулировать режим: по температуре или давлению. Однако из-за инерционности датчиков температуры и трудности нахождения представительной точки в головке деаэратора для измерения температуры деаэрированной воды регулирование осуществляют по давлению.

Таким образом, деаэратор как объект управления имеет две регулируемые величины: давление и уровень.

Возмущающими воздействиями на давление являются расход и давление греющего пара, расход и температура конденсата. Влиянием уровня воды в баке на давление можно пренебречь. Возмущающими воздействиями на уровень является расход пара, конденсата и питательной воды.

Регулирующим воздействием для стабилизации давления является расход греющего пара, а для стабилизации уровня, - расход добавочной химически очищенной воды.

Динамика деаэратора по давлению по регулирующему каналу описывается уравнением звена 1-го порядка

$$T_{\partial} P_{\partial}' + P_{\partial} = K D_{\Pi}, \quad (6.1)$$

где  $T_{\partial}$  - постоянная времени,

$K$  - коэффициент передачи.

Постоянная времени  $T_{\partial}$  при испарении конденсата ( $dP/dt < 0$ ) и конденсации пара ( $dP/dt > 0$ ) имеет различные значения, т.е. деаэратор по давлению является нелинейным объектом, однако это отличие невелико.

Приближенно величину  $T_{\partial}$  можно определить по формуле

$$T_{\partial} = \frac{V_{\Pi}}{Q_{\Pi}}, \quad (6.2)$$

где  $V_{\Pi}$  - объем парового пространства деаэратора;

$Q_{\Pi}$  - объемный расход пара в деаэратор.

Величина  $T_{\partial}$  находится в пределах 3-6 с.

Вывод уравнения динамики дан в разд. 10, первой части.

АСР давления в деаэраторе изображена на рис.6.1. Регулятор давления получает сигнал от датчика давления (ДД), сравнивает с заданным значением и в случае их несоответствия воздействует на паровой клапан и изменяет расход пара. Для регулирования давления применяется астатический ПИ-регулятор, допустимое отклонение давления в статике  $\pm 500$  Па.

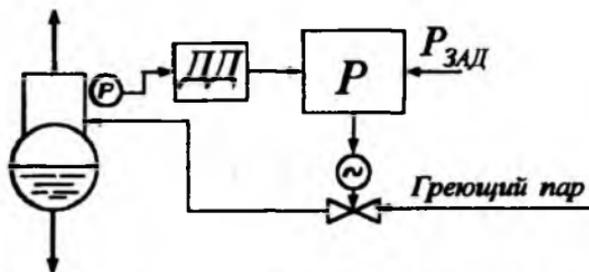


Рис. 6.1. Принципиальная схема АСР давления в деаэраторе

Рассмотрим моделирование АСР давления в деаэраторе. Регулирующим воздействием, как уже указывалось, является расход пара  $D_{II}$ . Возмущающими воздействиями на давление пара в деаэраторе являются: расход конденсата  $G_K$ , его температура  $\theta_K$  и давление греющего пара  $P_{II}$ . Поскольку регулирующий паровой клапан (ПК) устанавливается на паропроводе на некотором расстоянии от головки деаэратора, то участок паропровода от ПК до деаэратора является динамическим звеном с передаточной функцией  $W_{III}(S)$ . Изменение давления в паропроводе перед ПК приводит к изменению расхода пара. Сказанное выше отражено на структурной схеме модели АСР давления (рис.6.2), где введены обозначения:

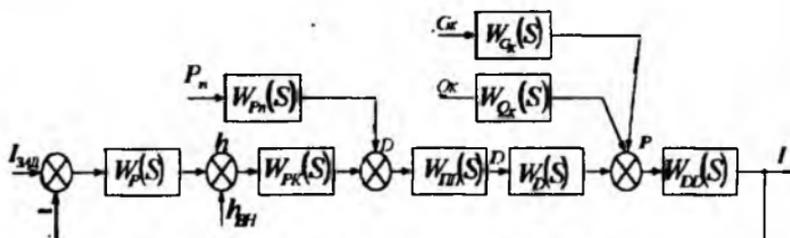


Рис. 6.2. Структурная схема модели АСР давления

$W_p(S)$  - передаточная функция регулятора;

$W_{PK}(S)$  - передаточная функция ПК по каналу "Степень открытия клапана  $h$  - расход пара  $D$ ";

$W_{PII} - D(S)$  - передаточная функция ПК по каналу "Давление пара  $P_{II}$  - расход пара  $D$ ";

$W_{III}(S)$  - передаточная функция паропровода;

$W_D(S)$  - передаточная функция деаэратора по каналу "Расход пара  $D$  - давление  $P$ ";

$W_{GK}(S), W_{QK}(S)$  - передаточная функция деаэратора по возмущающим каналам "Расход конденсата  $G_K$ " и "температура конденсата";

$W_{DD}(S)$  - передаточная функция датчика давления;

$h_{ВН}$  - внешнее возмущение по регулируемому каналу.

Передаточная функция РК:  $W_{PK}(S) = K_{PK}$ , где передаточный коэффициент  $K_{PK}$  определяется по расходной характеристике клапана. Выведем передаточную функцию клапана по каналу давления пара  $P_{II}$ . Расход пара через РК определяется выражением

$$D = \alpha_{KЛ} S_{KЛ} \sqrt{2\rho_{II} (P_{II} - P_D)}, \quad (6.3)$$

где  $\alpha_{KЛ}, S_{KЛ}$  - коэффициент расхода и площадь проходного сечения клапана;

$\rho_{II}$  - плотность пара.

Зависимость расхода пара от давления нелинейная. После линеаризации (6.3) получаем

$$\Delta D = K_P \Delta P_{II}, \quad (6.4)$$

где

$$K_P = \frac{\alpha_{KЛ} S_{KЛ} \sqrt{\rho_{II}}}{\sqrt{2(P_{II} - P_D)}}.$$

Динамика участка паропровода по расходу сжимаемой среды была рассмотрена в первом разделе. Поэтому имеем

$$W(S) = \frac{1}{TS + 1}, \quad (6.5)$$

$$T = \frac{T_{II} \alpha_L \bar{D}}{P_e}; \quad (6.6)$$

где

$$\alpha_L = 2K_L \bar{D}; \quad (6.7)$$

$$K_L = \left( \frac{\lambda L}{D_{ВН}} + \sum \xi_i \right) \frac{1}{2\rho_{II} S_{III}^2}.$$

Динамика собственно деаэратора по всем каналам рассмотрена ранее и описывается передаточной функцией вида  $W(S) = \frac{K}{TS + 1}$ .

## 6.2. Автоматическое регулирование уровня воды

Рассмотрим свойства деаэратора по уровню воды. Собственно объект - деаэратор является астатическим объектом с передаточной функцией  $W(S) = K/S$ . Однако в мощных энергоблоках АЭС и ТЭС добавочную воду в контур энергоблока подают не в деаэратор, а в конденсатор (рис.6.3). Конденсатор также является астатическим объектом, в котором уровень стабилизируется с помощью П-регулятора за счет изменения слива конденсата из конденсатора. Этот конденсат проходит через систему регенеративных подогревателей и после этого поступает в деаэратор. Таким образом, в объект регулирования уровня в деаэраторе входят три последовательно соединенных элемента (рис.6.4): замкнутая АСР уровня в конденсаторе, конденсатопровод с ПНД и собственно объект - деаэратор.

АСР уровня с П-регулятором по каналу "расход химочищенной воды в конденсатор - расход конденсата из конденсатора" описывается уравнением инерционного звена первого порядка, конденсатопровод с ПНД по каналу "расход на входе - расход на выходе" практически безынерционный с единичным коэффициентом передачи и, наконец, деаэратор описывается уравнением интегрального звена. Таким образом, передаточная функция объекта управления описывается передаточной функцией вида

$$W(S) = \frac{K_1}{TS+1} \cdot \frac{K_2}{S}, \quad (6.8)$$

где коэффициент  $K_2$  характеризует астатические свойства деаэратора.

Кривая разгона по (6.8) представляет собой прямую наклонную линию с емкостным запаздыванием, т.е. деаэратор по уровню является неустойчивым объектом. По этой причине, а также в связи с отсутствием жестких требований к поддержанию уровня в баке деаэратора в АСР уровня применяется П-закон регулирования, который реализуется охватом ПИ-регулятора жесткой обратной связью (ЖОС) по положению регулирующего органа. Для энергоблока с ВВЭР-1000 номинальный уровень  $L_{НОМ} = 2000$  мм, абсолютная неравномерность регулирования - до 250 мм, допустимые отклонения уровня в статике  $\pm 20$  мм, в динамике  $\pm 70$  мм.

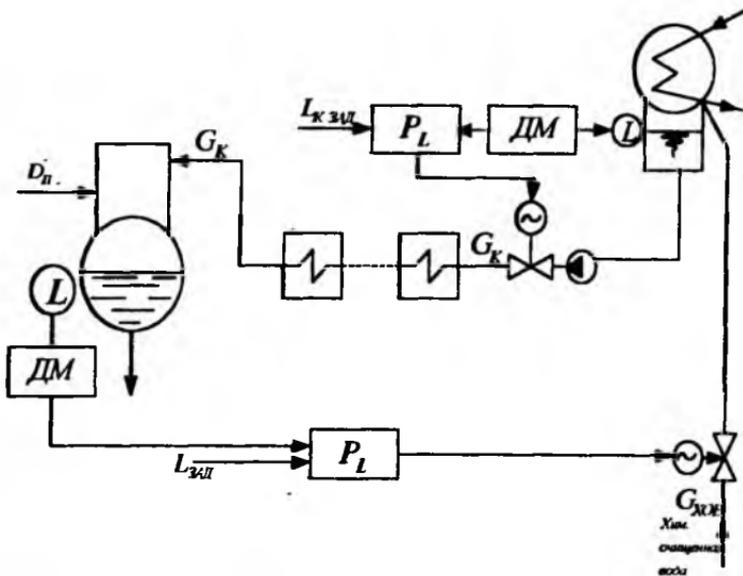


Рис.6.3. Принципиальная схема АСР уровня в деаэраторе

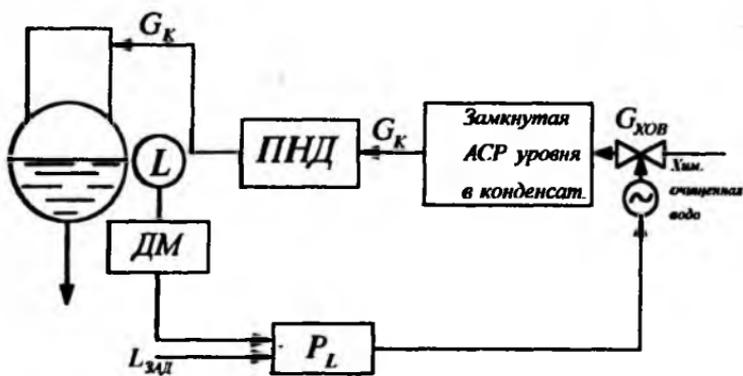


Рис.6.4. Структурная схема АСР уровня в деаэраторе

## **7. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕДУКЦИОННО – ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

### **7.1. Регулирование редукционно-охладительных установок**

Редукционно-охладительные установки (РОУ) предназначены для снижения давления и температуры пара (обычно острого, отводимого из основного паропровода). Снижение давления осуществляется с помощью дроссельного регулирующего клапана, а температуры - впрыском охлаждающей воды. Давление и температура редуцированного пара определяются назначением и требованиями потребителя пара.

На ТЭС РОУ применяются для резервирования теплофикационных отборов, собственных нужд, подогрева мазута.

На АЭС РОУ применяются для подачи пара на уплотнения турбины, к эжекторам и парозжекторным машинам.

Точность поддержания давления и температуры редуцированного пара диктуется потребителем. Обычно точность поддержания давления пара составляет  $\pm 2\%$ , температуры -  $1,5\%$ .

Схема подключения РОУ изображена на рис.7.1. Свежий пар поступает к дроссельному клапану 2 через входную задвижку 1, дросселируется сначала в дроссельном клапане, а затем в шумоглушителе 3. Последние применяются при околосвуковом или сверхзвуковом перепаде давления.

Охлаждающая вода поступает через водяную задвижку 4 и регулирующий клапан 6 на форсунку 8. Часто перед дроссельным клапаном 6 устанавливается дроссельное устройство в виде дроссельной шайбы 5 или группы шайб. Это делается в тех случаях, когда охлаждающая вода подается к РОУ от источника с высоким давлением (например, от питательного насоса), значительно превышающим давление, необходимое для впрыска воды.

Дроссельное устройство рассчитывается на пропуск такого количества воды, которое необходимо для охлаждения максимально возможного расхода пара. Для предотвращения опасного повышения давления дросселированного пара на выходном паропроводе устанавливается предохранительное устройство 10. На охладителе пара 9 соосно с его корпусом обычно устанавливается защитная труба, предназначенная для уменьшения вредного воздействия воды на стенку охладителя пара.

Как объект регулирования РОУ имеет две регулируемые величины: давление и температура пара за РОУ.

Основным возмущающим воздействием на давление пара является изменение его потребления или давления свежего пара. Возмущающими

воздействиями на температуру пара являются изменение потребления пара, расход и давление свежего пара.

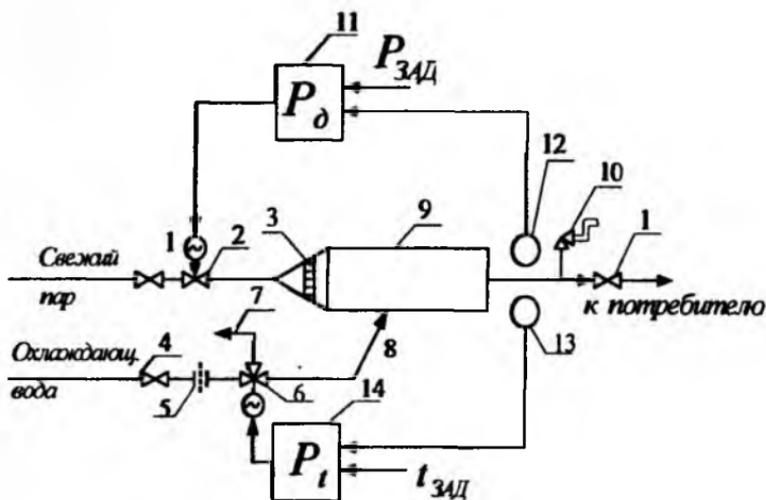


Рис. 7.1. Принципиальная схема включения и регулирования РОУ

Регулирующим воздействием на давление пара является изменение расхода свежего пара, а на температуру - изменение расхода охлаждающей воды. Как объект регулирования давления РОУ обладает самовыравниванием, и ее динамику можно описать уравнением инерционного звена первого порядка. Как объект регулирования температуры РОУ можно считать безынерционным объектом, однако, так как температура измеряется инерционным датчиком, то инерционность РОУ определяется инерционностью датчика.

Регулирование давления осуществляется регулятором 11, получающим импульс от манометра 12 и воздействующим на клапан 2.

Температура редуцированного пара регулируется регулятором 14, получающим импульс от термопреобразователя 13 и воздействующим на клапан 6. Для повышения точности измерения температуры термопреобразователь должен устанавливаться на расстоянии 8-10 м после впрыска, чтобы влага успела полностью испариться. Иногда для сохранения постоянного перепада давления на клапане 6 в широком диапазоне изменения расходов впрыска в качестве клапана 6 применяется трехходовой клапан постоянного расхода. Такой клапан обеспечивает изменение подачи воды в парохладитель путем сброса ее в сливную линию 7 при неизменном расходе воды через дроссель 5.

Описанное регулирование давления после РОУ называется регулированием "после себя".

## 7.2. Регулирование быстродействующих редуцирующе-охлаждающих установок

Быстродействующие редуцирующие установки (БРУ) предназначены для быстрого сброса пара в различных аварийных ситуациях, поэтому к ним предъявляют высокие требования по быстродействию. Если РОУ включаются за 30 с, то БРУ - за 2-6 с. На АЭС с ВВЭР используются:

БРУ-К - для сброса пара в конденсатор;

БРУ-РГД - для сброса пара в блочный коллектор собственных нужд;

БРУ-А - для сброса пара в атмосферу.

Обычно БРУ каждой следующей группы включаются после того, как возможности приема пара предыдущей группой исчерпаны.

БРУ-К предназначена для поддержания давления пара в главном паровом коллекторе при резком сбросе нагрузки турбины путем сброса пара в конденсатор. При этом предотвращается срабатывание БРУ-А, аварийной защиты реактора и предохранительных клапанов ПГ. БРУ-К используется, кроме того, при пусках и остановах блока, а также для обеспечения разогрева-расхлаживания блока с заданной скоростью. В зависимости от применения предусмотрено несколько режимов системы регулирования: "Р1", "Р2" и "П"

Режим "Р1" предназначен для использования регулятора в начале топливной кампании реактора. В нормальном режиме работы энергоблока клапаны БРУ-К закрыты, регуляторы давления находятся в "стерегущем" режиме (для ВВЭР-1000 имеются 4 клапана и 4 регулятора). Давление пара перед турбиной регулируется (в зависимости от режима) регулятором мощности реактора либо регулятором турбины.

При аварийном отключении турбины давление в ГПК начинает резко возрастать, при достижении определенного значения (уставки срабатывания) клапаны БРУ-К принудительно (по блокировке) открываются, а регуляторы давления подключаются к исполнительным механизмам и поддерживают давление в ГПК в соответствии со статической характеристикой.

Схема регулирования давления с помощью БРУ-К изображена на рис.7.2. Статические характеристики регулятора давления БРУ-К для энергоблока с ВВЭР-1000 изображены на рис.7.3.

В режиме "Р1" регуляторы поддерживают давление в соответствии с характеристикой 1. При понижении давления в ГПК до 6,4 МПа регуляторы закрывают клапаны и с выдержкой времени 15 с переходят в стерегущий режим.

