

Е. Н. НИКУЛИНА, канд. техн. наук, мл. научн. сотр. НТУ «ХПИ»

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ
МОЩНОСТИ РЕАКТОРА**

Приведена структурна схема системи автоматичного регулювання теплової потужності ядерного реактора. Обчислені значення постійних параметрів математичних моделей систем автоматичного регулювання потужності реактора. Розроблені математичні моделі систем автоматичного регулювання теплової потужності з різними регуляторами.

Приведена структурная схема системы автоматического регулирования тепловой мощности ядерного реактора. Вычислены значения постоянных параметров математических моделей систем автоматического регулирования мощности реактора. Разработаны математические модели систем автоматического регулирования тепловой мощности с различными регуляторами.

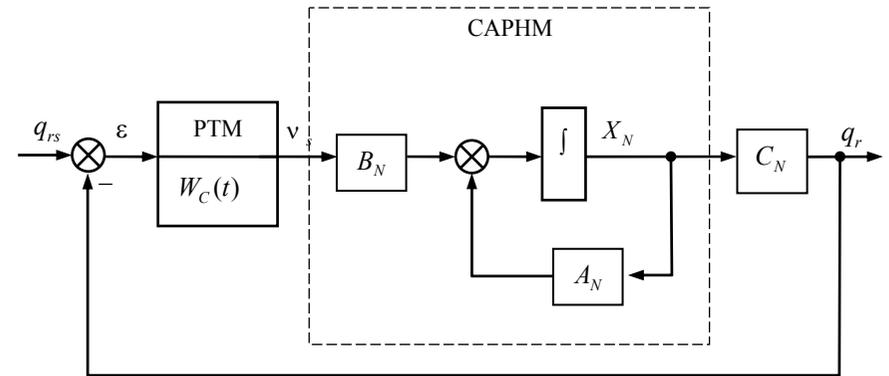
The block diagram of system of automatic control of thermal capacity of a nuclear reactor is resulted. Values of constant parameters of mathematical models of systems of automatic control of capacity of a reactor are calculated. Models of systems of automatic control of thermal capacity are developed with various regulators.

Введение. При проектировании ядерных реакторов ВВЭР-1000 нового поколения и модернизации существующих реакторов особое внимание уделяется улучшению их маневренных характеристик, которые зависят от динамических свойств реактора и его систем автоматического регулирования (САР). Поскольку важнейшей выходной характеристикой реактора является тепловая мощность теплоносителя, актуальна проблема оптимизации законов регулирования тепловой мощности реактора [1].

В САР нейтронной мощности (САРНМ) реактора наиболее эффективен пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования [2, 3]. Для определения оптимального закона регулирования тепловой мощности необходимы математические модели САР тепловой мощности (САРТМ) реактора с различными регуляторами. Данная статья посвящена разработке таких моделей на основании модели САРНМ.

Постановка задачи. Структурная схема САРТМ (см. рисунок) включает сумматор, регулятор тепловой мощности (РТМ), модель САРНМ и отрицательную обратную связь. На вход системы подается уставка мощности q_{rs} , выходом является координата тепловой мощности q_r . Текущее значение тепловой мощности измеряется датчиком и отрицательной обратной связью подается на сумматор, формируя сигнал ошибки:

$$\varepsilon = q_{rs} - q_r . \tag{1}$$



Структурная схема САРТМ реактора

Ошибка поступает на вход РТМ с передаточной функцией $W_c(t)$, формирующий по заданному закону управляющее воздействие v_s . Это воздействие подается в САРНМ, изменяя тепловую мощность реактора q_r . Требуется разработать модели САРТМ с различными регуляторами.

