

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ | TECHNICAL SCIENCES

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Современная наука и инновации.
2023. № 3 (43). С. 10-18
Modern Science and Innovations.
2023;3(43):10-18

Научная статья / Original article

УДК 004.75
<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.3.1>

Александр Леонидович Ляшенко
[Aleksandr L. Lyashenko]

**Модернизация системы управления
температуры теплоносителя в
парогенераторных установках**

**Modernization of the coolant temperature
control system in steam generator sets**

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия, akuna_matata_kmv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1196-8004> /
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia,
akuna_matata_kmv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1196-8004>

Аннотация. В статье рассмотрено устройство и принцип действия парогенераторной установки на примере активной зоны атомного реактора. Представлено описание оборудования, входящего в состав контуров многократной принудительной циркуляции, образующих реактор. Подробно рассмотрен процесс регулирования расхода теплоносителя в технологическом канале реактора и обоснована необходимость автоматизации данного процесса. Сформулирована и решена задача синтеза системы автоматического управления. Рассмотрена возможность использования аппарата расширенных частотных характеристик (РЧХ) для частотного анализа систем с распределенными параметрами (СРП). Сформулирована и решена задача по разработке методики расчета настроек распределенного ПИД-регулятора.

Ключевые слова: парогенератор, реактор, системы с распределенными параметрами, расширенные частотные характеристики, передаточные функции распределенных объектов, показатель колебательности, системный анализ, управление

Для цитирования: Ляшенко А. Л. Модернизация системы управления температуры теплоносителя в парогенераторных установках // Современная наука и инновации. 2023. № 3 (43). С. 10-18. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.3.1>

Abstract. In the article the device and operation of steam unit as an example of the core of a nuclear reactor. The description of the equipment included in the multiple forced circulation circuit forming the reactor. Considered in detail the process of controlling the flow of coolant in the reactor fuel channels and the necessity of automation of the process. Formulated and solved the problem of synthesis of automatic control system. The possibility of using the device, extended frequency response for frequency analysis of distributed parameter systems. Formulated and solved the problem by developing a method for calculating the settings PID-controller.

Keywords: steam generator, reactor, systems with distributed parameters, extended frequency response, transfer functions of distributed objects, the rate of oscillation, system analysis, control

For citation: Lyashenko AL. Modernization of the coolant temperature control system in steam generator sets. Modern Science and Innovations. 2023;3(43):10-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.3.1>

Введение. Известно, что все реальные технологические объекты управления обладают определенной пространственной протяженностью и этим нельзя пренебречь, не рискуя потерять при этом качество. Состояние таких объектов зависит не только от времени, оно неразрывно связано с пространственными координатами. А рассматривая реакторные установки, можно отметить, что в процессе работы реактора расходные и термодинамические параметры системы могут изменяться в пределах физически возможных и технически осуществимых изменений энергоносителей и конструкций, и находятся в пределах технически допустимых эксплуатационных состояний материалов оборудования. По этой причине мы можем отнести устройства данного типа к системам с распределенными параметрами (СРП)

Материалы и методы исследований. При исследовании систем с распределенными параметрами (СРП) применяются соответствующие методы анализа и синтеза.

Рассмотрим парогенераторную установку (ПГУ) на примере реактор РБМК-1000 Ленинградской АЭС, как объект с распределенными параметрами.

Атомная электростанция представляет собой систему разнородных элементов оборудования со сложной схемой технологических связей. В такой системе осуществляются непрерывные взаимосвязанные процессы преобразования, передачи и перераспределения различных видов энергии, изменения параметров состояния и расходов рабочих тел и теплоносителей. Всякое изменение любого параметра или характеристики элемента оборудования в той или иной степени влияет на параметры, характеристики и показатели всей системы. Очень важно, что термодинамические и расходные параметры системы могут изменяться лишь в пределах физически возможных и технически осуществимых состояний энергоносителей и конструкций, а также в пределах технически допустимых эксплуатационных состояний материалов оборудования.

Для обеспечения безопасной эксплуатации АЭС проводится постоянная диагностика состояния реакторной установки. Технологический процесс требует обеспечения управления температурными полями в активной зоне реактора, поэтому задача разработки методик синтеза распределённых регуляторов для систем управления объектами с распределенными параметрами и разработка систем автоматического управления запорно-регулирующими клапанами, которые в настоящий момент управляются вручную, становится все более актуальной.