При сбросе свежего пара в конденсатор в него необходимо подать охлаждающую воду. Регулирование подачи охлаждающей воды осуществляется либо специальным регулятором температуры, либо по блокировке. На рис.7.2 изображена схема регулирования соотношения "расход

пара - расход охлаждающей воды". Для этого на регулятор температуры подаются сигнал положения парового клапана и обратная связь по положению клапана охлаждающей воды.

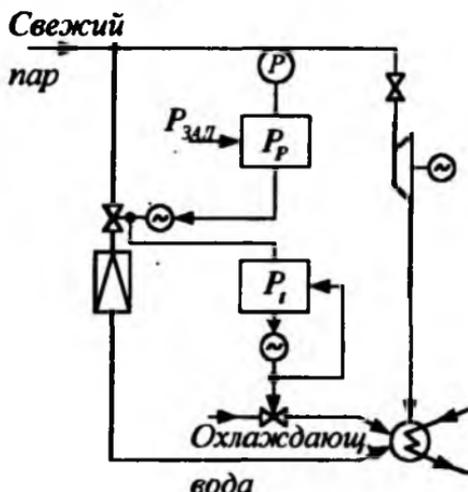


Рис. 7.2. Принципиальная схема регулирования давления с помощью БРУ-К

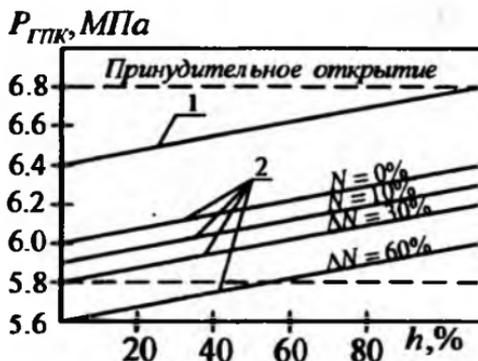


Рис. 7.3. Статические характеристики регулятора давления БРУ-К: 1-режим "P1"; 2-режим "P2"

В некоторых схемах управления имеется регулятор впрыска воды, который работает по следующему алгоритму. При нормальной работе блока регулятор находится в стерегущем режиме. При открытии клапана БРУ-К регулятор

впрыска поддерживает заданное значение давления (1,2 МПа) в пароприемном устройстве конденсатора за счет подачи в него конденсата после КЭН второй ступени. Если температура пара в пароприемном устройстве превышает 70 °С, то на регулятор впрыска поступает дополнительный сигнал от корректирующего регулятора температуры.

Из описания работы систем регулирования давления следует, что регуляторы БРУ-К осуществляют регулирование "до себя".

Стерегущий режим работы "P2" предназначен для использования в середине и конце топливной кампании реактора, когда запас реактивности исчерпан или очень мал и реактор разгружать нельзя, так как при сбросе мощности происходит отравление реактора. В этом режиме к регуляторам БРУ-К подключается устройство, формирующее сигнал по величине сброса нагрузки. Регуляторы находятся в стерегущем режиме и включаются в работу, если величина сброса нагрузки превысила 10 %  $N_{НОМ}$ , и открывают клапаны БРУ-К пропорционально величине сигнала сброса (см. рис.7.3, кривые 2).

В рассматриваемом режиме за счет сброса определенного расхода пара в конденсатор предотвращается разгрузка реактора. Если сброс нагрузки превышает 60 %  $N_{НОМ}$  (сброс до собственных нужд или холостого хода), происходит разгрузка реактора регулятором мощности реактора (АРМ) до уровня мощности 60 %  $N_{НОМ}$ . При этом давление в ГПК поддерживается на номинальном уровне за счет баланса мощности реактора и пропускной способности четырех открытых БРУ-К (пропускная способность каждого клапана 900 т/ч).

Режим "П" используется при пусках и остановах блока и предназначен для поддержания необходимого значения давления в ГПК, а также для обеспечения разогрева-расхолаживания блока с заданной скоростью. Расхолаживание блока через БРУ-К ведется в том случае, если останов блока произошел без срыва вакуума (в противном случае - через технологический конденсатор или с помощью БРУ-А).

В режиме "П" все блокировки на принудительное открытие или закрытие клапанов БРУ-К выведены.

Заданная скорость расхолаживания (15 или 60 °С/ч) задается с помощью программного устройства.

Регуляторы БРУ-А предназначены для предотвращения повышения давления пара в ПГ за допустимые пределы путем сброса пара в атмосферу в следующих случаях: при отказах или запретах на включение БРУ-К, при закрытии отсечной арматуры на паропроводах, в режимах, когда производительность БРУ-К недостаточна, а также при расхолаживании энергоблока в аварийных режимах.

Производительность и быстроедействие клапанов БРУ-А выбираются из условия предотвращения срабатывания аварийной защиты реактора.

Закон регулирования - пропорциональный (за счет охвата ПИ-регулятора жесткой обратной связью по положению регулирующего органа). В нормальном режиме регулятор БРУ-А находится в стерегушем режиме, а его выходные цепи отключены от исполнительного механизма.

При повышении давления в ПГ выше 7,3 МПа (для ВВЭР-1000) регулятор по блокировке переводится в автоматический режим и поддерживает давление пара в соответствии со статической характеристикой: 7,0 МПа - при полном открытии клапана; 6,8 МПа - при полном закрытии. Через некоторое время после закрытия клапана (например, 100 с) регулятор автоматически переводится в стерегущий режим.

Для повышения надежности включения регулятора измерение давления выполняется обычно по схеме 2 из 3-х.

Регулятор БРУ-А в режиме расколаживания уменьшает давление пара в ПГ по определенной программе с заданной скоростью (например, 15 и 30 °С/ч).

## **8. ФУНКЦИОНАЛЬНО – ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ**

Сложность управления технологическими процессами энергоблока в нормальных, аварийных, пускоостановочных режимах, наличие большого количества регулирующей и запорной арматуры, стремление повысить надежность функций управления и защиты путем децентрализации функций привели к созданию функционально-группового управления (ФГУ). Все оборудование энергоблока разделяется на ряд функциональных групп, включающих в себя один или несколько агрегатов со строго определенной технологической функцией.

Примеры функциональных групп

По реакторной установке и ПГ:

- главные циркуляционные насосы;
- питательная установка ПГ;
- система продувки-подпитки.

По турбоустановке:

- система автоматического пуска турбины;
- маслохозяйство;
- конденсатные насосы, ПНД и ПВД.

По генератору:

- система охлаждения генератора;

- система возбуждения генератора.

В ФГ выполняются информационные, управляющие и вспомогательные (самоконтроль) функции. К управляющим функциям относятся: включение и отключение механизмов собственных нужд, открытие и закрытие запорных органов, автоматическое регулирование величин, включение и отключение автоматических регуляторов, изменение заданных значений регулируемых параметров, переключения в контурах АСР, изменение параметров настройки, переключения в схемах автоматических блокировок.

Алгоритмы ФГУ строятся по шаговому принципу. Весь процесс (пуск, останов, переход с режима на режим) разделяется на ряд этапов (шагов). Окончание каждого этапа характеризуется определенными значениями параметров и состоянием агрегатов или временем, прошедшим со времени предыдущей операции. В отличие от дистанционного группового управления в ФГУ управление происходит не по жесткой программе, когда следующая операция проводится непосредственно после завершения предыдущей, а по гибкой, когда операция проводится по достижении некоторой величины (например, давления, развиваемого насосом) заданного значения или по истечении определенного времени после проведения предыдущей операции.

Структурная схема ФГУ показана на рис.8.1. Управляющие устройства сгруппированы в два (или три) уровня. К нижнему уровню I относятся силовые устройства первичной коммутации 3, схемы управления ими (блоки коммутации) 4, а также автоматические регуляторы 5. Аналоговая и дискретная информация от первичных преобразователей I и блок-контактов схем управления объектами поступает к оператору 2 и в управляющие устройства ФГУ.

Устройства I уровня управляют регулирующими 6 и запорными 7 органами, механизмами собственных нужд 8 (их обычно несколько) и другими объектами группы. На I уровне осуществляются функции автоматического регулирования и дистанционного управления.

Формирование команд на включение и отключение оборудования осуществляется логическими устройствами ЛУ уровня II. Эти устройства воздействуют на управляемые объекты через блоки коммутации 4. На II уровне располагаются также устройства технологических защит ТЗ.

При нормальном функционировании ФГ роль оператора сводится только к подаче команды на пуск или останов функциональной группы. В случае отказа ФГ оператор может вмешиваться в его работу. При этом возможны два режима управления. В первом, так называемом шаговом режиме, все операции в пределах данного шага выполняются ЛУ, которое сообщает о выполнении данного шага оператору; переход к следующему шагу требует команды оператора, подаваемой в ЛУ.

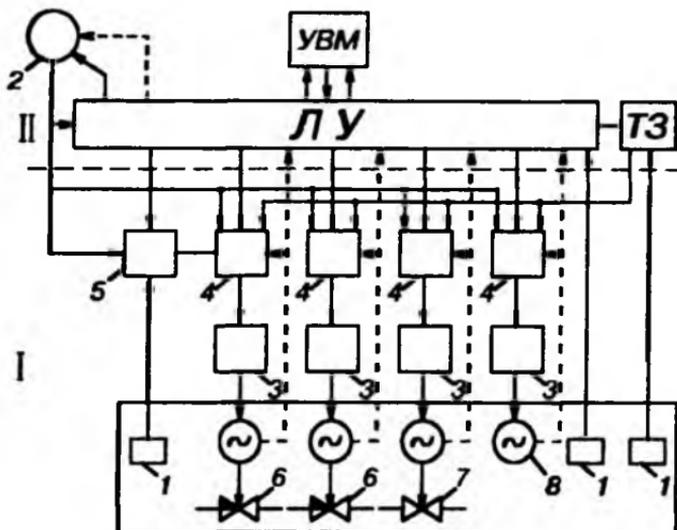


Рис. 8.1. Структурная схема ФГУ

Во втором режиме команды на управление подает сам оператор.

В настоящее время управление в ФГ выполняется на базе ЭВМ СМ-2М, устройств логического управления УЛУ-2ЭВМ или УЛУ2-МПК и шкафов УКТС. В перспективе управление в ФГ будет осуществляться микроЭВМ.

## 9. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГБЛОКА

### 9.1. Общие вопросы регулирования энергоблока

В энергоблоке, работающем на электрическую сеть, происходит преобразование тепловой энергии, вырабатываемой в ядерном реакторе, в механическую энергию вала турбины и затем в электрическую энергию в генераторе. Основная задача регулирования паросиловой установки - поддержание равенства между количеством производимой и потребляемой энергии. Несоответствие между вырабатываемой энергией в реакторе и потребляемой в турбине проявляется (для двухконтурной АЭС) в изменении давления и температуры теплоносителя в I-м контуре и давления (температуры) насыщенного пара во 2-м контуре. Указанное несоответствие должно устраняться регулятором мощности реактора (РМР), который оказывает управляющее воздействие либо на реактор, либо на турбину в зависимости от режима работы энергоблока (рис.9.1).

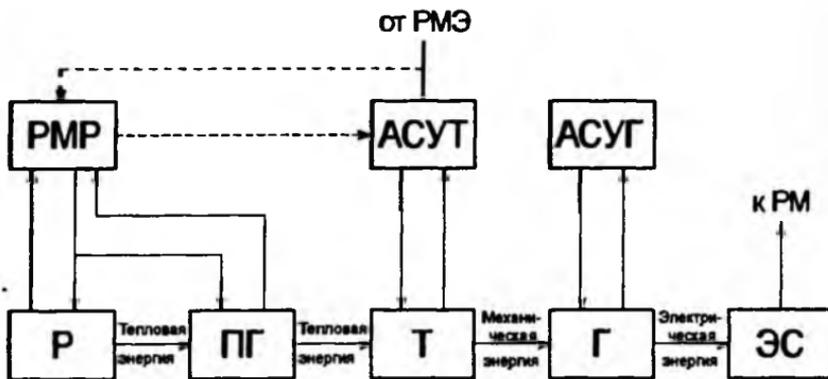


Рис. 9.1. Схема преобразования энергии и регулирования энергоблока

Мощность энергоблока является заданной величиной, при этом она может быть постоянной при работе энергоблока в базовом режиме или переменной при работе в регулирующем режиме.

Энергоблоки работают на энергосистему с большим количеством потребителей электроэнергии. Динамические процессы в генераторе практически безынерционны, поэтому электрическая мощность, отдаваемая в энергосистему (за исключением потерь энергии в генераторе), равна механической энергии на роторе турбины. Основная задача регулирования энергосистемы состоит в том, чтобы производить выработку электроэнергии в точном соответствии с непрерывно меняющимся потреблением. По существу единственным источником информации о величине несоответствия выработки электроэнергии ее потреблению является отклонение частоты в энергосистеме от ее номинального значения.

Отклонение частоты от номинального значения (50 Гц) допускается в узких пределах  $\pm 0,5$  Гц. Даже в аварийных режимах энергосистемы возможна лишь кратковременная работа с частотами: от 51 до 50,5 Гц – 60 с в году, но не более 10 с однократно; от 49 до 48 Гц – 12 мин в году, но не более 2-х мин однократно; от 48 до 47 Гц – 6 мин в году, но не более 1 мин однократно; от 47 до 46 Гц – 60 с в году, но не более 10 с однократно.

Задачу регулирования частоты и мощности в энергосистеме решают регуляторы частоты и мощности турбины (АСУТ) и регулятор мощности энергосистемы (ПМЭ).

Структура системы управления мощностью энергоблока в значительной мере определяется графиком электрической нагрузки энергосистемы и энергоблока. Однако этот график дает усредненное значение нагрузки, в то время как действительное энергопотребление может в определенных пределах изменяться, что требует (как уже указывалось) постоянного регулирования частоты. Для этого необходимы небольшие (до 5%), но достаточно быстрые

(до 10 % в мин) изменения мощности в соответствии с реальным потреблением электроэнергии.

Особенностью работы турбогенератора энергоблока на большую электрическую сеть является то, что скорость вращения турбогенератора определяется частотой сети, иначе говоря, все турбогенераторы энергосистемы вращаются с одной и той же частотой. Турбогенераторы оснащаются регуляторами частоты вращения с пропорциональным законом управления, для которого характерна неравномерность регулирования при изменении нагрузки. Таким образом, при неизменной частоте сети мощность турбины вполне определенная, и для ее изменения необходимо изменять задание регулятору частоты вращения. С этой целью турбины оснащены так называемым механизмом управления турбиной (МУТ).

Из сказанного выше следует, что система автоматического управления мощностью энергоблока (САУМ) должна обязательно включать перечисленные выше регуляторы давления пара, частоты и мощности реактора и турбины. Конкретный вид САУМ определяется типом реактора, турбогенератора, тепловой схемы энергоблока и режимом работы в энергосистеме.

На АЭС наибольшее распространение получили двухконтурные энергоблоки. Для таких энергоблоков важным является характер изменения параметров рабочих сред по контурам (давление, температура, расход) при изменении мощности в статических режимах работы (так называемая программа регулирования). Выбор статической программы регулирования зависит от многих физических, конструктивных, технико-экономических особенностей энергоблока и режима использования его в энергосистеме.

Эта задача существенно усложняется при сложной технологической схеме энергоблока. Выбранная программа регулирования реализуется с помощью системы управления энергоблоком. При этом статическая программа регулирования поддерживается только в стационарных режимах работы энергоблока и лишь приближенно реализуется в многочисленных переходных процессах. Наибольшее распространение получили двухконтурные энергоблоки с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР). Для таких реакторов тепловая мощность, которая снимается однофазным теплоносителем - водой с активной зоны реактора,

$$N = GCp(t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = GCp\Delta t,$$

где  $G$  - расход теплоносителя;

$Cp$  - средняя удельная теплоемкость теплоносителя;

$t_{\text{вх}}$ ,  $t_{\text{вых}}$  - температура теплоносителя на входе и выходе реактора соответственно.

Для реакторов ВВЭР расход теплоносителя 1-го контура постоянен и не зависит от мощности. Можно также считать, что  $Cp = \text{const}$ . В этом случае мощность реактора линейно зависит от разности температур теплоносителя, т.е.

$$N = k\Delta t.$$

При свободно выбранном законе изменения  $t_{вх}$  однозначно определяется закон изменения  $t_{вых}$  (и наоборот).

При выборе статических программ регулирования учитывают технико-экономические показатели, а также длительность работы энергоблока на сниженных уровнях мощности. Наибольшее распространение получили программы с постоянным давлением пара перед турбиной и постоянной средней температурой теплоносителя в 1-м контуре.

Нормальное функционирование энергоблока требует также поддержания в определенных пределах целого ряда других теплотехнических и физических параметров, что осуществляется соответствующими дополнительными регуляторами (на энергоблоке мощностью 1000 МВт имеется около 120 локальных регуляторов).

При разработке САУМ энергоблока учитывают также необходимость разгрузки энергоблока до определенного уровня при некоторых авариях в технологической схеме установки независимо от требований в энергосистеме (например, при отключении главного циркуляционного насоса или парогенератора одной из петель 1-го контура энергоблока).

## 9.2. Статические программы регулирования параметров двухконтурного энергоблока с реактором ВВЭР

Как уже указывалось, расход теплоносителя 1-го контура в энергоблоках с реакторами ВВЭР постоянен, поэтому мощность реактора  $N = k(t_{max} - t_{min})$ . Кроме того, в барабанном ПГ во 2-м контуре получают насыщенный пар, для которого температура и давление связаны однозначно.

Различают следующие программы регулирования:

- с постоянной средней температурой  $t_{cp}$  теплоносителя 1-го контура;
- с постоянным давлением пара во 2-м контуре ( $P_g = const$ );
- компромиссные программы.

Рассмотрим достоинства и недостатки этих программ.