Решение задачи. Линейную САР нейтронной мощности реактора с ПИ регулятором представим дифференциальным уравнением [2]:

$$\frac{dX_N}{dt} = A_N X_N + B_N v_s , \quad q_r = C_N X_N , \tag{2}$$

$$A_N = \begin{pmatrix} \gamma_n & \gamma_I & \gamma_{II} & \gamma_u & 0 & \gamma_r & \lambda_n & 0 \\ \lambda_I & -\lambda_I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{II} & 0 & -\lambda_{II} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{un} & 0 & 0 & a_{uu} & a_{uz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{zu} & a_{zz} & a_{zr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{rz} & a_{rr} & 0 & 0 \\ -b_{du} K_N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{dd} & b_{du} \\ -\lambda_N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} , \quad B_N = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{du} K_N \\ \lambda_N \end{pmatrix} , \tag{3}$$

$$X_N = (v \quad \xi_I \quad \xi_{II} \quad \theta_u \quad \theta_z \quad \theta_r \quad \rho_d \quad u_N)^T , \tag{4}$$

$$C_N = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad k_r \quad 0 \quad 0) ,$$

где $\lambda_I, \lambda_{II}, \lambda_n$ — постоянные радиоактивного распада, $\gamma_I = \lambda_n \mu_I, \gamma_{II} = \lambda_n \mu_{II}$; μ_I, μ_{II} — относительные доли двух групп запаздывающих нейтронов; γ_n — коэффициент линеаризации по мощности; $\gamma_u = -\lambda_n \alpha_u, \gamma_r = -\lambda_n \alpha_r$; α_u, α_r — температурные коэффициенты реактивности; $b_{un}, a_{uu}, a_{uz}, a_{zu}, a_{zr}, a_{rz}, a_{rr}$ — коэффициенты матрицы реальных значений реактора, получены на основании теории термодинамики; $a_{dd} = -1/T_d, b_{du} = K_d/T_d$; K_d и T_d — коэффициент усиления и постоянная времени привода; v — относительная координата нейтронной мощности, ξ_I, ξ_{II} — относительные координаты концентраций двух групп запаздывающих нейтронов, $\theta_u, \theta_r, \theta_z$ — относительные координаты температур топлива, теплоносителя, оболочки твэла, ρ_d — составляющая реактивности, u_N, K_N, λ_N — интегральная составляющая и параметры ПИ регулятора САРНМ, k_r — коэффициент формулы (2)–(4) представлены в таблице.

Значения параметров реактора

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
β	0,00639	a_{uu}, c^{-1}	-9,47	a_{dd}, c^{-1}	-0,0286
λ_n, c^{-1}	199,7	a_{uz}, c^{-1}	9,00	b_{du}, c^{-1}	0,0112
λ, c^{-1}	0,076	a_{zu}, c^{-1}	33,9	K_D	10
μ_I	0,252	a_{zz}, c^{-1}	-73,4	K_N	50
μ_{II}	0,748	a_{zr}, c^{-1}	39,5	λ_N, c^{-1}	1,054
λ_I, c^{-1}	0,0263	a_{rz}, c^{-1}	3,46	$c_r, Дж \cdot кг^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	5590
λ_{II}, c^{-1}	0,2880	a_{rr}, c^{-1}	-4,87	$G_r, кг \cdot c^{-1}$	19000
γ_n, c^{-1}	-762,2	b_{un}, c^{-1}	0,467	$t_{r0}, ^\circ C$	311
γ_I, c^{-1}	50,321	γ_u, c^{-1}	-288	k_r	11,01
γ_{II}, c^{-1}	149,366	γ_r, c^{-1}	-3645	$Q_0, МВт$	3000
α_q	-2,82	α_v	4,72	T_d, c	35
α_u	-1,44	α_t	-18,3	K_d	0,391

Рассмотрим различные регуляторы, состоящие из пропорционального (П), интегрального (И) и дифференциального (Д) регуляторов. П регулятор формирует пропорциональный закон управления:

$$u_p = K_p \varepsilon. \quad (5)$$

И, Д регуляторы формируют интегральный и дифференциальный законы:

$$\frac{du_I}{dt} = \lambda_I \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{dv_D}{dt} = -\lambda_D (v_D + K_D \varepsilon), \quad u_D = v_D + K_D \varepsilon. \quad (7)$$

Здесь $\lambda_I = 1/T_I, \lambda_D = 1/T_D, K_P, K_D, T_I$ и T_D — параметры регуляторов.