Описание объекта и постановка задачи. Рассмотрим реакторную установку на примере РБМК-1000 (Реактор Большой Мощности Канальный) Ленинградской атомной электростанции. Реактор РБМК-1000 имеет две петли контура многократной принудительной циркуляции (КМЦ), расположенные симметрично относительно осевой плоскости реактора.



**Рисунок. 1. Устройство РБМК-1000 /
Figure 1. RBMK-1000 device**

Каждая петля включает два барабана-сепаратора и четыре циркуляционных насоса, прокачивающих воду через технологические каналы. При прохождении через активную зону вода нагревается до температуры кипения. В верхней части активной зоны образуется пар. Пароводяная смесь отводится в барабаны-сепараторы, где разделяется на воду, которая возвращается на вход реактора и сухой насыщенный пар (температура ~ 284 °С) под давлением 70—65 кгс/см², поступающий на два турбогенератора электрической мощностью по 500 МВт [1].

Данный реактор представляет собой систему, в которой в качестве замедлителя используется графит, в качестве теплоносителя – легкая вода, в качестве топлива – диоксид урана UO_2 с добавкой оксида эрбия Er_2O_3 . Активная зона РБМК представляет собой графитовую кладку цилиндрической формы, набранную из вертикальных графитовых колонн. Внутри графитовых колонн имеются отверстия, через которые проходят технологические и специальные каналы [1]. В технологические каналы устанавливаются тепловыделяющие сборки (ТВС), состоящие из 2-х пучков ТВЭЛов.

Постоянное поддержание необходимого охлаждения активной зоны реактора РБМК – главная задача безопасной эксплуатации. Подача теплоносителя в топливные каналы реактора для отвода тепла от тепловыделяющих сборок и от графитовой кладки осуществляется при помощи контура многократной принудительной циркуляции (КМЦ). Регулирование расхода теплоносителя происходит при помощи запорно-регулирующего клапана (ЗРК). Регулирование расхода в технологическом канале (ТК) выполняется вручную. Операцию регулировки расхода воды в ТК производит оператор реакторного отделения.

Для измерения расхода воды в каналах реактора используются шариковые расходомеры типа ШТОРМ-32М и ШТОРМ-8М, установленные на трубопроводе подвода воды к каждому каналу. Для измерения температуры графитовой кладки применяются трехзонные и пятизонные блоки термопар, обеспечивающие измерение температуры графита в трех или пяти точках по высоте активной зоны. Термопреобразователи установлены в 17 температурных каналах, установленных в отверстиях в углах графитовых колонн кладки.

Основным условием теплотехнической надежности работы кипящего канального реактора РБМК является обеспечение бескризисной работы топливных каналов активной зоны. Мощность ТК и степень открытия ЗРК являются определяющими факторами, влияющими на расходы теплоносителя и запас до кризиса теплообмена в топливных каналах реактора. Критическая мощность ТК, при превышении которой может возникнуть кризис теплообмена зависит от величины расхода воды через данный ТК, от давления и недогрева теплоносителя на входе ТК.

Если известна мощность каждого ТК реактора, то, в принципе, для каждого ТК можно было бы установить степень открытия его ЗРК так, чтобы расход соответствовал заданной величине коэффициента запаса до кризиса теплообмена. Однако система регулирования расхода через каналы реактора РБМК не предназначена работать в таком режиме. Регулирование расхода в ТК на мощности выполняется вручную. Операцию регулировки расхода воды в ТК производит оператор реакторного отделения. Управление запорно-регулирующим клапаном – довольно сложная и очень ответственная операция.

Регулирование расхода теплоносителя в ТК реактора состоит из следующих основных этапов:

- 1) Системой «Скала-микро» проводится автоматический периодический опрос всех каналов измерения расхода в ТК и сравнение результатов измерения с уставками снижения и повышения расхода воды (СРВ и ПРВ).
- 2) Сигнализация отклонений за уставки СРВ и ПРВ выводится на мнемотабло каналов, установленное на БЩУ в рабочей зоне оператора реактора.
- 3) Ведущий инженер по управлению реактором (ВИУР) принимает решение и отдает распоряжение регулировки закрытия ЗРК оператору реакторного отделения.
- 4) Оперативный персонал (ОП) реакторного отделения вручную регулирует закрытие ЗРК.

Предлагается автоматизировать процесс управления ЗРК и приводить его в действие с помощью шагового двигателя. Управление исполнительным механизмом предлагается осуществлять с помощью распределенного высокоточного регулятора (РВР). Установка

распределенного высокоточного регулятора значительно повысит скорость отклика системы при возможных отклонениях: снижения или превышения расхода воды через активную зону реактора.