Исторически первой была программа  $t_{cp} = const$ , реализованная на первом энергоблоке НВАЭС (рис.9.2). При этом условии  $t_{вых}$  увеличивается при увеличении мощности энергоблока, а  $t_{вх}$  уменьшается, средняя температура  $t_{cp}$  сохраняется неизменной. Так как разность между температурой теплоносителя на выходе парогенератора, т.е. на входе реактора  $t_{вх}$ , и температурой насыщения 2-го контура  $t_g$  должна возрастать при увеличении количества передаваемой теплоты, температура и давление пара 2-го контура уменьшаются с ростом мощности блока.

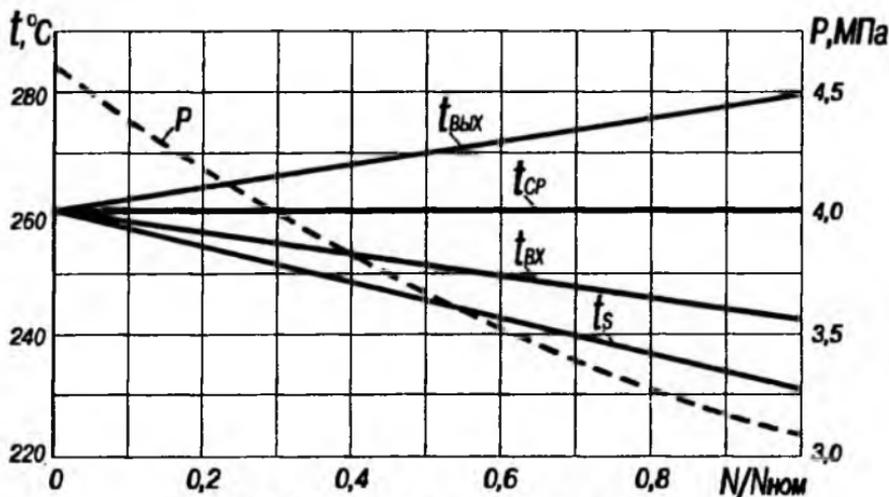


Рис. 9.2. Статическая программа  $t_{cp} = const$

При мощности 100 % давление пара равно номинальному. Такая программа благоприятна для 1-го контура, поскольку обеспечивает стабильные температурные условия для его оборудования.

К недостаткам следует отнести существенное изменение давления пара перед турбиной и необходимость повышения давления 2-го контура при сниженных мощностях, что, в свою очередь, приводит к утяжелению оборудования 2-го контура. При этом термический КПД цикла остается низким на всех мощностях, поскольку на номинальной мощности давление пара перед турбиной низкое, а на пониженных мощностях давление пара хотя и высокое, но оно дросселируется в регулирующих клапанах турбины.

В настоящее время на энергоблоках с ВВЭР применяют программу  $P_s = const$ . На рис.9.3 изображена такая программа для ВВЭР-440.

Очевидно, что эта программа благоприятна для оборудования 2-го контура. Однако поскольку  $N = k(t_{cp} - t_s)$ , а  $t_s = const$ , то с увеличением мощности существенно возрастает  $t_{cp}$ . Для предотвращения закипания теплоносителя 1-го контура необходимо повышать его давление. Существенное изменение  $t_{cp}$  ограничивает маневренные возможности энергоблока и усложняет условия работы АСР давления в компенсаторе объема.

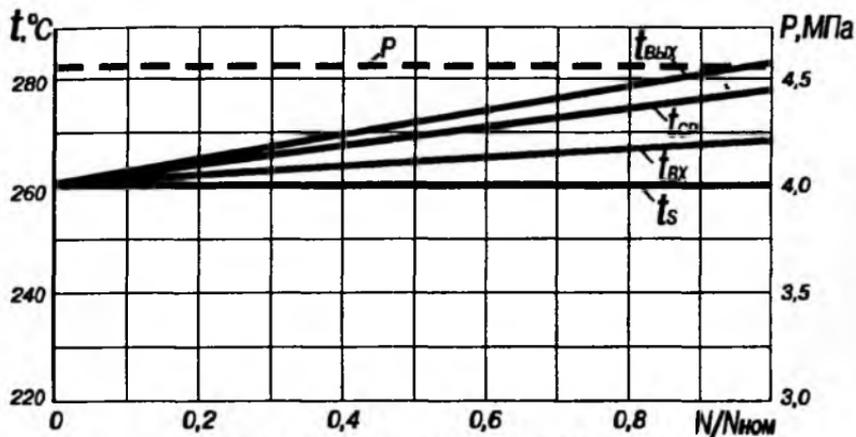


Рис. 9.3. Статическая программа  $P_s = \text{const}$

Стремление преодолеть недостатки рассмотренных программ привело к разработке компромиссных программ. Одна из таких программ изображена на рис.9.4 (она предусмотрена для реализации в энергоблоке с ВВЭР-1000). При такой программе энергоблок на малых мощностях работает по программе  $t_s = \text{const}$ , а при больших - по программе  $t_{\text{ср}} = \text{const}$ .

Величина мощности для перехода с одной программы на другую определяется величиной предельно допускаемого давления в ПГ и частотой ожидаемых снижений нагрузки.

Очевидно, что вблизи номинальной мощности 1-й контур работает по оптимальной для себя программе.

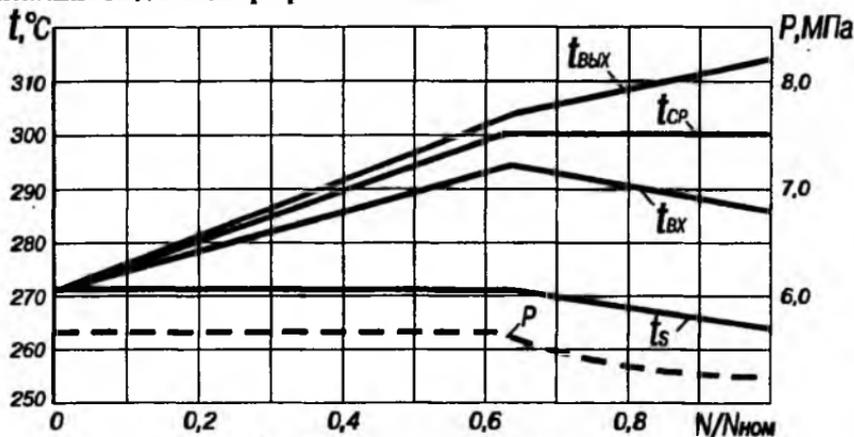


Рис. 9.4. Компромиссная программа

### 9.3. Регулирование частоты вращения и мощности турбогенератора

Все турбины оснащены регуляторами частоты вращения (скорости) РЧВ. Как известно, на АЭС применяются турбины с номинальной частотой вращения 3000 и 1500 об/мин.

РЧВ имеет датчик частоты вращения и гидравлический поршневой сервомотор, который перемещает регулирующие клапаны турбины.

К РЧВ предъявляется ряд требований:

- высокое быстродействие и динамическая точность;
- большие развиваемые усилия;
- малая зона статической нечувствительности (0,05- 0,15% $n_{НОМ}$ ).

Мощность турбины при постоянном давлении пара пропорциональна расходу пара (положению вала сервомотора) и приблизительно - давлению пара.

Все регуляторы турбин имеют пропорциональный (П) закон регулирования. Статические характеристики двух турбин изображены на рис.9.5. Наклон статической характеристики определяется коэффициентом неравномерности

$$\delta = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_H}$$

где  $n_{max}$ ,  $n_{min}$  - максимальное и минимальное значения частоты вращения, соответствующие холостому ходу и полной нагрузке;

$n_H$  - номинальная частота вращения.

Величина ( $n_{max}-n_{min}$ ) называется абсолютной неравномерностью.

Для возможности изменения мощности турбины при неизменной частоте вращения РЧВ оснащаются механизмом управления турбиной (МУТ), выполняющим роль задатчика. Ранее указывалось, что если турбогенератор работает на электрическую сеть, то частота его вращения  $n$  жестко задается частотой сети  $f$  и равна  $n=60f$  (для турбины с  $n_H=3000$  об/мин) или  $n=30f$  (для турбин с  $n_H=1500$  об/мин). Поэтому воздействие на МУТ приводит к перемещению статической характеристики и изменению мощности турбины при постоянной частоте вращения. Пересечение статической характеристики турбины с характеристикой сети (линией постоянной  $n$ ) определяет рабочую точку блока и соответствующую мощность.

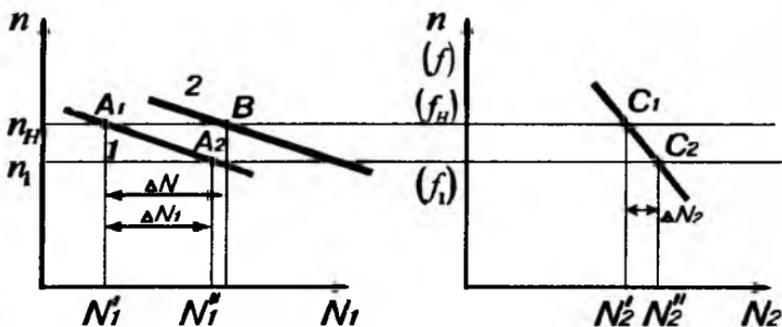


Рис. 9.5. Статические характеристики регулирующей и базовой турбин

На рис.9.5 точка  $A_1$  определяет исходную мощность  $N_1'$  первой (регулирующей) турбины. После воздействия на МУТ статическая характеристика 1 смещается в положение 2 и турбина переходит в рабочую точку  $B$ ; при этом турбина нагружается на величину  $\Delta N$ .

Рассмотрим работу энергосистемы при подключении к ней дополнительных потребителей. Подключение нового потребителя уменьшает общее сопротивление сети, и поскольку мощность, отдаваемая генераторами, в этот момент еще равна исходной, это приводит к понижению напряжения электрического тока  $n$ , как следствие - мощности, получаемой потребителями. Вступающие при этом в работу системы регулирования возбуждения генераторов, изменяя токи возбуждения, восстанавливают напряжение, что сопровождается увеличением токов в сети и возвращением мощностей, получаемых ранее включенными потребителями, к исходным значениям.

Дополнительный потребитель забирает из сети мощность  $\Delta N$ . Так как турбоагрегаты вырабатывают еще исходные значения мощностей, роторы турбин замедляют свое вращение и частота в системе понижается до  $f_1$ .

Дополнительная мощность  $\Delta N = \Delta N_1 + \Delta N_2$  распределяется между турбинами обратно пропорционально их коэффициентам неравномерности, при этом первая турбина переходит в рабочую точку  $A_2$ , а вторая (базовая) - в точку  $C_2$ . Такое статическое регулирование частоты с участием всех турбоагрегатов называется первичным. Из рис.9.5 видно, что первый турбогенератор с более пологой характеристикой нагружается на большую величину  $\Delta N_1$ , чем второй турбогенератор с более крутой характеристикой ( $\Delta N_2$ ). Коэффициент неравномерности у регулирующих турбин составляет  $2,5 \div 4 \%$ , а у базовых -  $4 \div 6 \%$ . Для восстановления номинальной частоты сети  $f_H$  применяется сетевой ПИ-регулятор частоты, воздействующий на МУТ регулирующего (первого) турбоагрегата.

При этом регулирующий турбоагрегат переходит в рабочую точку В, возвращает частоту к номинальному значению  $f_H$  и нагружается на дополнительную мощность  $\Delta N = \Delta N_1 + \Delta N_2$ . По мере восстановления частоты турбоагрегат, не привлекаемый к астатическому (вторичному) регулированию, но участвовавший в первичном регулировании, возвращается к исходному режиму в точке С<sub>1</sub> с прежней мощностью  $N_2'$ .

#### 9.4. Схемы автоматического регулирования мощности энергоблока

Регулирование мощности энергоблока с реакторами ВВЭР осуществляется с помощью автоматического регулятора мощности реактора АРМ5С и регулятора турбины РТ. Регулятор мощности реактора АРМ обеспечивает следующие режимы работы:

- режим астатического поддержания теплотехнического параметра (давления пара перед турбиной) воздействием на реактор (Т);
- режим астатического поддержания нейтронной мощности (Н);
- режим поддержания теплотехнического параметра по компромиссной программе воздействием на реактор (К);
- стерегущий режим поддержания теплотехнического параметра воздействием на реактор (С).

Схема автоматического регулирования энергоблока в режиме "Т" изображена на рис.9.6.

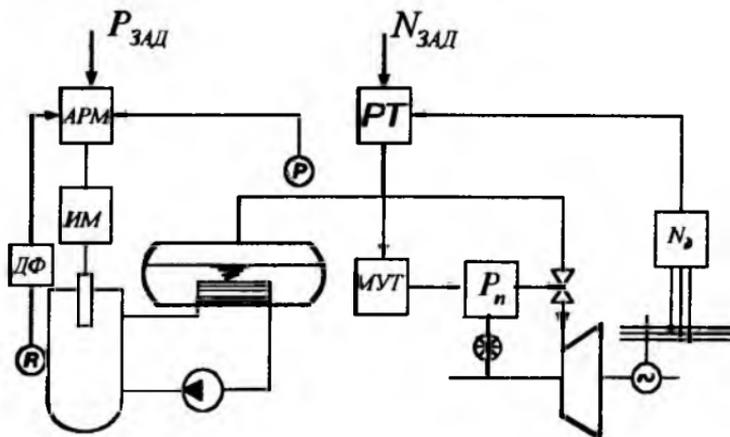


Рис. 9.6. Принципиальная схема регулирования мощности энергоблока в режиме "Т"

Если энергоблок работает в базовом режиме, то мощность  $N_{зад}$  задается оператором регулятору турбины РТ, который при отклонении действительной мощности  $N_D$  от  $N_{зад}$  воздействует на механизм управления турбиной МУТ и с помощью регулятора частоты вращения турбины  $P_n$  и регулирующего клапана изменяет расход пара на турбину. Приведение в соответствие мощности турбогенератора и реактора осуществляется регулятором реактора АРМ, который получает сигнал давления пара перед турбиной, сравнивает его с сигналом заданного значения давления  $P_{зад}$  и, в случае их несоответствия, перемещает с помощью исполнительного механизма ИМ регулирующие стержни реактора до восстановления заданного давления. Для изменения мощности энергоблока необходимо изменить  $N_{зад}$ , при этом мощность блока изменяется со скоростью 10 МВт/мин.

Возможные внутренние возмущения в реакторе по нейтронному потоку воспринимаются ионизационными камерами, сигнал камер поступает на дифференциатор (ДФ), откуда сигнал скорости изменения нейтронного потока поступает на АРМ.

В статическом режиме сигнал на выходе (ДФ) равен нулю и АРМ поддерживает заданное значение давления. Статическая точность поддержания давления составляет  $\pm 0,05$  МПа.

Для обеспечения работы энергоблока в регулирующем режиме необходимо заданную мощность блока изменять от регулятора частоты системы (на схеме не показано).

Рассмотрим работу системы при увеличении заданной мощности блока  $N_{зад}$ . При этом регулятор турбины (РТ) воздействует на МУТ, который через регулятор частоты вращения  $P_n$  открывает регулирующий клапан турбины. Расход пара при этом возрастает, статическая характеристика турбины (см. рис.9.5) смещается вправо и турбогенератор при неизменной частоте сети принимает новую нагрузку. Увеличение расхода пара приводит к падению давления перед турбиной, что воспринимается регулятором АРМ, который через исполнительный механизм (ИМ) поднимает регулирующие стержни; это приводит к увеличению средней температуры теплоносителя 1-го контура, генерации пара в ПГ и восстановлению давления пара перед турбиной. Стабилизация давления свидетельствует о восстановлении энергетического баланса между паропроизводящей установкой и турбогенератором.

Схема автоматического регулирования энергоблока в режиме "Н" изображена на рис.9.7. Регулятор мощности реактора АРМ стабилизирует нейтронную мощность воздействием на управляющие стержни. Давление пара перед турбиной стабилизируется регулятором турбины (РТ) воздействием на МУТ регулятора частоты вращения  $P_n$ . Предусмотрен автоматический переход АРМ из режима "Н" в режим "Т" при превышении давления пара в главном паровом коллекторе заданного уровня для организации разгрузки реактора при

резком сбросе нагрузки турбогенератора. Описанная схема реализует базовый режим работы энергоблока. Заданная мощность энергоблока поддерживается с точностью  $\pm 2\%$ .

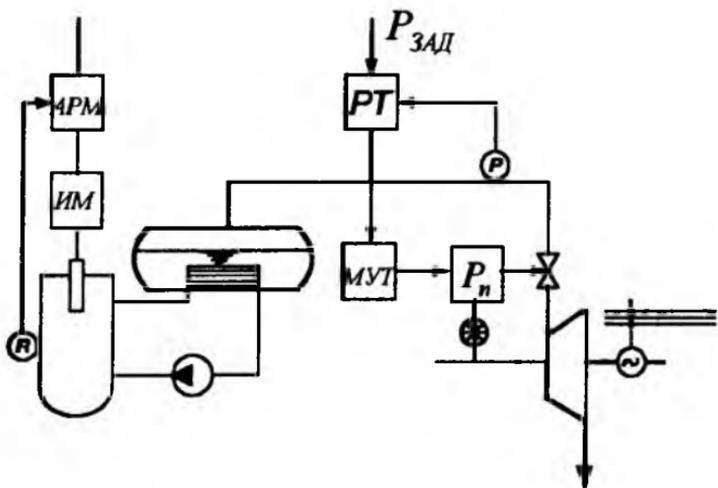


Рис. 9.7. Принципиальная схема регулирования мощности энергоблока в режиме "H"

Рассмотрим работу этой системы при скачкообразном уменьшении частоты сети. Это возмущение воспринимается регулятором частоты вращения турбогенератора  $P_n$ , который практически мгновенно открывает регулирующий клапан турбины. Увеличение расхода пара при прежней паропроизводительности ПП приводит к уменьшению давления пара. Это уменьшение давления воспринимается регулятором турбины РТ, который через МУТ смещает статическую характеристику турбины (см.рис.9.5) вправо, так что при новой пониженной частоте вращения клапан занимает прежнее положение, а давление и мощность возвращаются к первоначальным значениям. В случае, если регулятор частоты сети восстановит требуемую частоту в системе, то процессы регулирования в рассматриваемой АСР пройдут в обратном порядке.

