

УДК 621.22.01

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ КОНДЕНСАТА  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОНДЕНСАТОРЕ СИСТЕМЫ РАСХОЛАЖИВАНИЯ  
АТОМНОЙ СТАНЦИИ**

*Ю.А. Мефедова, Т.А. Ефремова, Т.Д. Козлова*

Рассмотрена система расхолаживания атомного реактора, назначение и контролируемые параметры технологического конденсатора. Разработана функциональная схема системы автоматического регулирования уровня конденсата. Произведен анализ и синтез цифровой системы с целью определения оптимального закона регулирования.

*Ключевые слова:* расхолаживание реактора; регулирование уровня; технологический конденсатор.

**АТОМДУК СТАНЦИЯНЫН МУЗДАТУУ СИСТЕМАСЫНЫН ТЕХНОЛОГИЯЛЫК  
КОНДЕНСАТОРУНДА КОНДЕНСАТТЫН ДЕҢГЭЭЛИН АВТОМАТТЫК ЖӨНГӨ САЛУУ  
СИСТЕМАСЫНЫН СИНТЕЗИ**

Бул эмгекте атомдук реактордун муздатуу системасы, технологиялык конденсатордун багыты жана көзөмөлдөөчү параметрлери каралган. Конденсаттын деңгээлин автоматташтырылган жөнгө салуу системасынын функционалдык схемасы иштелип чыккан. Оптималдуу жөнгө салуу мыйзамын аныктоо максатында, сан-ариптик системага анализ жана синтез жүргүзүлгөн.

*Түйүндүү сөздөр:* реакторду суутуу; деңгээлин жөнгө салуу; технологиялык конденсатор.

**SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF CONDENSATE LEVEL  
IN CONDENSER PROCESS COOLING SYSTEM OF A NUCLEAR POWER STATION**

*J.A. Mefedova, T.A. Efremova, T.D. Kozlova*

The article considers the cooling system of the nuclear reactor, the purpose and controlled parameters of the process capacitor. The functional scheme of the automatic condensate level control system is developed. The analysis and synthesis of the digital system to determine the optimal law of regulation

*Keywords:* reactor cooling; level adjustment; technological condenser.

Расхолаживание реактора атомной станции представляет собой процесс отвода тепла из активной зоны после остановки реактора с помощью специальных систем расхолаживания. В статье рассматривается система расхолаживания реактора ВВЭР-1000, имеющая специализированную аббревиатуру RR, которая кроме отвода тепла первого контура при останове энергоблока с номинальных параметров до температуры 150 °С со скоростью 15 °С/ч, осуществляет стабилизацию давления в главном паровом коллекторе в режиме поддержания энергоблока в горячем резерве. Состоит система из различной запорной и регулирующей

арматуры, трубопроводов, технологического конденсатора и контрольно-измерительных приборов.

На рисунке 1 представлена схема обвязки технологического конденсатора (RR20W01), представляющего собой вертикальный кожухотрубный теплообменник. В межтрубное пространство через коллектор собственных нужд и быстродействующую редуцирующую установку БРУ-СН в конденсатор отводится пар от главного парового коллектора.

Данный отвод пара системой RR используется тогда, когда возникает запрет на сброс пара в конденсатор турбины. В трубное пространство конденсатора поступает техническая вода,

в результате чего образуется конденсат, который отводится в линию основного конденсата (к деаэраторам) или в дренажные баки, расположенные в машинном зале. Задача системы расхолаживания заключается в изменении расхода пара, тем самым:

- осуществляется отвод тепла 1-го контура при остановке энергоблока;
- стабилизируется давление в главном паровом коллекторе в режиме поддержания энергоблока в горячем резерве.