Результаты исследований и их обсуждение. Разработка системы управления. Мониторинг параметров реакторной установки связан с необходимостью анализа непрерывных физических процессов, математическим описанием которых являются дифференциальные уравнения в частных производных вместе с краевыми условиями.

Согласно [2] уравнение переноса энергии в текучей среде, записанное в векторной форме, имеет вид:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + w \nabla T \right) = \text{div}[\lambda \text{grad}(T)] + g_v + \mu \Phi - p \text{div}(w) \quad (1)$$

Запишем уравнение (1) для графитовой кладки в АЗ:

$$\frac{\partial T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{\Gamma} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a_{\Gamma} W_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma} V_{\Gamma}}. \quad (2)$$

Применительно к трубе из циркония уравнение (1) имеет следующий вид

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_{\text{ц}} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

Запишем уравнение для теплоносителя.

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_{\text{ц}} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right] - g(R, t) \frac{\partial T_{p,f}(x, r, \varphi, t)}{\partial x} \quad (4)$$

Для всех уравнений зададим начальные и граничные условия с учетом геометрических размеров установки.

Как известно из [1] в трубах парогенераторов АЭУ имеет место только 4 режима течения: пузырьковый, снрядный, эмульсионный и кольцевой.

На рис. 2, б показаны режимы процесса кипения в АЗ реактора.

На рис. 2 технологический канал представлен горизонтально для наглядного представления связи ТК и графика распределения температур в нем.

Вода, поступающая на вход АЗ, нагрета до температуры насыщения. Тепловыделяющие сборки (ТВС) обеспечивают постоянный тепловой поток, в результате чего на участке теплообмена в однофазной среде температура стенки ТК возрастает по мере удаления от входа из-за увеличения температуры жидкости, пока не будет достигнута величина перегрева стенки, необходимая для начала парообразования. Далее наступает процесс кипения.

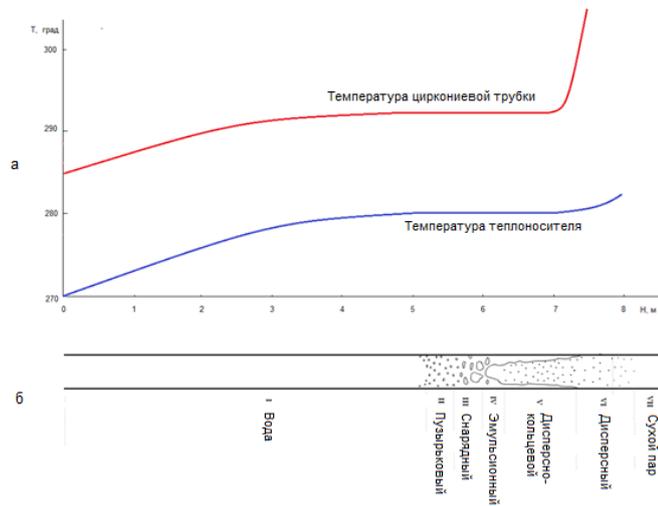


Рисунок 2. Режимы двухфазных потоков и графики изменения температур вдоль канала / Figure 2. Modes of two-phase flows and graphs of temperature changes along the channel

Известно, что режим адиабатного пароводяного потока можно определить однозначной функцией трех переменных: давления, массовой скорости и паросодержания [4].

Оценки для пароводяной смеси можно выполнить по следующим соотношениям.

Нижняя граница пузырькового режима

$$x = -(3.5 \pm 0.3) \cdot 10^2 \frac{q}{r \cdot \rho \cdot w} \left[\frac{\rho \cdot w \cdot d}{\mu'} \right]^{0.6} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0.33} \quad (5)$$

Граница перехода от снарядного к эмульсионному режиму

$$x = (4.5 \pm 1.5) \cdot 10^{-2} \left[\frac{(\rho')^2 \cdot g \cdot d}{(\rho \cdot w)^2} \right]^{0.25} \quad (6)$$

Граница дисперсно-кольцевого режима

$$x = (2.7 \pm 0.3) \left[\frac{\rho'' \cdot \sigma}{(\rho \cdot w)^2 \cdot d} \right]^{0.25} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0.33} \quad (7)$$

Удельная теплота парообразования рассчитывается по выражению $r = h'' - h'$.