Временные отклонения давления в ГПК могут привести к небольшому изменению средней температуры теплоносителя 1-го контура и через температурный эффект реактивности к изменению нейтронной мощности реактора. В этом случае на некоторое время вступит в работу регулятор нейтронной мощности реактора.

Схема автоматического регулирования энергоблока в режиме "К" изображена на рис.9.8. Она реализует компромиссную программу, изображенную на рис.9.4. Регулятор реактора АРМ измеряет и стабилизирует среднюю температуру теплоносителя 1-го контура воздействием на приводы регулирующих стержней. Изменение давления пара во 2-м контуре воспринимается корректирующим регулятором давления  $P_p$ , который через нелинейный элемент (ограничитель) изменяет задание регулятору средней температуры теплоносителя. С изменением  $t_{cp}$  восстанавливается давление 2-го контура.

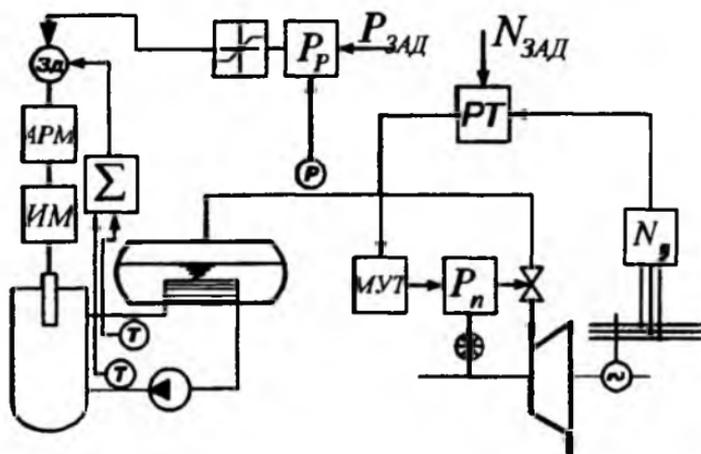


Рис. 9.8. Принципиальная схема регулирования мощности энергоблока в режиме "К"

Таким образом, с увеличением мощности энергоблока (через регулятор мощности турбины) до определенного ее значения давление пара перед турбиной сохраняется постоянным и заданным, а средняя температура теплоносителя 1-го контура возрастает (см.рис.9.4). Дальнейшее повышение мощности энергоблока, приводящее к снижению давления пара, не приводит из-за наличия ограничения к изменению задания и соответственно средней температуры 1-го контура. Так реализуется 2-й участок программы регулирования, на котором  $t_{cp} = const$ , а давление перед турбиной уменьшается. Описанная АСП - каскадная.

## **10. БЕЗОПАСНОСТЬ И АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЗАЩИТЫ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС И АЭС**

Основным режимом работы ТЭС (АЭС) является режим нормальной эксплуатации, при котором управление основными агрегатами энергоблока осуществляется подсистемой автоматического регулирования, обеспечивающей поддержание требуемой нагрузки и заданных значений основных параметров технологического процесса. Оперативный персонал в этом режиме в основном наблюдает за работой оборудования и при необходимости вносит соответствующие коррективы.

В режимах пуска и останова блока управление осуществляется оператором и автоматикой функциональных групп. Однако в процессе эксплуатации могут возникнуть такие случаи, когда нормальная работа энергоблока и его агрегатов нарушается. Причинами таких нарушений могут быть: выход из строя отдельных агрегатов, глубокие изменения нагрузки, неисправности отдельных устройств, ошибочные действия персонала и др. В таких ситуациях необходимо произвести переключения в технологической схеме, включить резервное оборудование, отключить некоторые агрегаты. Своевременное выполнение этих операций сопряжено со значительными трудностями и вероятностью ошибочных действий. Поэтому управление оборудованием в таких ситуациях поручается автоматическим устройствам - технологическим защитам (ТЗ) и блокировкам.

На АЭС технологические защиты предназначены для предотвращения ядерно-опасных ситуаций, развития аварий и повреждения оборудования.

Технологические блокировки предназначены для обеспечения нормального функционирования оборудования при изменении режима работы или возникновении локальных нарушений в работе оборудования путем включения резервных вспомогательных механизмов либо обеспечением заданной последовательности переключений в процессе управления (с целью упрощения управления и предотвращения ошибок).

ТЗ являются последней ступенью автоматического управления оборудованием и вступают в работу, когда другие средства (авторегулирования и блокировок) не справились с поддержанием заданного режима работы энергоблока.

### **10.1. Общие требования к системам ТЗ и блокировки**

Системы ТЗ должны быть в постоянной готовности, но срабатывать только при возникновении ситуаций, нарушающих нормальный режим работы. Поэтому важнейшее требование к ТЗ - *надежность* действия. При этом надежность ТЗ определяется *числом отказов в своевременном срабатывании, количеством ложных срабатываний и живучестью системы* (способностью выполнять свои функции при авариях, пожарах в помещении и др.).

На надежность ТЗ и блокировок, т.е. ее работоспособность, влияют факторы

технические (аппаратурные):

- надежность приборов;
- надежность структуры;
- контроль исправности;
- помехоустойчивость аппаратуры;

эксплуатационные:

- операторы;
- ремонтный персонал;
- профилактические осмотры;
- окружающие условия.

В случае *отказа* системы при возникновении аварийной ситуации система не способна выполнить функцию защиты. При этом требуется срабатывание «следующей» защиты. *Ложное* срабатывание при отсутствии аварийной ситуации приводит к останову оборудования и снижению эффективности его использования.

По характеру возникновения отказы делятся на постоянные и внезапные. Постоянные - старение, износ элементов (механических).

Внезапные - возникают случайно в виде резких изменений свойств элементов.

По легкости обнаружения отказы делятся на явные и неявные. Явные легко обнаруживаются путем сравнения показаний двух одинаковых каналов, при этом появляются ложные сигналы при отсутствии полезной информации.

Неявные сигналы не формируют ложных сигналов, но они не пропускают и полезных, поэтому они опаснее явных.

По взаимному влиянию отказов друг на друга они делятся на независимые и зависимые (из-за отказа смежного элемента).

Под помехой понимают появление ложного сигнала наряду с полезным в канале обработки информации. Причина: электромагнитные или электрические наводки, некачественно выполненное заземление, временное исчезновение питания, флуктуации полезного сигнала. Последствие помех - ложное срабатывание.

Действие ТЗ на оборудование при их срабатывании должно быть *односторонним*. Перевод всех агрегатов и устройств в состояние, которое они имели перед действием защиты, должно производиться персоналом после устранения причин, вызвавших срабатывание. Это позволяет предотвратить повторное включение оборудования в результате того, что после срабатывания защиты может исчезнуть причина, вызвавшая её срабатывание (повторное включение неисправного оборудования может усугубить аварийную ситуацию). Исключение составляет срабатывание аварийных клапанов при повышении давления, которые должны «садиться» при снижении давления ниже уставки срабатывания (открытое состояние клапана приводит к быстрому

и глубокому снижению давления теплоносителя с последующими технологическими последствиями).

При одновременном срабатывании различных защит должны выполняться только те операции, которые предусмотрены защитой, вызывающей наибольшую степень разгрузки. Это исключает возможность подачи противоречивых команд.

Действие защиты должно осуществляться до полного выполнения самой длительной операции. Это исключает ошибочные операции персонала в случае его вмешательства в работу защит.

Должен выполняться приоритет действия защит по отношению к действиям персонала, т.е. при одновременной подаче команд должна выполняться команда защиты.

Действие защиты должно сопровождаться звуковой и световой сигнализацией с указанием действия (останов и др.) и причины срабатывания защиты.

В системах ТЗ предусматривается сигнализация первопричины срабатывания защиты. При этом фиксируется первый сигнал, он отображается на световом табло и блокируется работа устройств сигнализации от вторичных сигналов. Это позволяет оперативному персоналу определять первопричину срабатывания защиты с целью скорейшего нахождения и устранения неисправности.

В системах ТЗ предусматривается возможность отключения защит при пусках и остановах блока, поскольку в этих режимах многие параметры выходят за пределы аварийных уставок. Применяются схемы как ручного, так и аварийного отключения защит. Для ручного управления на БЦУ устанавливается переключатель с тремя фиксированными положениями: «включено», «отключено» и «переведено на сигнал». В последнем положении исполнительные устройства защит отключены, но сигнализация сохраняется.

Устройства ТЗ при нормальной работе энергоблока находятся в бездействии. Поэтому неисправность в их цепях может долгое время оставаться незамеченной и проявить себя отказом при появлении аварийной ситуации. Для снижения вероятности таких скрытых отказов при проектировании систем ТЗ предусматривается возможность проверки (опробования) системы. Проверка осуществляется путем подачи сигнала, имитирующего импульс на срабатывание ТЗ (отклонение параметра или установка оборудования или механизма в необходимое положение). При этом выход цепей блокируется или отключается от исполнительного устройства. В некоторых случаях возможна проверка всей цепи, вплоть до исполнительного устройства, если его срабатывание не вызывает останов блока (например, предохранительные клапаны). В полном объеме проверка ТЗ проводится после ППР.

## 10.2. Применение булевой алгебры для описания схем защит

В системах управления и технологических защит энергоблоков используют устройства и элементы, которые могут принимать только два значения – логические 1 и 0. Такими элементами являются:

- кнопки и ключи с двумя состояниями электрической цепи: замкнуто (1) и разомкнуто (0);
- реле с замкнутыми и разомкнутыми контактами;
- пороговые схемы сравнения с выходными сигналами 1 и 0, которые соответствуют значениям параметра технологического процесса выше и ниже заданного;
- микросхемы с двумя состояниями электрических сигналов – высокое и низкое;
- логические высказывания типа «исправен» и «отказал» или «нормальная работа» и «авария», используемые для анализа надежности и безотказности систем управления;
- задвижки («открыто», «закрыто»), насосы, двигатели («включено», «отключено»).

Устройства защиты в целом также характеризуются бинарным состоянием и реализуют двоичную функцию некоторого числа двоичных аргументов.

Математические операции с двоичными аргументами исследуют с помощью аппарата булевой алгебры, названной в честь ирландского математика Джорджа Буля. Под алгеброй понимают науку, которая оперирует над множеством элементов по определенным правилам. Элементами могут быть числа, буквы, высказывания. Операциями называют действия, с помощью которых из данных элементов алгебры получают новые элементы. Правила определяют свойства операций и их отношения между собой.

Простыми высказываниями называют сообщения, принимающие значения «истинно» или «ложно», например  $0 < 1$  (истинное) или  $0 > 1$  (ложное).

Сообщения, являющиеся результатом двух и более простых сообщений, относятся к сложным. Простые сообщения служат аргументами, а сложные – логическими функциями этих аргументов. Элемент, реализующий определенную логическую зависимость между входными и выходными сигналами, называют логическим.

В булевой алгебре определены три операции:

- 1) логическая сумма – операция **ИЛИ** (дизъюнкция);
- 2) логическое произведение – операция **И** (конъюнкция);
- 3) отрицание – операция **НЕ** (инверсия).

Рассмотрим эти операции.

**Дизъюнкция (функция ИЛИ).** Сложное высказывание истинно, когда истинно хотя бы одно из высказываний. Сигнал на выходе логического элемента появится только тогда, когда есть сигнал хотя бы на одном из его входов. Например, имеем два высказывания: «В систему защиты поступил аварийный сигнал от датчика температуры» и «В систему защиты поступил аварийный сигнал от датчика давления». Дизъюнкцией этих высказываний будет высказывание: «В систему защиты поступил аварийный сигнал от датчика температуры или от датчика давления».

Для случая двух аргументов  $X_1$  и  $X_2$ , если истинное сообщение обозначить через 1, а ложное 0, таблица истинности запишется так (читается:  $X_1$  ИЛИ  $X_2$ ):

$X_1$	$X_2$	$Y = X_1 \vee X_2$
1	1	1
0	1	1
0	0	0
1	0	1

Релейный эквивалент функции ИЛИ показан на рис.10.1.

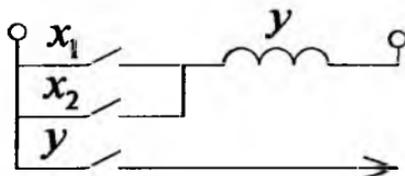


Рис.10.1. Релейный эквивалент функции ИЛИ

**Конъюнкция (функция И).** Сложное высказывание истинно только тогда, когда истинны все отдельные высказывания, его составляющие. Сигнал на выходе логического элемента появится только тогда, когда есть сигнал на всех его выходах.

Таблица истинности (читается: если  $X_1$  и  $X_2$ , то  $Y$ ):

$X_1$	$X_2$	$Y = X_1 X_2$
1	1	1
0	1	0
0	0	0
1	0	0

Релейный эквивалент функции И для двух сигналов на входе показан на рис.10.2.

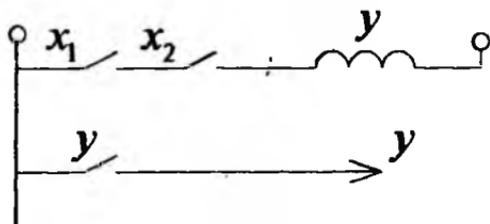


Рис.10.2. Релейный эквивалент функции И

**Инверсия (функция НЕ).** Логическое высказывание противоположно по смыслу истинному, т.е. служит его отрицанием. Таблица истинности:

X	$Y = \bar{X}$
1	0
0	1

Это означает, что при наличии сигнала на входе сигнал на выходе отсутствует или сигнал на выходе появится только при исчезновении сигнала на входе.

Релейный эквивалент операции НЕ изображен на рис.10.3.

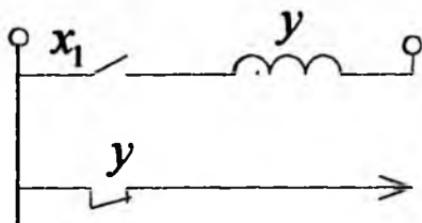


Рис.10.3. Релейный эквивалент функции НЕ

Другие более сложные высказывания могут быть получены с помощью рассмотренных простейших. Например, функция **НИ-НИ** реализуется с помощью последовательного соединения логических элементов **ИЛИ** и **НЕ**. Сигнал на выходе логического элемента отсутствует при наличии сигнала хотя бы на одном из его входов.

Таблица истинности имеет вид

$X_1$	$X_2$	$Y = X_1 \downarrow X_2$
1	1	0
0	1	0
0	0	1
1	0	0

Релейный эквивалент функции **НИ-НИ** изображен на рис.10.4.

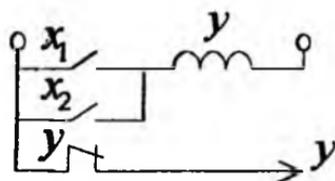


Рис. 10.4. Релейный эквивалент функции НИ-НИ

На рис. 10.5 изображен релейный эквивалент часто используемой сложной функции «2 из 3» (два варианта). Сигнал на выходе этого логического элемента появится тогда, когда будет сигнал хотя бы на двух любых его трех входах.

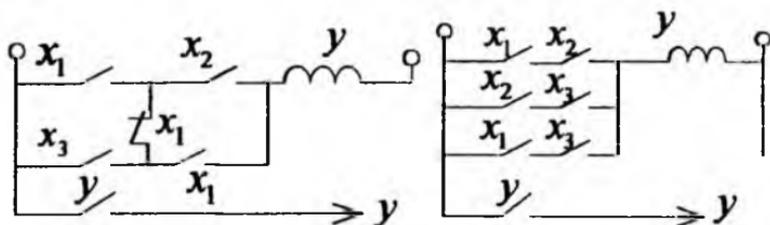


Рис. 10.5. Релейный эквивалент функции «2 из 3»

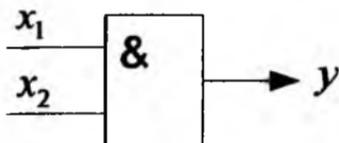
Рассмотрим особенности обозначения и описания релейно-контактных схем. Кнопки, клавиши, концевые выключатели и контакты реле (логические переменные) обозначаются буквами латинского алфавита. Например, катушки реле принято обозначать большими буквами, а их контакты – такими же, но малыми буквами с цифровыми индексами. Причем размыкающие контакты обозначаются переменной со знаком отрицания над нею, а замыкающие – без отрицания. Входные переменные обозначаются начальными, а выходные переменные (состояние цепей контактов) – последними буквами латинского алфавита.

В релейно-контактных схемах обычно логической 1 присваивают состояния «реле под током», «контакт замкнут» или «цепь проводит ток», а логическому 0 – обратные состояния.

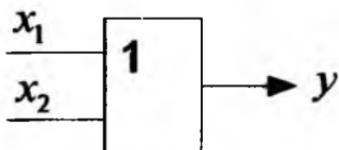
Бесконтактные логические элементы (интегральные микросхемы и транзисторные элементы) в качестве входных и выходных переменных используют потенциалы, которые могут быть различны по значению и знаку. Поэтому в зависимости от того, какой потенциал приписывается логическим 1 и 0, различают положительную и отрицательную логику. Если логической 1 соответствует более положительный потенциал, а 0 – менее положительный, то логику называют положительной.

При проектировании можно выбирать любую логику, однако следует иметь в виду, что при переходе от положительной к отрицательной логике элемент может изменять свою логическую функцию.

Условные обозначения бесконтактных логических схем изображены на рис.10.6.



При положительной логике			При отрицательной логике		
$x_1$	$x_2$	$y$	$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	0	1
1	0	0	0	1	1
1	1	1	0	0	0
$y = x_1 x_2$			$y = x_1 \vee x_2$		



При положительной логике			При отрицательной логике		
$x_1$	$x_2$	$y$	$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	0	1	1	1
0	1	1	1	0	0
1	0	1	0	1	0
1	1	1	0	0	0
$y = x_1 \vee x_2$			$y = x_1 x_2$		

Рис.10.6. Условные обозначения бесконтактных логических схем и таблицы истинности

Как видно из таблиц истинности, схема И при положительной логике выполняет функцию логического умножения, а при отрицательной – логического сложения. Схема НЕ не изменяет свою функцию. При использовании в одной из схем инверсного сигнала в основание входного или выходного сигнала ставится кружок.