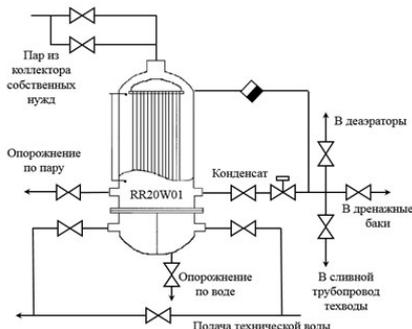


Рисунок 1 – Схема обвязки технологического конденсатора

При эксплуатации системы расхолаживания у технологического конденсатора необходимо регулировать ряд параметров (таблица 1). Расход пара косвенно зависит от уровня в технологическом конденсаторе. Для регулирования уровня конденсата используется способ регулирования «после себя», когда регулировочный клапан устанавливается после технологического конденсатора в линии отвода конденсата.

Заданное значение уровня в конденсаторе составляет 1000 мм, а заданная точность регулирования – ±50 мм. Регулирующий клапан RR30S02 управляется оператором от БРУ-32 в дистанционном режиме, без автоматического регулирования. В работе предлагается регулировать уровень в автоматическом режиме с помощью системы автоматического регулирования (САР), функциональная схема которой представлена на рисунке 2. В системе используется две обратные связи: главная обратная связь по уровню и дополнительная обратная связь по положению исполнительного механизма (МЭО – механизма электрического однооборотного).

Регулятор уровня РУ получает информацию в виде электрических сигналов (тока) от датчика уровня ДУ и указателя положения УП исполнительного механизма, также в нем прописано заданное значение уровня  $L_{зад} = 1000$  мм. При отклонении текущего значения от заданного, регулятор РУ вырабатывает сигнал на пускатель П, который приводит во вращение выходной вал механизма электрического однооборотного МЭО.

Таблица 2 – Контролируемые параметры конденсатора

Контролируемый параметр	Ед. изм.	Датчик	Номинальное значение	Допустимое отклонение
Давление пара перед ТК	кгс/см <sup>2</sup>	RQ11P01	12	11–14
Уровень в ТК	мм	RR20L01	1000	700–1500
Температура охлаждающей воды на выходе из ТК	°С	VB72T02	50	40–70
Температура конденсата на выходе из ТК	°С	RR30T01	130	120–160
Расход охлаждающей воды через ТК	т/час	VB72F01	3100	3000–3200
Расход конденсата ТК	т/час	RR20F01	120	100–150

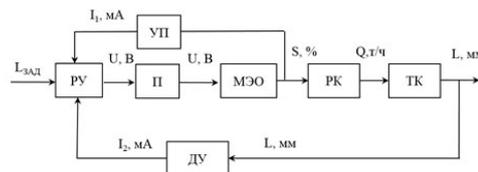


Рисунок 2 – Функциональная схема САР уровня конденсата

Регулирующий клапан РК при этом изменяет расход конденсата Q и тем самым изменяется уровень L в технологическом конденсаторе. В таблице 2 представлены передаточные функции элементов системы, необходимые для расчета САР уровня.

Таблица 2 – Элементная база САР уровня

Элемент системы	Тип	Передаточная функция
Технологический конденсатор	RR20W01	$W_K(p) = \frac{1,9 \cdot 10^{-3}}{\delta}$
Регулирующий клапан	RR30S02	$W_{PK}(p) = 2,4$
Исполнительный механизм	МЭО 630/25-0,25К-92К	$W_{MEO}(p) = \frac{0,01}{p}$
Пускатель	БСТ-12Р	$W_{П}(p) = 48,34$
Указатель положения	МСП-1	$W_{УП}(p) = 0,05$
Датчик уровня	Сапфир-22ДД	$W_{ДУ}(p) = \frac{0,005}{0,5p+1}$
Регулятор уровня	ПТК САР ТО «ТСА М 2002»	$W_{РУ}(p) = 1$

Регулятор уровня выполняется на базе программно-технического комплекса систем автоматического регулирования турбинного отделения (ПТК САР ТО «ТСА М 2002»). Данный комплекс в режиме реального времени реализует информационно-управляющие функции, в частности обеспечивает определенные законы регулирования астатических объектов с учетом охвата исполнительного механизма отрицательной обратной связью. Закон регулирования определяется в ходе синтеза цифровой системы.