Энтальпия воды на входе в ТК определяется по формулам [6]:

$$h' = \frac{h_{нв} G_{нв}^{л/н} + h'_{сен} (G_{КМЩ}^{л/н} - G_{нв}^{л/н})}{G_{КМЩ}^{л/н}} \quad (8)$$

Для точного учета границ экономайзерного участка паросодержание в АЗ рассчитывается с учетом поверхностного кипения. Для этого вычисляется энтальпия начала закипания:

$$h_{нк} = h' - 55 \cdot \frac{q_{i,S}}{G} \left(\frac{v'}{v''} \cdot \frac{d}{v' \cdot 3600} \cdot \sqrt{\frac{q_i \cdot G \cdot v' \cdot v''}{r \cdot S}} \right)^{0.3} \quad (9)$$

$$q_i = \frac{W_k \cdot 860}{F_{менл}} \cdot K_{яч} \cdot \frac{\Phi(z)}{\Phi_{ср}} \cdot (1 - \eta_{ср})$$

Полученные уравнения были решены с применением численных методов. Полученная модель была проверена на адекватность путем сравнения результатов вычислительного эксперимента с результатами, полученными с помощью информационно-вычислительной системы «Скала-микро» Ленинградской атомной электростанции, обеспечивающей контроль

над работой реактора, осуществляет контроль и представление информации по энергоблоку, а также по системам защиты и управления..

Полученная модель позволяет проводить исследования тепловых процессов в ПГУ при различных режимах. С её помощью были получены графики распределения температур вдоль канала (Рис. 2, а). Модель позволяет произвести расчет системы управления для осуществления контроля и управления уровнем экономайзерной зоны.

На рис.3 представлена структурная схема системы управления ЗРК с применением РВП.

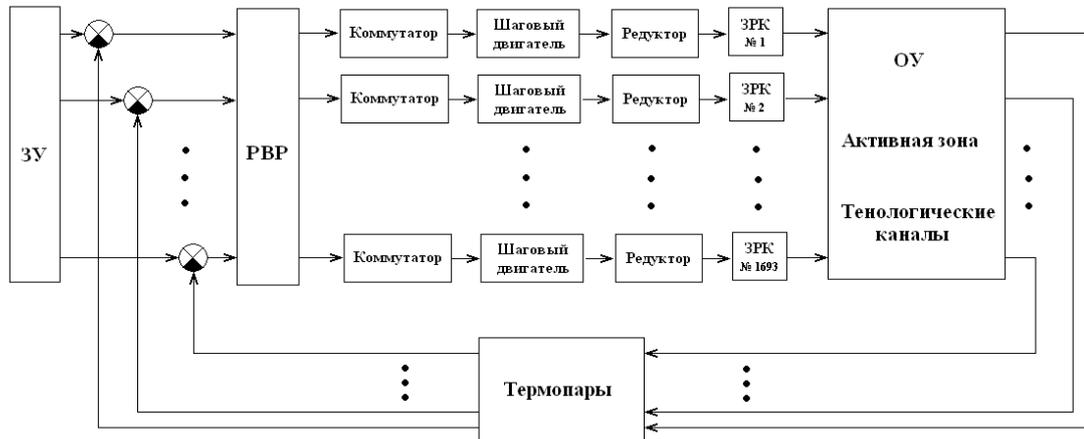


Рисунок 3. Структурная схема предложенного управления ЗРК /
Figure 3. Block diagram of the proposed SAM control

Рассмотрим анализ технологических процессов с применением аппарата расширенных частотных характеристик адаптированного для анализа распределенных систем управления.

Расширенными частотными характеристиками называются выражения для передаточной функции, для которых переменная p заменяется уравнением границы заданной колебательности. Для получения РЧХ следует заменить переменную p в передаточной функции уравнением границы заданной колебательности:

$$p = \omega(j - m), \quad 0 \leq \omega \leq \infty$$

Анализ объекта управления. Исследования, проведенные в [5], показывают, что многие процессы могут быть аппроксимированы передаточными функциями по каждой η -ой моде входного воздействия вида

$$W_{\eta}(p) = \frac{K_{\eta}}{T_{\eta} \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{\eta} \cdot p}, \quad (10)$$

где p – оператор Лапласа, K_{η} , T_{η} , τ_{η} – параметры, определяемые с использованием результатов эксперимента.