В качестве константы 1 при положительной логике принимают напряжение источника питания, а константы 0 – потенциал земли.

Реализация логики «2 из 3» на бесконтактных элементах показана на рис.10.7.

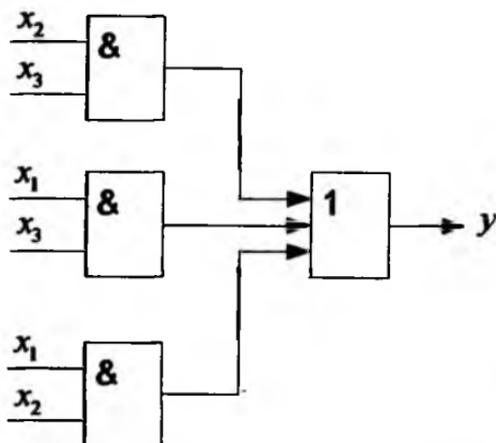


Рис.10.7. Схема «2 из 3» на бесконтактных элементах.

Формула логической связи  $X_2X_3 \vee X_1X_3 \vee X_1X_2$ .

Как видно, здесь используются три схемы И и одна схема ИЛИ.

### 10.3. Показатели надежности элементов системы

Рассмотрим основные понятия теории надежности.

Работоспособностью называется состояние системы, при котором она способна выполнять свои функции с сохранением параметров систем в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособности системы. Критерии отказа устанавливаются в нормативно-технической документации. Для систем критерии отказа обычно вычисляются по критериям отказов устройств, входящих в систему. Примерами отказов приборов являются сгорание обмотки реле, термодары и пр. Пример отказа измерительной системы – повышение ее погрешности сверх допустимой.

Наработкой системы называется продолжительность ее работы, измеряемая единицами времени (обычно числами). Нарботка системы от

начала эксплуатации до возникновения первого отказа называется наработкой до отказа.

Временем восстановления называют время, необходимое для приведения системы в работоспособное состояние.

Под надежностью понимается способность системы выполнять требуемые функции в заданных условиях эксплуатации. Надежность является комплексным свойством и включает в себя безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

Безотказность – свойство системы сохранять работоспособность в течение требуемого интервала времени непрерывно без вынужденных перерывов.

Ремонтпригодность системы определяется приспособленностью к предупреждению, обнаружению и устранению причин возникновения отказов, а также поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем ремонта и обслуживания.

Долговечность – свойство системы сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойство системы сохранять значения показателей безотказности и ремонтпригодности в течение и после срока хранения и транспортировки.

Важнейший показатель надежности – вероятность безотказной работы, которая определяется как отношение  $N(t)$  исправно работающих приборов в момент времени  $t$  к общему количеству приборов  $N_0$ , т.е.  $P(t) = N(t)/N_0$ .

Тогда вероятность отказа прибора  $Q(t) = 1 - P(t)$ .

Для большинства приборов закон  $P(t)$  близок к экспоненциальному (рис.10.8).

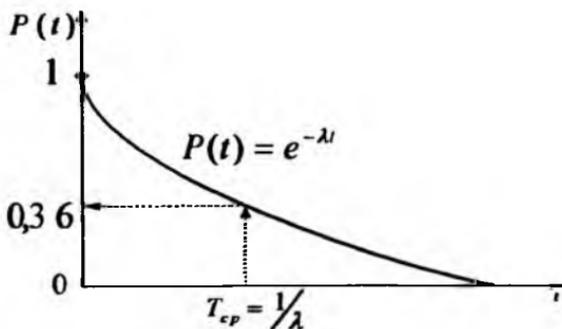


Рис.10.8. Закон распределения вероятности безотказной работы прибора.

Скорость спада экспоненты определяется интенсивностью отказов  $\lambda$ , которая определяется экспериментально как отношение числа отказавших  $n(t)$

за период времени  $\Delta t$  к числу приборов, продолжающих исправно работать (размерность  $1/ч$ ):

$$\lambda(t) = n(t) / N(t) \Delta t.$$

Зависимость  $\lambda(t)$  имеет три основных временных интервала (рис.10.9). Начальный этап (приработка) связан с ускоренной интенсивностью отказов прибора после его изготовления и ремонта. Затем  $\lambda(t)$  в течение времени  $T$  остается неизменной. Время  $T$  называется сроком службы прибора. Значение  $\lambda$  на этом интервале обычно используется для анализа надежности.



Рис.10.9. Зависимость интенсивности отказов приборов от времени.

Последний этап характеризуется старением прибора и увеличением числа отказов.

Таким образом, период нормальной эксплуатации характеризуется экспоненциальным распределением вероятности безотказной работы

$$P(t) = \exp(-\lambda t).$$

Среднее время безотказной работы при таком распределении

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = 1/\lambda$$

равно обратной величине интенсивности отказов.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  при  $t = T_{cp}$ , т.е.  $P(T_{cp}) = 1/e \approx 0,368$ , но при такой вероятности прибор уже неработоспособен, желательно вводить обслуживание прибора и работать при  $P(t) \geq 0,9$ .

В этом случае  $P(t) = 1 - \lambda t$ , что упрощает ориентировочные расчеты.

Приведенные выше выражения для вероятности безотказной работы относятся к необслуживаемым приборам. На самом деле вся аппаратура на АЭС и ТЭС подвергается периодическим осмотрам и проверкам выполнения заданных функций. Неисправленные приборы заменяются исправными. Частота

периодического контроля аппаратуры определяется требуемой вероятностью безотказной работы и режима работы приборов. Физический смысл контроля аппаратуры следующий. В начале эксплуатации, т.е. при  $t=0$  вероятность  $P(t)=1$ . Затем прибор эксплуатируется без контроля исправности и его вероятность безотказной работы уменьшается по экспоненциальному закону в соответствии с интенсивностью отказов  $\lambda$  до момента времени контроля  $t_k$ . В момент проверки исправности приборов убеждаются, что они работоспособны, следовательно, кривая вероятности безотказной работы скачком увеличивает свое значение до  $P(t_k)=1$ . На последующем неконтролируемом интервале времени, до момента времени  $t_k$ , снова действует экспоненциальный закон распределения и т.д.

Задавшись желаемой вероятностью безотказной работы приборов  $P(t_k)$ , можно поддерживать его высокую готовность выполнения заданных функций, но не техническую надежность приборов. Даже при наличии контроля среднее ожидаемое время между отказами прибора останется равным  $T_{cp} = 1/\lambda$ .

#### 10.4. Виды, состав, принципы и способы построения ТЗ

По результатам воздействия на оборудование ТЗ разделяются на *общеплощные* и *локальные*. Общеплощные защиты приводят к останову или снижению мощности энергоблока в целом. Локальные защиты приводят к отключению отдельных агрегатов. Очевидно, что защиты первой группы способствуют повышению безопасности работы АЭС (ТЭС). Защиты второй группы способствуют сохранению только данного агрегата.

В зависимости от используемого источника энергии различают *пассивные* и *активные* устройства ТЗ. Пассивные устройства не требуют постороннего источника энергии. Они бывают, как правило, более простыми и надежными.

Активные требуют посторонний источник энергии, что снижает их надежность. Пример пассивного защитного устройства - предохранительный клапан давления прямого действия или разрывная мембрана, сбрасывающая среду при повышении давления (например, в конденсаторе турбины). Пример активного защитного устройства - предохранительный клапан, срабатывающий по сигналу от электроконтактного манометра.

Системы ТЗ и блокировок активного типа включают в себя измерительный канал, логическую и исполнительную части. *Измерительный канал* обеспечивает измерение контролируемого параметра, его преобразование и сравнение с уставкой.

*Логическая часть* обеспечивает логическую обработку дискретных сигналов и, при необходимости, его временную задержку, а также формирование признаков отклонения от нормального режима.

Исполнительная часть обеспечивает формирование выходных команд, включая коммутацию цепей исполнительных устройств, а также их приоритет перед другими командами управления.

Источниками дискретной информации в системах ТЗ являются: сигнальные контакты приборов и датчиков, блок-контакты пусковых устройств и контакты конечных выключателей. Первичные преобразователи и вторичные приборы могут быть теми же, что и используемые для целей контроля, либо специальные для целей защиты. В последнем случае вторичные приборы обычно располагаются на неоперативных панелях БЩУ.

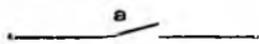
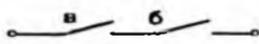
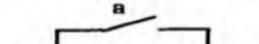
Логическая обработка дискретных сигналов осуществляется логическими устройствами, выполняемыми, как правило, на *релейно-контактных схемах* (в отдельных случаях используются бесконтактные, полупроводниковые логические устройства). Причины такого выбора следующие. Электромеханические реле рассчитываются на определенное число срабатываний. Поскольку ТЗ срабатывают редко (несколько раз в год), то они медленно вырабатывают свой ресурс. Надежность бесконтактных элементов определяется общим временем их работы, поэтому они выходят из строя через определенное число часов вне зависимости от того, часто или редко срабатывала защита.

Расчёты и практика эксплуатации показывают, что надежность систем ТЗ определяется, в основном, надежностью первичных преобразователей. Поэтому для повышения надежности используется несколько первичных преобразователей.

Для обеспечения надежности систем ТЗ при отказах в срабатывании и ложных срабатываниях применяют различные структурные схемы: «1 из 1», «2 из 2», «1 из 2», «2 из 3» (и даже «2 из 4»). Показатели надежности и схемы формирования сигнала защиты приведены в табл.10.1 (при одинаковой исходной вероятности работы одного контактного устройства, равной 0,9).

Таблица 10.1

Характеристики схем защит по надежности

Схема формирования сигнала защиты	Наименование схемы	Вероятность безотказной работы	
		При отказах	При ложном срабатывании
	1 из 1	0,9	0,9
	2 из 2 Схема "И"	0,81	0,99
	1 из 2 Схема "ИЛИ"	0,99	0,81
	2 из 3	0,997	0,97

Рассмотрим структурные схемы защит, в которых используются контакты вторичных измерительных приборов. На рис.10.10 изображена схема «1 из 1», в которой используются один прибор и один датчик.



Рис. 10.10. Схема «1 из 1»

При достижении параметром  $\Pi$  заданной уставки контактное устройство КУ прибора срабатывает и включает соответствующие реле электрической схемы защиты. В такой схеме надежность прибора определяет, в основном, надежность системы. Поэтому такая схема применяется тогда, когда для ТЗ используются специальные высоконадежные приборы, либо когда отказ в работе которых грозит тяжелым повреждением оборудования и может привести к убыткам более значительным, чем при ложном срабатывании защиты (например, осевой сдвиг ротора турбины, аварийное понижение вакуума в конденсаторе и пр.).

Такие схемы применяются также для локальных защит и блокировок, ложное срабатывание которых не ведет к останову блока или снижению нагрузки (включение резервных механизмов при отключении основных, при этом информация поступает от блок-контактов выключателей этих механизмов).

В случаях, когда безопасность работы требует повышенной надежности защиты (отсутствия отказов в работе, а ложные срабатывания мало вероятны, либо не ведут к тяжелым последствиям), используется схема «1 из 2» («ИЛИ») (рис.10.11). При этом уставки срабатывания в обоих приборах одинаковые. По такой схеме строятся ТЗ по повышению давления пара в парогенераторе.



Рис. 10.11. Схема «1 из 2»

В схеме используются два электроконтактных манометра, вероятность ложного срабатывания которых в сторону повышения давления невелика.

В системах ТЗ по уровню, температуре или расходу различных сред используются датчики и вторичные приборы, при эксплуатации которых возможны различные нарушения, приводящие к ложным срабатываниям защиты, при этом убытки от неоправданного отключения оборудования или снижения нагрузки могут превысить возможные потери, связанные с отказом от выполнения защиты. В таких случаях используются схемы «И» («2 из 2»), в которых контактные устройства включаются последовательно (рис.10.12).

Наибольшее распространение получила схема (рис.10.12,а), в которой уставки срабатывания КУ обоих приборов одинаковые. Такая схема используется на ТЭС в защитах по прекращению питания котла водой, по повышению и понижению температуры пара, по повышению и понижению уровня воды в барабане котла и др. Поскольку в такой схеме вероятность отказов в работе защиты повышена по сравнению с другими схемами (см. табл. 10.1), в ней предусмотрена подача на щит управления светозвукового сигнала о срабатывании контактов одного (любого) из двух приборов, если второй прибор при этом отказал. При этом оперативный персонал принимает соответствующие меры.

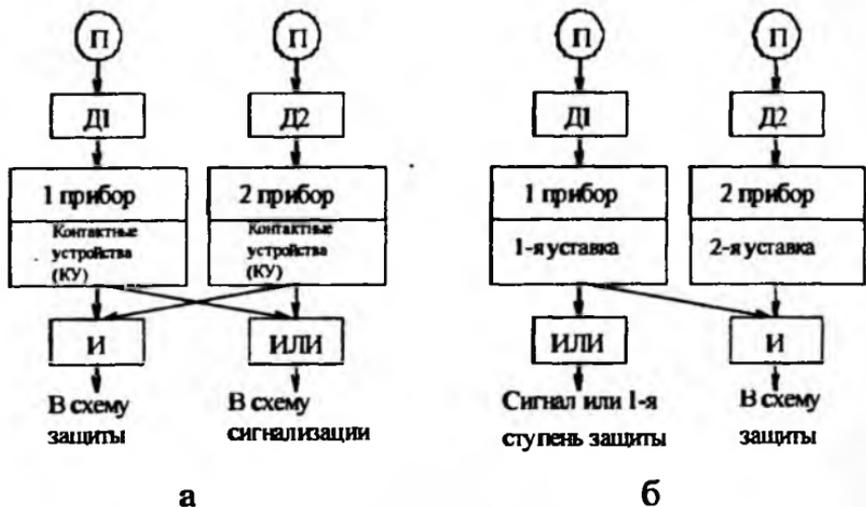


Рис. 10.12. Схема «2 из 2»

На рис. 10.12,б изображена схема защиты, в которой приборы имеют различные уставки. Например, первый прибор настраивается на срабатывание при достижении параметром первой аварийной уставки, при которой осуществляются локальные операции, в контактное устройство второго прибора - на вторую уставку. Контакты обоих приборов, включаются последовательно, и защита срабатывает при срабатывании контактов в обоих приборах. К таким защитам относится защита ПВД, которая описана далее.

Питание схем ТЗ осуществляется от сети собственных нужд I-й категории, в которой перерыв в питании разрешается не более 1с, при этом используются аккумуляторные батареи постоянного тока напряжением 220 В.

Это позволяет выполнить наиболее ответственные операции по отключению оборудования даже при авариях, сопровождающихся полной потерей напряжения переменного тока в системе собственных нужд.

### 10.5. Построение систем защит на базе универсального комплекса технических средств (УКТС)

УКТС предназначен:

- для приема и оперативной обработки команд оператора, технологических защит, блокировок и выдачи команд на исполнительные устройства управления арматурой, механизмами и пр.;
- формирования команд технологических защит, блокировок, управления, сигнализации;

- сбора, обработки и выдачи дискретной информации в другие устройства и др.

В состав УКТС входят функциональные и исполнительные блоки.

В схемах ТЗ выделяются: измерительный канал, логическая и исполнительная части.

Измерительный канал обеспечивает измерение контролируемого параметра, его преобразование и сравнение с уставкой.

Логическая часть обеспечивает логическую обработку дискретных сигналов и, при необходимости, его временную задержку, а также формирование признаков отклонения от нормального режима. Исполнительная часть обеспечивает формирование выходных команд, включая коммутацию цепей исполнительных устройств, а также их приоритет перед другими командами управления.

На рис.10.13 изображена упрощенная схема информационного канала для формирования сигнала по снижению давления в каком-либо аппарате. Для формирования дискретного сигнала в системе защиты используется аналого-дискретный преобразователь (АДП), на вход которого поступает токовый сигнал 0 – 5 либо 0 – 20 мА. На выходе АДП формируется пороговый дискретный сигнал 10 – 15 В, который соответствует «логической единице» («лог.1»). Сигнал на выходе 0 – 5 В соответствует «логическому нулю» («лог.0»). При снижении давления ниже допустимого значения токовый сигнал от датчика давления «Сапфир – 22» уменьшается и на выходе АДП появляется дискретный сигнал «лог.1». Этот сигнал поступает в логическую часть в блок формирования команд (БФК). Если токовый сигнал датчика давления необходимо использовать в других схемах, то после датчика устанавливают блок гальванического разделения токовый БГР – Т (на рис.10.13 показано пунктиром).



Рис.10.13. Схема формирования сигнала защиты по снижению давления

На рис.10.14 изображена схема формирования сигнала защиты по разности температур. Схема содержит два термоэлектрических преобразователя и два нормирующих преобразователя НП. Унифицированные сигналы от НП

поступают на два входа АДП, в котором формируется аварийный сигнал разности путем сравнения его с порогом допустимого значения.

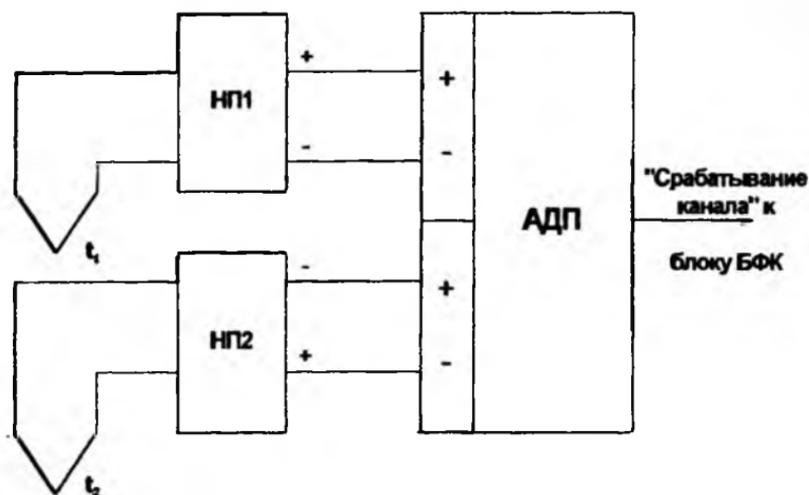


Рис. 10.14. Схема формирования сигнала защиты по разности температур

Применение в схеме нормирующих преобразователей, кроме датчиков, снижает надежность схемы.