После проведения структурных преобразований и определения дискретных передаточных функций САР с периодом дискретизации  $T = 0,5$  с был проведен анализ исходной системы по прямым и косвенным показателям качества. Система является устойчивой с запасами устойчивости по фазе 28,1 градусов, по амплитуде – 32,9 децибел. Время регулирования составило 225 с, перерегулирование – 40 %, показатель колебательности – 2,1, полоса пропускания от 0 до 0,068 Гц. Таким образом, сделан вывод о необходимости расчета такого закона регулирования для регулятора уровня, который позволит уменьшить время регулирования и колебательность, расширить полосу пропускания [1]. Для этого использован метод желаемой логарифмической амплитудной псевдочастотной характеристики. Первоначально выполняется построение характеристики исходной разомкнутой системы. Передаточная функция при размыкании главной обратной связи в z-преобразованиях при этом имеет вид

$$W(z) = 0,0002723 \cdot \frac{z+1}{z^2 - 1,988z + 1}.$$

Выполняя двойные замены по формулам

$$z \rightarrow \frac{1+\omega}{1-\omega}; \omega \rightarrow j\lambda \frac{T}{2},$$

осуществляется построение логарифмической амплитудной характеристики (ЛАЧХ) как функции псевдочастоты  $\lambda$ .

Желаемая характеристика (ЖЛАЧХ) в средне-частотной области построена согласно требованиям к быстродействию и колебательности (по номограмме Солодовникова определены частота среза и длина среднечастотного участка). В области низких частот ЖЛАЧХ проходит выше запретной зоны, рассчитанной из требований к точности работы системы.

В верхних частотах наклоны ЖЛАЧХ повторяют наклоны исходной системы. ЛАЧХ

последовательного корректирующего устройства получена путем графического вычитания из ЖЛАЧХ характеристики нескорректированной системы. Построения представлены на рисунке 3.

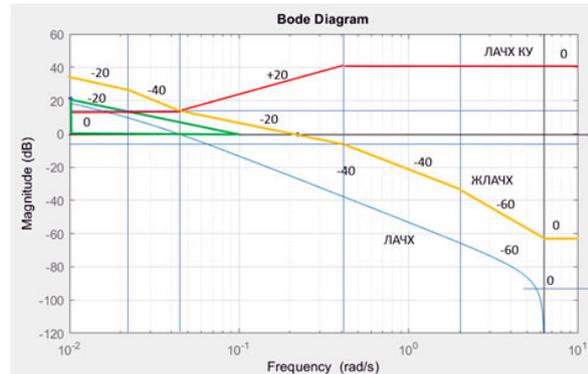


Рисунок 3 – Желаемая (ЖЛАЧХ), реальная (ЛАЧХ) и характеристика корректирующего устройства (ЛАЧХ КУ)

Передаточная функция последовательного корректирующего устройства на основании ЛАЧХ КУ имеет следующий вид:

$$W_{KY}(z) = 5 \cdot \frac{j\lambda 22,73 + 1}{j\lambda 2,5 + 1}.$$

Выполняя замены по формулам

$$j\lambda \rightarrow \frac{2\omega}{T}; \omega \rightarrow \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}},$$

определены передаточная функция и разностное уравнение корректирующего устройства:

$$W_{KY}(z) = \frac{-50z^{-1} + 51,1}{-z^{-1} + 1,22} = \frac{-40,98z^{-1} + 41,8}{-0,82z^{-1} + 1},$$

$$Y_K = 0,82Y_{K-1} + 41,8X_K - 40,98X_{K-1}.$$

На основании разностного уравнения разрабатывается блок-схема и программа коррекции для микроконтроллера регулятора уровня.

Использование данного закона регулирования обеспечивает следующие оптимальные показатели качества скорректированной САР уровня конденсата: время регулирования 110 с, перерегулирование 17 %.

#### Литература

1. Певзнер Л.Д. Теория автоматического управления. Задачи и решения: учебное пособие / Л.Д. Певзнер. СПб.: Лань, 2016.