Для проведения частотного анализа разложим входное воздействие $U(x, z, \tau)$ в ряд Фурье. Учитывая граничные условия, входное воздействие может быть представлено в виде:

$$U(x, z, \tau) = L_3 + 0.1 * L_s * \sin(\Psi_{\eta} * x_i) * \sin(\bar{\Psi}_{\gamma} * z_j) \quad (11)$$

где: $L_3 = 0.5 * (L_s)$;

L_s - размер внутреннего диаметра трубы;

L_3 - текущее положение заслонки.

$$\Psi_{\eta} = \pi \cdot \frac{\eta}{x_L}; \quad \bar{\Psi}_{\gamma} = \pi \cdot \frac{\gamma}{z_L}. \quad (12)$$

Найдем реакцию объекта на каждую составляющую ряда (11). Эту реакцию будем искать в виде:

$$T_{\eta,\gamma}(x, y, z, \tau) = H_{\eta,\gamma}(y, \tau) \cdot \sin(\Psi_{\eta} \cdot x) \cdot \sin(\bar{\Psi}_{\gamma} \cdot z), \quad (13)$$

Для двух пространственных мод входного воздействия ($\eta=1,3$) были проведены экспериментальные исследования и вычислены значения параметров:

$$K_1 = 1.0257; \quad T_1 = 0.7125; \quad \tau_1 = 0.1002;$$

$$K_3 = 1.0392; \quad T_3 = 0.6232; \quad \tau_3 = 0.1002.$$

Для частотного анализа объекта положим в (1) $p = \omega(j - m)$. При изменении значения ω от 0 до ∞ , а значения G от G_n до ∞ , вектор $W(G, j, m)$ в пространстве $\text{Re}(W)$, $\text{Im}(W)$, G опишет поверхность, которую назовем расширенным пространственным годографом (РПГ) (рис. 4).

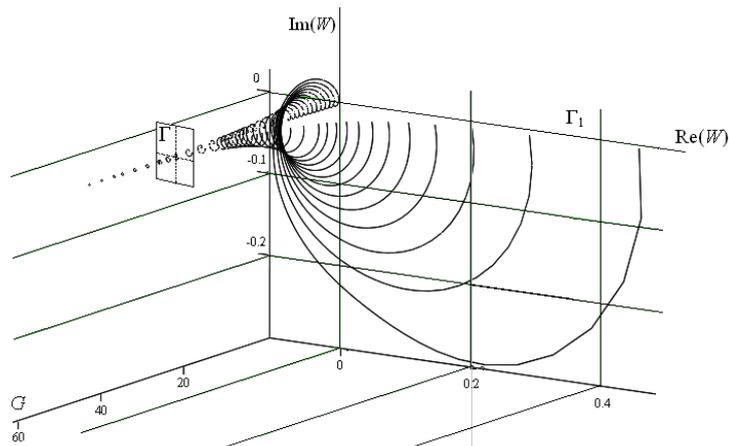


Рисунок 4. Расширенный пространственный годограф /
Figure 4. Extended spatial hodograph

Для определения частотной характеристики объекта, по заданной (η, γ, ξ) пространственной гармонической составляющей входного воздействия, необходимо рассесть пространственный годограф плоскостью Γ , параллельной плоскости Γ_1 и проходящей через точку с координатами:

$$\text{Re}(W)=0, \quad \text{Im}(W)=0, \quad G = \tilde{G}(\eta, \gamma, \xi).$$

След пересечения плоскости Γ и пространственного годографа будет представлять искомую частотную характеристику [3].

Произведем построение расширенных логарифмических амплитудно-частотных характеристик (РЛАЧХ) и расширенных фазо-частотных характеристик (РФЧХ) по $\eta = 1, 3$ модам входного воздействия для исследуемого, и рассмотренного выше объекта.

Полученные расширенные частотные характеристики используем для синтеза распределенного регулятора.

Синтез системы управления. Для системы управления объектом, передаточные функции которого по выбранным пространственным модам имеют вид (10), синтезировать распределенный ПИД-регулятор со следующими показателями: запас устойчивости по фазе $-\Delta\varphi \geq 0.5$; по модулю $-\Delta L \geq 10\text{db}$ значение параметров $\Delta = 0,7$.

Передаточная функция синтезируемого регулятора согласно [4] имеет вид:

$$W(x, y, p) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot p \quad (14)$$

где: E_1 , E_2 , E_4 – коэффициенты усиления; ∇^2 – лапласиан; n_1 , n_2 , n_4 – весовые коэффициенты.