Рассмотрим формирование и работу типовой схемы защиты по схеме «2 из 3» на примере схемы защиты турбины (рис. 10.15).

В схеме используется три датчика типа «Сапфир» с унифицированным токовым сигналом 0-5 мА. Сигнал от датчиков через блок БРТ (блок размножения токовый) поступает на аналого-дискретный преобразователь (АДП). Последний предназначен для сравнения входного аналогового сигнала с уставкой и преобразования результата сравнения в выходной дискретный сигнал. Выходной сигнал 10-15 В соответствует «логической единице» («лог.1»), а сигнал 0-5 В – «логическому нулю» («лог.0»).

При достижении параметром уставки срабатывания на выходе каждого АДП появляется сигнал «лог.1». Эти сигналы поступают на соответствующие блоки формирования команд (БФК).

При рассогласовании сигналов на АДП более чем на величину заранее установленной уставки рассогласования предусмотрена сигнализация. Схема рассогласования устроена так, что при срабатывании одного АДП с его «аналогового» выхода поступает сигнал на два других АДП, на входы «от других АДП».

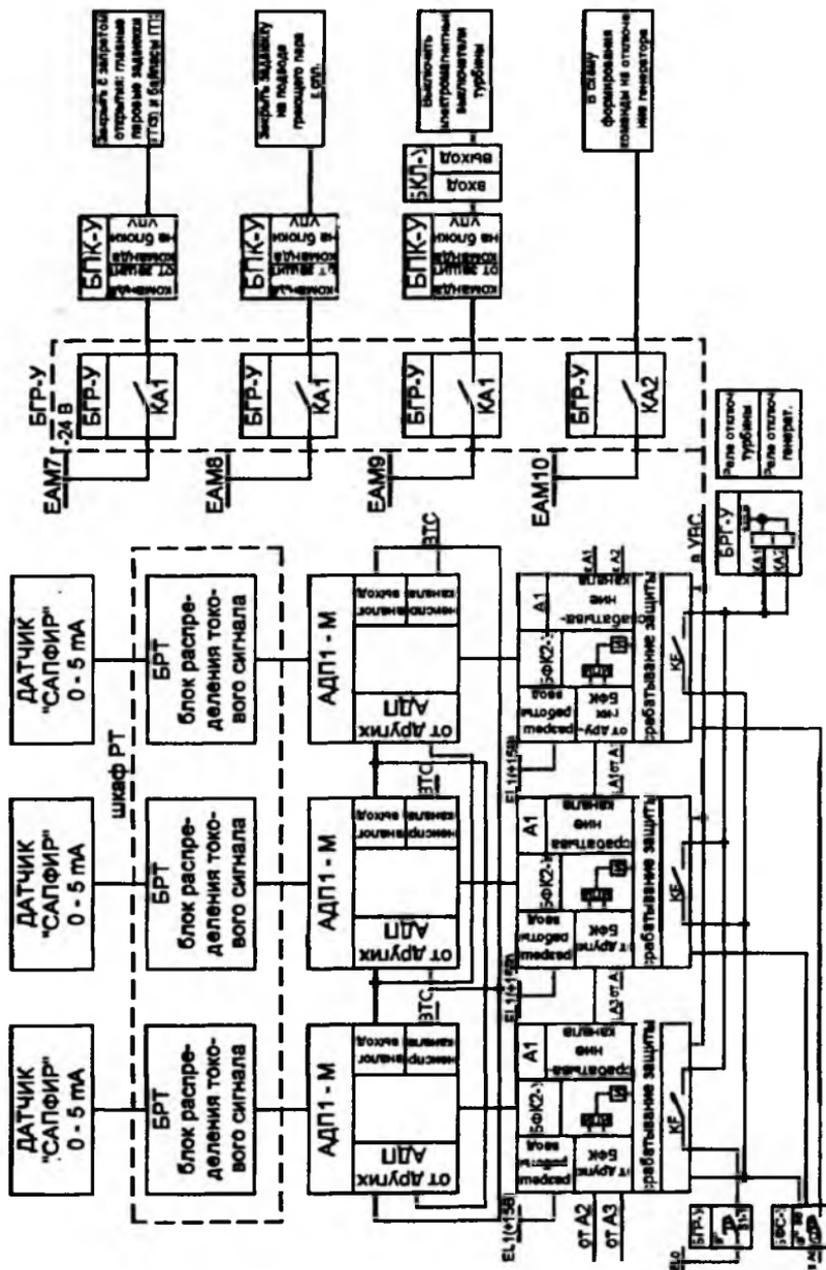


Рис. 10.15. Структурная схема защиты турбины «2 из 3»

При поступлении «лог.1» от АДП на один из блоков БФК2 происходит срабатывание канала этого блока БФК, но защита не срабатывает. Блоки БФК включены в схеме таким образом, что защита срабатывает лишь только при срабатывании любых двух из трех блоков и наличии «разрешения работы (ввода)» на каждом из них. Эта схема реализуется соединением перемычек от выхода «срабатывание канала» каждого БФК на входы «от других БФК» двух остальных БФК, а также наличием «лог.1» на входе «разрешение работы» (ввод может осуществляться также из схемы ввода защиты по параметру).

Допустим, что при поступлении сигнала «лог.1» от блока АДП1 на блок А1 (БФК) происходит срабатывание канала этого блока. С выхода «срабатывание канала» блока А1 сигнал «лог.1» поступит на входы «от других БФК» блоков А2 и А3, но защита не сработает, пока не поступит такой же сигнал на его вход «от других БФК» от блоков А2 и А3 (пока не сработает еще один подканал защиты). При срабатывании канала блока А2 и поступлении сигнала на вход блока А1, а также при наличии сигнала «разрешение работы (ввод)» срабатывает реле КF блоков А1 и А2 (так как аналогично срабатывает и блок А2) и выдается сигнал уровнем 24 В в УВС. Также с выхода «срабатывание защиты» сигнал «лог.1» поступит на блок фиксации срабатывания (БФС), на котором загорится светодиод VD1, свидетельствующий о срабатывании защиты, и подается аварийный сигнал в схему аварийной сигнализации.

Контакты реле КF блоков БФК собираются параллельно. Если введена накладка защиты (нажата кнопка SI-1), о чем свидетельствует свечение светодиода на блоке БГР-МАД, происходит срабатывание выходных реле защиты КА1, КА2 (по цепочке - шинка «лог.0»), введенная накладка SI-1, замкнутый контакт реле КF блока БФК2, реле КА1, КА, шинка +15 В внутри блока БГР). Замыкаются контакты выходных реле отключения турбины (КА1) и реле отключения генератора (КА2) и подается команда уровнем +24 В с шинки ЕАМ на соответствующие блоки приема команд БПК и в схему формирования на отключение генератора.

Блоки БПК (кроме БПК на включение электромагнитных выключателей) устанавливаются в тех панелях, где устанавливаются блоки управления исполнительными механизмами, оттуда же используются и шинки ЕАМ.

После срабатывания БПК поступают команды на соответствующие блоки управления и выполняются действия, показанные на структурной схеме.

БПК на включение электромагнитных выключателей устанавливается в панелях защит и воздействует на ЭВМ через блок БКЛ, который позволяет коммутировать цепи 220 В.

При неисправности канала защиты выдается сигнал в схему сигнализации «Неисправность подканалов защит» на групповое табло.

Блок приема команд (БПК), используемый в схемах защиты, принимает команды защиты от выходных реле блоков гальванического разделения (БГР) или блоков БРВ (блок реле выходных) и передает команды к устройствам

логического управления, например блокам управления клапаном (БУК) или задвижки (БУЗ).

Блоки БФК позволяют реализовать алгоритмы «2 из 2», «2 из 3» и «2 из 4». В рассматриваемом примере реализован алгоритм «2 из 3».

## 10.6. Защита энергоблока и отдельных агрегатов

В зависимости от причин, вызвавших аварийную ситуацию, в энергоблоке могут выполняться следующие виды защиты:

- останов блока;
- останов турбины;
- снижение нагрузки блока;
- перевод блока в режим холостого хода;
- останов котла (реактора);
- перевод котла на растопочную нагрузку;
- выполнение защитных операций по отдельным механизмам и устройствам;
- выполнение локальных защит.

### 10.6.1. Защита по повышению давления пара в ПГ

Защиты по повышению давления пара БРУ-К и БРУ-А были рассмотрены ранее. Поэтому рассмотрим принцип действия импульсного предохранительного устройства (рис.10.16). При давлении пара, не превышающем допустимого, импульсный клапан 1 закрыт под давлением груза 2. Главный клапан 6 также закрыт, поскольку он находится под действием давления пара в паропроводе. При повышении давления выше заданного предела клапан 1 открывается, поскольку усилие от пара превышает усилие от груза 2. При этом давление над поршнем 5 возрастает до давления в паровом коллекторе, поршень смещается вниз и открывает главный клапан 6, что приводит к сбросу пара в атмосферу. При снижении давления в паропроводе груз 2 закроет импульсный клапан 1, давление над поршнем 5 снизится и главный клапан 6 закроется. Открытие и закрытие клапана 1, а следовательно, и клапана 6 может производиться принудительно с помощью электромагнитов открытия 3 и закрытия 4, работающих от электроконтактного манометра (активный режим). В энергоблоке 1000 Мвт с ВВЭР контрольные ИПУ срабатывают при  $P=8.4$  МПа, а рабочие - при  $P=8.6$  МПа (при полном сбросе нагрузки на турбине).  $P_{нег} = 6.2$  МПа

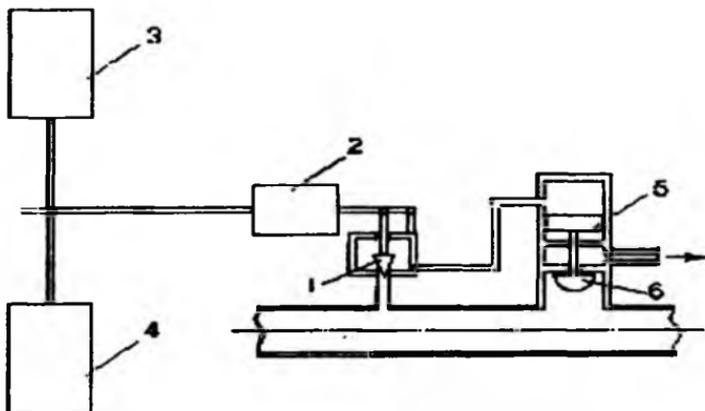


Рис. 10.16. Схема импульсного предохранительного клапана

### 10.6.2. Защита по уровню воды в барабанном ПГ АЭС

Уровень воды в барабанном ПГ поддерживается системой автоматического регулирования питания. Однако при нарушении работы этой системы (датчика, регулятора, регулирующего клапана и др.), а также при неправильных действиях оператора уровень воды может отклониться за допустимые пределы, что может привести к тяжелым последствиям для реактора (при понижении уровня воды) и турбины (при повышении уровня воды). Поэтому каждый ПГ оснащается системой автоматической защиты и блокировок.

Для ПГ энергоблока ВВЭР-1000 предусмотрены следующие защитные действия.

При понижении уровня от номинального значения (2250 мм):

- до 1-го предела (- 100 (170) мм) - включаются вспомогательные питательные насосы (ВПЭНы);
- до 2-го предела (-500 мм) - отключается ГЦН с выдержкой времени 30 с;
- до 3-го предела (-650 мм) и работающем ГЦН - АЗ реактора;
- до 4-го предела (-750 мм) - включаются аварийные питательные насосы (АПЭН), качающие воду в ПГ из баков аварийного запаса воды.

При повышении уровня воды на 350 мм от номинального значения закрываются стопорные клапаны турбины.

Рассмотрим некоторые блокировки по уровню воды в ПГ:

- при повышении уровня воды на 150 мм и открытом стопорном клапане турбины закрываются задвижки на питательном трубопроводе перед основным и пускоостановочным регулирующими клапанами;

- включаются ВПЭНЫ при срабатывании защит на останов обоих ТПН.

### **10.6.3. Аварийный останов котла ТЭС**

Аварийный останов котла производится при погасании факела или прекращении поступления топлива, нарушении режима работы пароводяного тракта, отключении вспомогательных механизмов (дутьевых вентиляторов ДВ, дымососов ДС, вентиляторов первичного воздуха ВПВ), без которых работа котла невозможна, а также при аварийном останове блока. Котел также останавливают, если по каким-либо причинам невозможен перевод его на растопочную нагрузку.

Ниже приведены причины, по которым производится аварийный останов барабанного котла ТЭС.

Защита по уровню воды в барабане. Для барабанного ПГ и повышение, и понижение уровня воды могут привести к тяжелым авариям.

При понижении уровня на 100 – 120 мм по сигналам от двух датчиков уровня (схема «И») отключаются дутьевые вентиляторы и система топливоподачи. При повышении уровня воды до первого предела (100 мм) срабатывает локальная защита и открывается аварийный слив воды из барабана.

При повышении уровня воды до второго предела (120 – 150 мм) и наличии подтверждающего сигнала от датчика-уровнемера первого предела (схема «И») отключаются как и при понижении уровня дутьевые вентиляторы и система топливоподачи. При этом по блокировке закрывается главная паровая задвижка (ГПЗ) во избежание доступа пара в котел из общей магистрали, открывается продувка пароперегревателя и закрывается задвижка на подаче охлаждающей воды в парохладитель.

Защита от потускнения и погасания факела. При погасании факела подача топлива должна быть прекращена, так как его скопление в топке может привести к образованию взрывоопасной смеси.

В качестве датчиков используются фоторезисторы, визируемые на ядро факела и включаемые последовательно с обмоткой фотореле, которое срабатывает при заданном уровне излучения факела. Датчики устанавливаются с двух сторон топки и включаются по схеме «И». Для котлов, работающих на пылевидном топливе, предусмотрена защита от потускнения факела, воздействующая на подачу резервного топлива (включение газовых горелок или мазутных форсунок). Предусмотрена задержка времени на 5 – 10 с для предотвращения ложных срабатываний ТЗ в случае кратковременного потускнения факела.

Защита от понижения и повышения температуры перегрева первичного пара. Используются два датчика-термопары, включенные по схеме «И». Защитное действие направлено на безопасность турбины. В блочных установках (моноблоках) описанной защитой оснащена турбина.

К останову котла приводит отключение дымососов, дутьевых вентиляторов и вентиляторов первичного воздуха.

Прямоточные котлы имеют те же виды защит, что и барабанные (за исключением защит по уровню воды), а также дополнительные защиты, связанные с наличием принудительной циркуляции. Логическая схема действия тепловых защит приведена на рис.10.17 [8].

Прямоточный котел должен быть остановлен при уменьшении расхода питательной воды до 30 % расчетной производительности. Сигналом, подтверждающим необходимость действия защиты, может быть понижение давления за регулирующим питательным клапаном до 15 % по сравнению с давлением при полном расходе. Одновременное появление этих сигналов вызывает включение резервных питательных насосов, а в случае их отказов через  $\Delta t = 15 \div 20$  с защита производит останов котла воздействием на дутьевые вентиляторы.

При появлении свища в экономайзерных трубах может нарушиться работа испарительного контура и повыситься температура пара в тракте. Поэтому появление небаланса в 25 – 30 % между расходами воды до и после водяного экономайзера на каждом из его потоков служит сигналом для срабатывания защиты, воздействующей на останов котла с выдержкой времени 20 с. В качестве подтверждающего сигнала этой защиты используют резкое повышение температуры пара по тракту (например за ВРЧ).

Котлы со сверхкритическим давлением пара оснащаются защитами от повышения (понижения) давления пара перед встроенной задвижкой по схеме «И» («2 из 2»). При этом отключаются вентиляторы и топливоподающие устройства.

Котел на газовом или жидком топливе должен быть остановлен при отключении дутьевых вентиляторов или дымососов (по каналам электроблокировки). При повышении давления пара в выходном коллекторе срабатывает импульсный предохранительный клапан (ИПК) и пар сбрасывается в атмосферу (на схеме не показано).

Прямоточный котел, как и барабанный, снабжают системами защит от повышения и понижения температуры первичного пара (на схеме не показаны), действующими на останов дутьевых вентиляторов и прекращение подачи топлива.

При повышении температуры вторичного пара до первой уставки  $t_1$  открывается запорная задвижка на линии аварийного впрыска и включается в работу регулятор аварийного впрыска. Превышение температуры вторичного пара второй уставки  $t_2$  так же, как и понижение ее до первой  $t_1$ , приводит к останову котла. В котлах, имеющих регенеративные воздухоподогреватели (РВП), предусмотрена защита на останов котла при отключении всех РВП.



#### 10.6.4. Защиты питательно - деаэрационных установок

Основные защитные действия для деаэрационных установок питательной воды рассмотрим на примере деаэратора для энергоблока с ВВЭР – 1000. Предусматривается защита как по давлению, так и по уровню воды в баке.

При снижении давления в деаэраторе ниже 0,65 МПа питание деаэратора паром переключается с 3-го отбора турбины на коллектор собственных нужд (включается). На повышение давления предусмотрены сбросные клапаны.

При повышении уровня воды в деаэрационном баке до 1-го предела (2700 мм) закрывается задвижка на подводе химочищенной воды в конденсатор (потери воды в энергоблоке, определяемые по снижению уровня воды в деаэраторе, восполняются добавкой химочищенной воды в конденсатор).