Для частотного анализа объекта положим в (10) $p = \omega \cdot (j - m)$ и определим модуль M_η и фазу φ_η :

$$M_\eta(m, \omega) = \frac{k_n}{\sqrt{(1 - T_n m \omega)^2 + T_n^2 \omega^2}} \cdot e^{m\tau\omega} \quad (15)$$

$$\varphi_\eta(m, \omega) = -\omega \cdot \tau_\eta - \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\left(\frac{T_n m \omega - 1}{T_n \omega}\right) \quad (16)$$

Положим, что фазовый сдвиг, вносимый в систему регулятором равен нулю. Тогда для определения частот среза модуля разомкнутой системы получим следующие выражение:

$$-\pi + \Delta\varphi_\eta = W(m, j\omega, \eta) \quad (17)$$

$$-\pi + \Delta\varphi_\eta = -\omega \cdot \tau_\eta - \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\left(\frac{T_n m \omega - 1}{T_n \omega}\right) \quad (18)$$

где: $W(m, j\omega, \eta)$ - комплексный передаточный коэффициент объекта управления, определенный численным способом.

Подставляя значение T_η , τ_η и $\Delta\varphi_\eta = \pi/6$ в (18), определим значение частот среза модуля: $\eta = 1$, $\omega_1 = 0.13334$; $\eta = 3$, $\omega_3 = 0.13494$.

Используя полученные соотношения и значения частот среза модуля произведем расчет настроек распределенного регулятора. Для этого используем методику, которая изложена в [5].

Запишем передаточную функцию распределенного ПИД-регулятора:

$$W(x, y, s) = 1.7572 \cdot \left[\frac{1827.7125}{1828.7125} - \frac{1}{1828.7125} \cdot \nabla^2 \right] + \quad (19)$$

$$+ 2.49812 \cdot \left[\frac{2855.1728}{2856.1728} - \frac{1}{2856.1728} \cdot \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + 0.0207 \cdot s$$

Заключение. При таком принципе управления расходом теплоносителя автоматизируется регулировка ЗРК, т.е. оперативный персонал проводит только контроль теплотехнических параметров и повышается скорость отклика системы при возможных отклонениях расхода воды через активную зону реактора. Регулирование и контроль расхода теплоносителя по каждому каналу позволит на выходе всех каналов получать одинаковые теплотехнические параметры и, соответственно, иметь минимально необходимый расход теплоносителя через реактор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов М. А., Авдеев В. И., Адамов Е. О. Под общей редакцией Ю. М. Черкашова. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. 632 с.
2. Кириллов П. Л., Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоиздат, 1990. 360 с.
3. Ляшенко А. Л., Морева С. Л. Математическое моделирование системы с распределенными параметрами на примере активной зоне реактора РБМК-1000 // Материалы четвертой Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». Таганрог.: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. С. 218–225.

4. Ляшенко А. Л. Частотный анализ объектов с распределёнными параметрами с помощью расширенных частотных характеристик // Материалы 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ – 2010). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2010. С. 65–70.

5. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределёнными параметрами. Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007. 244 с.

REFERENCES

1. Abramov MA, Avdeev VI, Adamov EO. Edited Yu.M. Cherkashova. Channel RBMK nuclear power reactor. M.: SUE NIKIET, 2006. 632 p.

2. Kirillov PL, Yuriev YuS, Bobkov VP. Handbook of thermohydraulic calculations (Nuclear reactors, heat exchangers, steam generators). M.: Energoizdat, 1990. 360 p.

3. Lyashenko AL, Moreva SL. Mathematical modeling of systems with distributed parameters by the example of the reactor core RBMK-1000. Materialy Fourth International Conference "System synthesis and Applied Synergetics". Taganrog.: Publishing House of TTI SFU, 2011;218–225.

4. Lyashenko AL. Frequency analysis of objects with distributed parameters by means of expanded frequency characteristics. Materials of the 6-th scientific conference "Management and information technology» (MIT-2010). SPb.: Jsc «Concern «TSNII Elektropribor». 2010;65–70.

5. Pershin IM. Analysis and synthesis of systems with distributed parameters. Pyatigorsk: advertizing news agency on KMV, 2007. 244 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Александр Леонидович Ляшенко – кандидат технических наук, доцент кафедры Управления в технических системах, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksandr L. Lyashenko – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of Management in Technical Systems, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию: 12.07.2023;

одобрена после рецензирования: 14.08.2023;

принята к публикации: 07.09.2023.

The article was submitted: 12.07.2023;

approved after reviewing: 14.08.2023;

accepted for publication: 07.09.2023.