При повышении уровня воды в баке до 2-го предела (2870 мм) открывается рециркуляция конденсатных насосов 1-й и 2-й ступеней. Питание паром уплотнений турбины и ПТН переводится с деаэратора на РОУ – 14/6. При повышении уровня воды в баке до 3-го предела (3060 мм) отключаются конденсатные насосы 2-й ступени и закрывается задвижка за ними.

Для подачи питательной воды в ПГ используются электро- и турбонасосы. Аварийный останов питательных насосов производится как при действии общезаводских защит, так и при срабатывании собственных защит насосов.

В мощных энергоблоках используются, как правило, турбонасосы. Защиты такого турбопривода во многом аналогичны защитам турбогенератора. В качестве примера рассмотрим защиты турбопитательного насоса (ТПН) для энергоблока с ВВЭР – 1000. Стопорные клапаны и клапаны парораспределения закрываются в случаях:

- при осевом сдвиге ротора турбины на  $\pm 1$  мм по схеме «2 из 2»;
- повышении частоты вращения вала до 3740 об/мин по схеме «2 из 3»;
- повышении давления питательной воды после ТПН до 12,5 МПа с выдержкой времени 2 с по схеме «2 из 3»;
- понижении давления питательной воды на входе ТПН (после бустерного насоса) до 1,2 МПа с выдержкой времени 2 с по схеме «2 из 3»;
- повышении расхода воды через ТПН до 4500 м<sup>3</sup>/ч с выдержкой времени 5 с по схеме «2 из 3»;
- понижении давления воды на входе ТПН до 3,6 МПа с выдержкой времени 2 с по схеме «2 из 3»;
- повышении давления пара в конденсаторе ТПН до 0,06 МПа по схеме «2 из 3»;
- понижении давления масла на смазку турбины до 0,045 МПа по схеме «2 из 3»;
- понижении давления масла на смазку редуктора до 0,03 МПа по схеме «2 из 3»;

- повышении уровня конденсата греющего пара в любом из ПВД до 5940 мм по схеме «2 из 3».

Питательный электронасос останавливается при осевом сдвиге ротора насоса, понижении давления масла в системе смазки, понижении давления питательной воды на всасе или на напоре насоса и при нечезновении расхода охлаждающей воды через статор или ротор электродвигателя.

### 10.6.5. Защиты регенеративных подогревателей высокого давления

В случае отказа регулятора уровня конденсата греющего пара или разрыве змеевиков поверхности нагрева возможно переполнение корпуса ПВД водой до уровня врезки паропровода и попадание воды в него, что недопустимо. На этот случай предусматривается обратный клапан на трубопроводе греющего пара и отключение всей группы ПВД с подачей питательной воды в обвод ПВД.

При повышении уровня воды в любом из ПВД до I предела срабатывает первая ступень защиты (рис. 10.18), т.е. отключается вся группа ПВД с подачей питательной воды в обвод всей группы подогревателей. В случае дальнейшего повышения уровня воды до II предела подается повторная команда на отключение группы ПВД. Контроль повышения уровня воды осуществляется двумя независимыми приборами, один из которых настроен на I предел, второй - на II предел. При этом локальная защита (отключение ПВД) осуществляется от любого прибора по схеме «1 из 2», при срабатывании обоих приборов (схема «2 из 2») отключается энергоблок. Отключение группы ПВД осуществляется быстродействующими гидроклапанами, направляющими питательную воду по байпасной линии в обход всех ПВД. При этом закрываются задвижки на входе и выходе питательной воды в группу ПВД и на подводе пара от отборов.

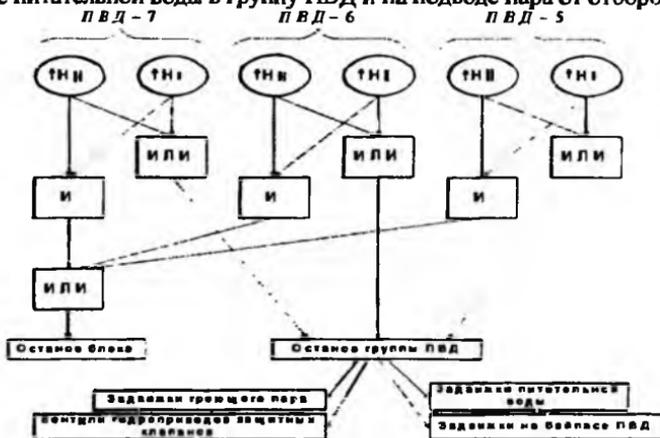


Рис. 10.18. Логическая схема действия защит ПВД.  
Линии связи: - закрытие (защита); ---- открытие

### 10.6.6. Технологические защиты турбогенератора

При работе турбогенератора могут возникнуть различные нарушения, при которых достаточно, например, отключить турбогенератор от сети либо его разгрузить. Ниже рассмотрены основные защиты, приводящие к останову турбины энергоблока 1000 МВт.

Все схемы защит состоят из двух идентичных независимых каналов, что обеспечивает их высокую надежность.

Как было показано в разд. 12 ч. 1, турбогенератор по каналу «момент вращения – частота вращения» является неустойчивым объектом. Превышение частоты вращения выше установленного предела (обычно на 10-15 %) может привести к разрушению ротора. Такое превышение возможно, например, при сбросе электрической нагрузки генератора.

Останов турбины производится от специального автомата безопасности, входящего в комплект поставки турбины, воздействием на стопорные клапаны турбины.

Имеется также так называемая «предварительная защита», воздействующая на закрытие стопорных клапанов в случае недопустимого увеличения углового ускорения ротора. При этом, в отличие от автоматических защит, которые действуют необратимым образом, стопорные клапаны вновь открываются, когда ускорение ротора снизится до допустимого значения.

Осевое смещение ротора допустимо в небольших заданных пределах. Повышенное смещение из-за износа подшипника или увеличения осевых усилий приводит к повреждению турбины. Защита на останов турбины действует при осевом сдвиге ротора в сторону генератора на плюс 1,2 мм и в сторону переднего подшипника (блока регулирования) на минус 2 мм.

Предупредительная сигнализация не предусматривается. Датчиком смещения является реле осевого сдвига. Используется два одинаковых комплекта аппаратуры, поставляемых с турбиной. С целью предотвращения ложных срабатываний при случайных бросках напряжения в цепях питания или механических сотрясениях реле предусмотрена задержка времени 0,1 с на срабатывание и отпускание.

Подшипники турбины смазываются маслом от специальной системы. При падении давления масла турбина должна быть остановлена. Защита реализуется с помощью четырех реле давления типа КРМ, установленных по месту. Имеется два независимых канала защиты. В каждом канале включены последовательно два контакта с уставкой срабатывания первого и второго пределов (схема «2 из 2»). Турбогенератор останавливается при понижении давления масла до второго предела, равного 0,03 МПа. Аналогично, по схеме «2 из 2», выполнена защита по понижению уровня масла в любом из двух демпферных баков. В каждом канале участвуют одно реле уровня с уставкой

первого и одно реле уровня с уставкой второго пределов. Предусмотрена выдержка времени 20 с.

Турбина должна быть остановлена при повышении давления (ухудшении вакуума) в конденсаторе, поскольку увеличивается сопротивление вращению ротора и может разрушиться лопаточный аппарат. Защита настроена на снижение вакуума до второго предела (0,02 МПа). С этой целью в каждой конденсаторной группе установлены четыре вакуум-реле типа РВК-1Т. Срабатывание реле по вакууму происходит при срабатывании любой пары вакуум-реле одного из двух каналов (схема «2 из 2»). Защита вводится автоматически при достижении уставки ввода.

Предусмотрена защита турбогенератора по вибрации подшипников. Она реализуется с помощью аппаратуры контроля вибрации, в состав которой входят 12 двухкомпонентных (вертикальной и поперечной составляющих) датчиков вибрации подшипников и вторичная аппаратура с контактами, настроенными на два предела срабатывания. При срабатывании контактов по первому пределу включается предупредительная сигнализация (схема «ИЛИ»).

Защита по каждому каналу срабатывает, если до второго предела повышается вибрация (7,1 мм/с) на любых двух соседних подшипниках (передний и задний подшипник одного ротора или задний подшипник одного ротора и передний подшипник следующего ротора).

Кроме описанных, предусмотрены также защиты:

- по уменьшению расхода воды через обмотку статора генератора;
- уменьшению расхода воды в контуре газоохладителей генератора;
- уменьшению расхода воды в контуре воздухоохладителей возбuditеля;
- уменьшению расхода воды через теплообменник системы охлаждения обмотки статора генератора;
- от «внутренних» повреждений генератора или трансформатора блока;
- отключению последнего турбопитательного насоса;
- повышению уровня воды в парогенераторе до третьего предела (620 мм);
- понижению давления питания системы регулирования;
- повышению давления на выхлопе ЦВД;
- понижению давления пара в ГПК до 5,2 МПа;
- повышению температуры пара на выхлопе ЦНД и другие защиты.

При срабатывании защит на останов турбины закрываются стопорные и регулирующие клапаны ЦВД, отсечные клапаны ЦНД, стопорный клапан на подводе греющего пара к сепаратору-пароперегревателю (СПП), задвижки на паропроводах «свежего» пара, перед СПП, на отборах пара к ПВД, ПНД и деаэратору и др.

### **10.6.7. Защиты компенсатора давления**

Как было рассмотрено ранее, в компенсаторе давления автоматически регулируются давление и уровень воды. При понижении давления в первом контуре энергоблока включаются дополнительные группы трубчатых электронагревателей (ТЭН), при повышении давления выше номинального производится впрыск воды в КД.

Уровень воды в КД поддерживается за счет изменения подпитки – продувки, причем заданное значение уровня воды изменяется в зависимости от средней температуры воды в первом контуре. Снижение уровня воды может привести к оголению ТЭНов и их пережогу. Чрезмерное повышение давления в первом контуре также недопустимо.

Для КД энергоблока с ВВЭР-1000 предусмотрены следующие основные защитные действия:

- при снижении уровня воды в КД до отметки 420 см отключаются по схеме «2 из 3» все группы ТЭНов;
- повышении давления в КД до 18,5 МПа срабатывает первое контрольное импульсно-предохранительное устройство (схема «2 из 3»). При снижении давления до 17,6 МПа ИПУ закрывается;
- повышении давления до 19,0 МПа срабатывает второе ИПУ (схема «1 из 3»). При уменьшении давления до 18 МПа ИПУ закрывается (схема «3 из 3»);
- повышении давления до 19,4 МПа открываются рабочие ИПУ (схема «1 из 3»). При уменьшении давления до 18,2 МПа ИПУ закрываются (схема «3 из 3»).

При срабатывании ИПУ сброс пара из КД осуществляется в барботер. Предусмотрены также различные блокировки.

### **10.6.8. Аварийный останов энергоблока**

Работа основных агрегатов энергоблока взаимосвязана. При останове одного из них необходимо останавливать другой. При этом энергоблок необходимо отключить, поскольку быстрый повторный пуск его мало вероятен из-за необходимости поиска и устранения неисправностей. Построение конкретных логических схем определяется типом энергоблока (количеством парогенераторов, турбины и др.). Приведем основные нарушения, при которых останавливается энергоблок.

Генератор

- отключение от сети;
- отключение при внутренних повреждениях.

Турбина

- закрытие стопорных клапанов;
- осевой сдвиг;

- понижение давления масла на смазку;
- потеря вакуума в конденсаторе.

ПВД

- повышение уровня до II предела.

Котел

- аварийный останов;
- отключение турбины.

Аварийный останов энергоблока во всех перечисленных случаях производится путем останова основных его агрегатов (котел, турбина, питательные насосы).

Функциональная схема защитных устройств моноблока ТЭС изображена на рис.10.19, где 1- управляющие устройства отключения дутьевого вентилятора; 2 - блокировочное реле.

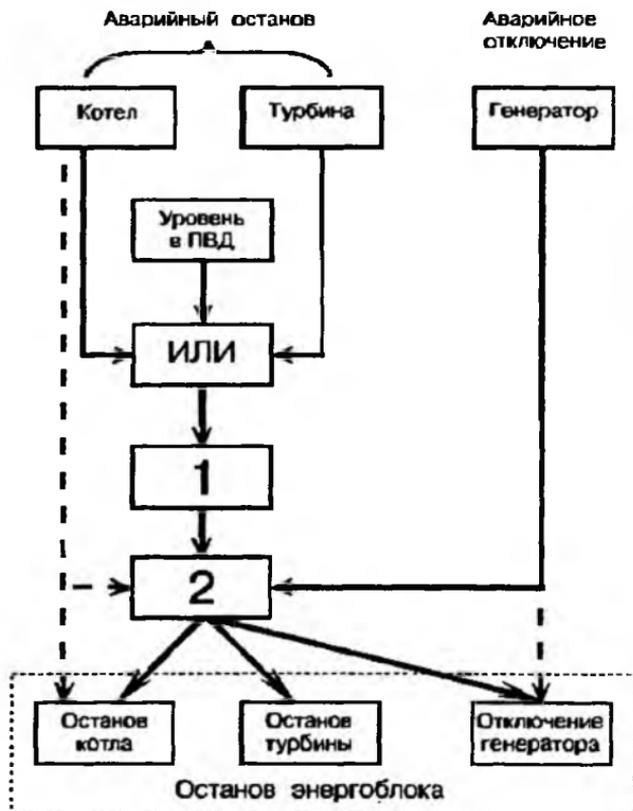


Рис. 10.19. Функциональная схема защиты моноблока ТЭС

## 10.7. Система безопасности АЭС с ВВЭР

### 10.7.1. Особенности построения систем безопасности АЭС

Система безопасности атомных станций предназначена для предупреждения аварий, обеспечения защиты персонала и населения от внешнего и внутреннего облучения, а окружающей среды – от загрязнения радиоактивными веществами выше пределов допустимых норм в нормальных условиях и во всех аварийных ситуациях, включая максимально возможную проектную аварию.

Система безопасности атомной станции включает в себя защитные, локализирующие, обеспечивающие и управляющие системы.

Защитные системы безопасности предназначены для предотвращения или ограничения повреждений ядерного топлива, оболочек тепловыделяющих элементов, первого контура и предотвращения ядерных аварий. Срабатывание защитных систем безопасности не должно приводить к повреждению оборудования систем нормальной эксплуатации.

К защитным системам относятся: системы защиты реактора, системы аварийного охлаждения зоны (пассивная, активная и система аварийного расхолаживания), системы защиты первого и второго контуров от избыточного давления, система аварийного питания ПГ и др.

Локализирующие системы безопасности предназначены для предотвращения или ограничения распространения внутри АЭС и выхода в окружающую среду выделяющихся при аварии радиоактивных веществ. Предотвращение утечки радиоактивных веществ обеспечивается герметичной оболочкой тепловыделяющих элементов, корпусом реактора и первым контуром. Часть веществ, вышедших в процессе аварии за пределы реакторной установки и первого контура, удерживается специальными устройствами (спринклерной системой, гермооболочкой и локализирующей запорной арматурой).

Обеспечивающие системы предназначены для снабжения систем безопасности энергией, рабочей средой и создания условий их функционирования (вентиляция, освещение, пожаротушение).

Управляющие системы предназначены для приведения в действие систем безопасности, осуществления контроля и управления ими в процессе выполнения заданных функций (системы измерения, защиты, блокировки, сигнализации и др.).

При определении необходимого и достаточного количества независимых каналов системы безопасности атомной станции существенную роль играет то обстоятельство, что магистрали защитных систем, по которым к реактору доставляется вода для аварийного охлаждения, относятся к устройствам нормальной эксплуатации, что предопределяет необходимость учета неэффективности одного из каналов даже в случае успешного запуска его механизмов и устройств.

В системах безопасности применяются три полностью независимых канала, каждый из которых по своей производительности и быстродействию достаточен для обеспечения радиационной и ядерной безопасности АЭС (включая режим максимальной проектной аварии).

Независимость трех каналов безопасности является сквозной, т.е. каждый из каналов снабжен индивидуальными механизмами, арматурой, теплообменными аппаратами, емкостями, источниками энергии и водоснабжения, системой контроля, сигнализации и управления.

Каналы безопасности не имеют общих элементов ни в технологии, ни в электрических или управляющих цепях, что исключает возможность выхода из строя по одной причине хотя бы отдельных элементов двух каналов безопасности. Для этой же цели предусмотрено территориальное разделение систем с раздельной трассировкой трубопроводов (включая импульсные линии), контрольных и силовых кабелей.

Во всех режимах, приводящих к аварийному останову блока, осуществляется запуск механизмов от источников надежного энергоснабжения по однопрограммной загрузке сети надежного питания.

Однопрограммная загрузка дизель-генераторов предполагает жесткую последовательность включения аварийных механизмов независимо от характера и масштаба аварии, а также от наличия напряжения в энергосистеме.

Для снижения потребной загрузки мощности дизель-генераторов осуществляется ступенчатое подключение групп аварийных механизмов.

Для исключения неправильных действий оператора в период аварии предусмотрен автоматический запрет на дистанционное управление аварийными механизмами, а также всеми остальными механизмами, подключаемыми к сети надежного питания.

### ***10.7.2. Построение основных систем защиты***

На АЭС с ВВЭР имеется три барьера безопасности: герметичная оболочка тепловыделяющих элементов, предотвращающая выход радиоактивных продуктов в теплоноситель; герметичная система первого контура; герметичное помещение первого контура (гермооболочка).

Для предотвращения разрушения каждого из трех барьеров спроектированы соответствующие защиты.

Для предотвращения разрушения ТВЭЛов, что возможно при остановке ГЦН и нарушении циркуляции теплоносителя, насосы питаются от сети надежного питания от нескольких источников. При полном обесточивании блока или АЭС предусмотрены резервные дизель-генераторы. В случае отключения нескольких ГЦН при их обесточивании возможно резкое повышение давления в первом контуре, что может привести к его разрушению. Для предотвращения такой ситуации служат паровой объем в компенсаторе

объема (пассивное устройство), система регулирования давления в КО и предохранительное устройство для сброса пара из КО в барботер.

При разрушении второго барьера радиоактивный теплоноситель попадает в гермооболочку. Малые течи из контура компенсируются системой подпитки с помощью регулятора уровня в КО. При этом давление в гермосне из-за попадания в нее воды повышается незначительно и разрушения третьего барьера безопасности не происходит. Однако разрежение в гермооболочке нарушается, что может привести к попаданию радиоактивных продуктов в окружающую среду. Для предотвращения этого необходимо отключить создающие разрежение вентиляторы и закрыть отсечную арматуру на системе вентиляции и радиационного контроля. Для ВВЭР-1000 такая защита срабатывает при повышении давления под оболочкой до 0,3 кПа.

При средних и больших течах сохранить давление в первом контуре не удастся. Для сохранения теплоотвода предусмотрена подача в реактор раствора борной кислоты с концентрацией бора 40 г/кг от насосов аварийного впрыска (работают в диапазоне давления 2,2 – 16 МПа) и насосов аварийной подпитки первого контура (работают в диапазоне 1,5 – 9 МПа).

Для охлаждения активной зоны реактора при давлении ниже 5,9 МПа служит пассивная часть системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ). При этом при достижении давления 5,9 МПа срабатывают обратные клапаны и из четырех емкостей под давлением 6 МПа в активную зону подается раствор борной кислоты (концентрация 16 г/кг). Объем раствора в четырех емкостях (200 м<sup>3</sup>) достаточен для охлаждения активной зоны до включения активной части САОЗ.

Активная часть САОЗ служит для аварийного расхолаживания реактора при разрыве первого контура (включая максимальную проектную аварию с обрывом первого контура), а также для гланового расхолаживания реактора. При этом в реактор с помощью специальных насосов подается борный раствор с концентрацией бора не менее 16 г/кг.

Рассмотрим построение систем защиты по разрыву первого контура. Защита срабатывает в случае, когда разность температур теплоносителя в любом из трубопроводов главного циркуляционного контура и температурой насыщения при текущем давлении в первом контуре становится менее 10 °С. Температура теплоносителя в циркуляционных петлях измеряется с помощью термопар и нормирующих преобразователей. Температура насыщения над активной зоной определяется по давлению по известной функциональной зависимости  $t_s = f(P)$  с помощью нелинейных блоков НО5 УКТС. Указанные два сигнала по температуре поступают на блоки АДП, где происходит их сравнение, и выдается дискретный сигнал на блоки БФК, собранные по схеме «2 из 4».

При средних и больших течах первого контура, а также разрыве второго контура в пределах гермооболочки давление в гермооболочке повышается. Для

локализации аварии предусмотрена соответствующая защита. При этом при повышении давления до 0,3 МПа включаются специальные насосы и специальный раствор метабората калия подается в спринклерную систему под куполом гермооболочки. Одновременно включается отсечная арматура гермооболочки, а все агрегаты переводятся на питание от дизель-генераторов. Защита собрана по схеме «2 из 4».

Рассмотрим защиту по разрыву второго контура. Разгерметизация второго контура может возникнуть либо в результате разрыва трубопроводов, либо при непредусмотренном открытии предохранительных клапанов ПГ (БРУ-К и БРУ-А). При этом происходит уменьшение давления и температуры теплоносителя второго контура и, соответственно, температуры теплоносителя первого контура, что может привести к внесению положительной реактивности и разгону реактора.

Действие защиты направлено:

- на отключение аварийного паропровода закрытием быстродействующих клапанов БЗОК и закрытие запорной арматуры на подводе питательной воды к ПГ;
  - предотвращение расхолаживания первого контура отключением ГЦН.
- Сигнал на срабатывание защиты формируется по совпадению сигналов:
- разность температур насыщения первого и второго контуров более 75 °С (схема «2 из 4»);
  - температура теплоносителя во втором контуре более 200 °С (схема «4 из 4»);
  - давление в паропроводе от ПГ менее 5 МПа (схема «2 из 4»).

При уменьшении давления во втором контуре до величины 4,5 МПа происходит отключение соответствующего ГЦН и закрывается арматура на подводе питательной воды к ПГ.

## Список литературы

1. Профос П. Регулирование паросиловых установок. -М.: Энергия, 1967. - 368 с.
2. Серов Е. П., Корольков Б. П. Динамика парогенераторов. -М.: Энергия, 1972. -416 с.
3. Чермак И., Петерка В., Заворка И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии. -М.: Мир, 1972. -623 с.
4. Артюх С. Ф., Дуэль М. А., Шелепов И. Г. Основы автоматизированных систем управления энергогенерирующими установками электростанций. - Харьков, 1998. -332 с.
5. Прангишвили И. В., Амбарцумян А. А. Основы построения АСУ сложными технологическими процессами. - М.: Энергоатомиздат, 1994. -305 с.
6. Плетнев Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций. - М.: Изд-во МЭИ, 1995. - 352 с.
7. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. - М.: Энергоиздат, 1981. - 368 с.
8. Плетнев Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций. - 3-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 345 с.
9. Плютинский В.И., Погорелов В.И. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС.-М.: Энергоатомиздат, 1983. -296 с.
10. Ключев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов.-М.: Энергоатомиздат, 1985. -280 с.
11. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. - Л.: Машиностроение, 1982. - 312 с.
12. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. -М.: Энергоиздат, 1981. -360 с.
13. Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Энергоатомиздат, 1986. -270 с.
14. Автоматизация крупных тепловых электростанций /Под ред. М.П.Шальмана. -М.: Энергия, 1974. -240 с.
15. Ключев А.С., Товарнов А.Г. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. -М.: Энергия, 1970. -212 с.
16. Емельянов И.Я., Гаврилов П.А., Селиверстов Б.Н. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов.-М.: Атомиздат, 1975. -280 с.
17. Павлыш О.Н., Гарбузов И.П., Реуков Ю.Н. Экспериментальные динамические характеристики моноблока 1000 МВт с реактором ВВЭР-1000. -М.: Электрические станции, 1986. -№ 1. -С. 8-10.

18. Остапенко Ю.О. Идентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування.-К.: Задруга,1999 - 422 с.
19. Аникевич К.П. Системы управления и защиты реактора ВВЭР-1000.// Севастопольский ин-т ядерной энергии и промышленности.- Севастополь, 1998.
20. Демченко В.А. Разработка математической модели динамики парогенератора ПТВ-1000 АЭС. // Пр.4-ї укр. конф. з автоматич. керування. Автоматика – 97. Черкаси, 1997. - Т.1 - С.20-23
21. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1989. — 263 с.
22. Демченко В.А.,Стопакевич А.А., Ложечников В.Ф. Оптимальный ПИ-регулятор уровня воды в парогенераторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. // Труды Одесск. политехи. ун-та.—Одесса: ОГПУ, 2000.— Вып. 1 (10).— С.73-76.
23. Демченко В.А., Ложечников В.Ф. Разработка математической модели участка питания парогенератора энергоблока с ВВЭР// Труды Одесск. политехи. ун-та.—Одесса: ОГПУ, 1999.— Вып. 2 (8).— С. 111-115.
24. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем. — М.: Машиностроение, 1986. — 272 с.
25. Яаксоо Ю.И. Пакет прикладных программ для автоматизированного проектирования многомерных САР в АСУТП переменных состояния.—М.: Машиностроение, 1984.— 40 с.

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
<b>Часть 1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТИПОВЫХ УЧАСТКОВ, АППАРАТОВ И МАШИН .....</b>	<b>6</b>
<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
1. Основные уравнения сохранения, состояния и краевые условия, используемые при выводе уравнений динамики .....	11
1.1. Уравнение сохранения массы .....	11
1.2. Уравнение сохранения энергии .....	13
1.3. Уравнение сохранения количества движения .....	15
1.4. Уравнения состояния и краевые условия .....	16
2. Динамические характеристики участка при регулировании несжимаемой жидкости [1] .....	17
2.1. Обобщенная принципиальная схема участка .....	17
2.2. Физические процессы на участке .....	19
2.3. Составление математической модели .....	19
2.4. Линеаризация исходных уравнений .....	21
2.5. Алгебраические преобразования исходных линейных уравнений ..	23
2.6. Динамические характеристики участка при регулировании расхода путем дросселирования или изменением напора насоса ....	24
2.6.1. Регулирование расхода путем дросселирования .....	24
2.6.2. Динамические характеристики участка при регулировании расхода числом оборотов насоса .....	25
3. Динамические характеристики участка при регулировании давления .....	26
3.1. Пример расчета динамических характеристик участка расхода ...	28
4. Модели участка расхода твердых дисперсных материалов .....	32
4.1. Модель дозатора (питателя) .....	32
4.2. Модель процесса транспортировки материала .....	33
5. Динамические характеристики участка при регулировании давления (расхода) сжимаемой среды .....	34
5.1. Вывод уравнений элемента регулируемого участка .....	35
5.2. Примеры вывода уравнений динамики .....	42
5.2.1. Модель участка регулирования подачи газа в котел [1] .....	42
5.2.2. Модель участка регулирования давления в топке котла [1] .....	44
6. Аналитические модели участка при регулировании уровня среды в емкости .....	46
6.1. Модель участка уровня однородной жидкости .....	46
6.2. Модель участка регулирования уровня неоднородной жидкости ...	49
6.2.1. Модель участка регулирования уровня в барабанном ПГ АЭС ...	50
6.2.2. Модель участка регулирования уровня воды в барабанном ПГ ТЭС .....	55

7. Аналитические модели участка при регулировании концентрации вещества .....	67
7.1. Общая модель участка .....	68
7.2. Аналитическая математическая модель участка типа «чистый перенос» .....	70
7.3. Аналитическая математическая модель участка типа «полное перемешивание» .....	71
7.4. Примеры моделей участков концентрации .....	72
8. Математические модели участка смешения жидкостей по температуре смеси .....	77
9. Математические модели теплообменников .....	79
9.1. Пароводяной теплообменник .....	79
9.1.1. Статические характеристики .....	81
9.1.2. Математическая модель теплообменника как объекта с сосредоточенными параметрами .....	82
9.1.3. Математическая модель теплообменника как объекта с распределенными параметрами .....	86
9.2. Водо-водяной теплообменник .....	89
10. Математическая модель деаэратора по давлению .....	93
11. Математическая модель компенсатора давления .....	96
11.1. Математическое описание компенсатора давления по давлению и уровню воды .....	96
11.2. Экспериментальная математическая модель .....	102
12. Математическая модель турбогенератора .....	103
12.1. Вывод уравнения динамики турбогенератора [1] .....	103
12.2. Анализ динамических свойств турбогенератора .....	109
13. Математическая модель ядерного реактора .....	114
13.1. Математическое описание динамики реактора «нулевой» мощности .....	114
13.1.1. Элементарное уравнение кинетики реактора без запаздывающих нейтронов .....	114
13.1.2. Кинетика реактора с учетом запаздывающих нейтронов .....	117
13.1.3. Передаточная функция и частотные характеристики реактора .....	119
13.1.4. Кривые разгона реактора .....	124
13.1.5. Методы упрощений уравнений кинетики реактора .....	128
13.1.5.1. Объединение запаздывающих нейтронов в одну средневзвешенную группу .....	128
13.1.5.2. Пренебрежение временем жизни нейтронов и учет одной средневзвешенной группы запаздывающих нейтронов .....	132
13.1.6. Моделирование уравнений кинетики реактора в инженерных расчетах .....	134
13.2. Математическое описание реактора, работающего в энергетическом диапазоне мощности .....	135
13.2.1. Распределение энерговыделения в реакторе .....	136

13.2.2. Изменение реактивности в нестационарных режимах .....	138
13.2.2.1. Температурный эффект реактивности .....	139
13.2.2.2. Отравление реактора .....	143
14. Математическая модель динамики ядерного энергоблока .....	148
14.1. Экспериментально-аналитический метод .....	148
14.1.1. Расчетная схема реактора и парогенератора .....	148
14.1.2. Вывод уравнений динамики элементов структурной схемы ...	149
14.1.3. Структурная схема энергоблока и уравнения динамики .....	156
14.2. Аналитический вывод уравнений динамики реактора .....	159
<b>Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....</b>	<b>163</b>
1. Понятие АСУ ТП, ее структура и функции .....	163
1.1. Состав АСУ ТП .....	163
1.2. Структурные схемы АСУ ТП .....	164
1.3. Функции АСУ ТП .....	170
1.3.1. Централизованный контроль и сигнализация .....	172
1.3.2. Регистрация аварийных ситуаций .....	173
1.3.3. Расчет технико-экономических показателей (ТЭП) .....	173
1.4. Недостатки существующих АСУ ТП и перспективы их развития .....	175
2. Система управления и защиты реактора .....	181
2.1. Требования к системе СУЗ .....	181
2.2. Состав и структура АСР мощности .....	181
2.3. Принципы измерения ядерного излучения .....	184
2.4. Измерительные каналы детекторов .....	187
2.5. Автоматический регулятор мощности (АРМ) .....	193
2.6. Механизмы управления ядерных реакторов .....	197
2.7. Органы регулирования ядерных реакторов .....	201
2.8. Системы аварийной защиты реакторов .....	204
3. Автоматическое регулирование компенсатора объема .....	207
4. Автоматическое регулирование питания парогенератора .....	212
4.1. Автоматическое регулирование уровня воды в парогенераторе ...	212
4.2. Автоматическое регулирование производительности турбопитательных насосов .....	223
4.3. Применение современных методов цифрового управления участком питания парогенератора .....	226
4.3.1. Дискретный оптимальный с наблюдателем состояния ПИ-регулятор уровня воды в барабанном парогенераторе .....	227
4.3.2. Дискретное многомерное оптимальное управление с наблюдателем состояния участка питания барабанных парогенераторов энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 .....	231
5. Автоматическое регулирование конденсатора и регенеративных подогревателей .....	236
5.1. Автоматическое регулирование конденсатора .....	236
5.2. Автоматическое регулирование регенеративных подогревателей ..	239

6. Автоматическое регулирование деаэратора .....	240
6.1. Автоматическое регулирование давления .....	240
6.2. Автоматическое регулирование уровня воды .....	244
7. Автоматическое регулирование редуционно-охладительных установок .....	246
7.1. Регулирование редуционно-охладительных установок .....	246
7.2. Регулирование быстродействующих редуционно-охладительных установок .....	248
8. Функционально-групповое управление .....	251
9. Автоматическое регулирование энергоблока .....	253
9.1. Общие вопросы регулирования энергоблока .....	253
9.2. Статические программы регулирования параметров двухконтурного энергоблока с реактором ВВЭР .....	256
9.3. Регулирование частоты вращения и мощности турбогенератора .....	259
9.4. Схемы автоматического регулирования мощности энергоблока .....	261
10. Безопасность и автоматические защиты тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС .....	265
10.1. Общие требования к системам ТЗ и блокировки .....	265
10.2. Применение булевой алгебры для описания схем защит .....	268
10.3. Показатели надежности элементов системы .....	273
10.4. Виды, состав, принципы и способы построения ТЗ .....	276
10.5. Построение систем защит на базе универсального комплекса технических средств (УКТС) .....	280
10.6. Защита энергоблока и отдельных агрегатов .....	285
10.6.1. Защита по повышению давления пара в ПГ .....	285
10.6.2. Защита по уровню воды в барабанном ПГ АЭС .....	286
10.6.3. Аварийный останов котла ТЭС .....	287
10.6.4. Защиты питательно - деаэраторных установок .....	290
10.6.5. Защиты регенеративных подогревателей высокого давления .....	291
10.6.6. Технологические защиты турбогенератора .....	292
10.6.7. Защиты компенсатора давления .....	294
10.6.8. Аварийный останов энергоблока .....	294
10.7. Система безопасности АЭС с ВВЭР .....	296
10.7.1. Особенности построения систем безопасности АЭС .....	296
10.7.2. Построение основных систем защиты .....	297
Список литературы .....	300

*Навчальне видання*

**ДЕМЧЕНКО Владислав Олексійович**

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ АЕС ТА ТЕС**

**Навчальний посібник**

*Російською мовою*

**Зав. редакцією Т. М. Забанова**  
**Редактор, коректор Т. І. Лучьова**  
**Комп'ютерна верстка, графіка**  
**О. О. Тістол, О. С. Гусарова**

---

**Здано до виробництва 25.12.2000. Підпи-  
сано до друку 05.02.2001. Формат 60×84/16.  
Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк  
офсетний. Ум.-друк. арк. 17,90. Обл.-вид.  
арк. 16,74. Тираж 400 прим. Зам. № 464.**

**Видавництво і друкарня «Астропринт»  
(Свідоцтво ДК № 132 від 28.07.2000 р.)  
65026, м. Одеса, вул. Преображенська, 24.  
Тел. (0482) 26-98-82, 26-96-82, 68-77-33.  
[www.astroprint.odessa.ua](http://www.astroprint.odessa.ua)**

Д318

**Демченко В. О.**

**Автоматизація та моделювання технологічних процесів АЕС та ТЕС: Навчальний посібник. — Одеса: Астропринт, 2001. — 308 с. Рос. мовою. ISBN 966—549—541—0.**

У навчальному посібнику викладено аналітичні методи виводу рівнянь динаміки типових технологічних ділянок, апаратів та устаткування АЕС і ТЕС. Розглянута динаміка ядерних енергетичних реакторів, турбогенераторів та енергоблоків. Викладені принципи побудови АСУ ТП АЕС та ТЕС, систем управління та захисту реакторів. Описані системи управління допоміжним устаткуванням енергоблоків та принципи організації захисту тепломеханічного устаткування.

Навчальний посібник розрахований на студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами». Він буде корисний для студентів енергетичних спеціальностей «Атомна енергетика» та «Теплові електричні станції», а також експлуатаційному персоналу АЕС та ТЕС.

Іл. 115. Табл. 7. Бібліогр.: 25 назв.

Д  $\frac{2205000000-026}{549-2001}$  Без оголош

**ББК 31.46я73**  
**УДК 621.039.1:65.011.56(075.8)**