Построим математические модели систем регулирования тепловой мощности реактора с различными регуляторами в виде

$$\frac{dX_{Hc}}{dt} = A_{Hc} X_{Hc} + B_{Hc} q_{rs}, \quad q_r = C_{Hc} X_{Hc},$$

где индекс c соответствует типу регулятора.

Модель САР с П регулятором определим на основании (2)–(5) $v_s = u_p$:

$$\frac{dX_N}{dt} = A_N X_N + B_N K_P (q_{rs} - C_N X_N), \quad q_r = C_N X_N. \quad (8)$$

Сгруппировав коэффициенты при переменных, получим:

$$\frac{dX_{Hp}}{dt} = A_{Hp} X_{Hp} + B_{Hp} q_{rs}, \quad q_r = C_{Hp} X_{Hp}, \quad (9)$$

где $X_{Hp} = X_N, A_{Hp} = A_N - K_P B_N C_N, B_{Hp} = K_P B_N, C_{Hp} = C_N$. (10)

Построим системы с И регулятором по (2)–(4), (6), (7) при $v_s = u_I$:

$$\begin{cases} \frac{dX_N}{dt} = A_N X_N + B_N u_I, \\ \frac{du_I}{dt} = \lambda_{II} (q_{rs} - C_N X_N), \end{cases}, \quad q_r = C_N X_N. \quad (11)$$

Объединяя переменные состояние, получим:

$$X_{HI} = (X_N \ u_I)^T, \quad C_{HI} = (C_N \ 0), \quad (12)$$

$$A_{Hi} = \begin{pmatrix} A_N & B_N \\ -\lambda_I C_N & 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Hi} = \begin{pmatrix} 0 \\ \lambda_I \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Линейную модель САР с Д регулятором получим по уравнениям (2)–(4), (7) при $v_s = u_D$. Он неприменим для данной системы, так как $q_r(\infty) = 0$.

Комбинируя П, И и Д регуляторы, определим другие системы регулирования тепловой мощности реактора. Модель системы с ПИ регулятором построим по (2)–(5), (7), при $v_s = u_P + u_I$:

$$\begin{cases} \frac{dX_N}{dt} = A_N X_N + B_N K_P (q_{rs} - C_N X_N) + B_N u_I, \\ \frac{du_I}{dt} = \lambda_I (q_{rs} - C_N X_N), \end{cases}, \quad q_r = C_N X_N. \quad (14)$$

$$X_{Hpi} = (X_N \quad u_I)^T, \quad C_{Hpi} = (C_N \quad 0), \quad (15)$$

$$A_{Hpi} = \begin{pmatrix} A_N - K_P B_N C_N & B_N \\ -\lambda_I C_N & 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Hpi} = \begin{pmatrix} K_P B_N \\ \lambda_I \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Систему с ПД регулятором определим по (2)–(5), (7) при $v_s = u_P + u_D$:

$$\begin{cases} \frac{dX_N}{dt} = A_N X_N + B_N v_D + B_N (K_P + K_D)(q_{rs} - C_N X_N), \\ \frac{dv_D}{dt} = -\lambda_D v_D - \lambda_D K_D (q_{rs} - C_N X_N), \end{cases}, \quad q_r = C_N X_N. \quad (17)$$

$$X_{Hpd} = (X_N \quad v_D)^T, \quad C_{Hpd} = (C_N \quad 0), \quad (18)$$

$$A_{Hpd} = \begin{pmatrix} A_N - (K_P + K_D) B_N C_N & B_N \\ \lambda_D K_D C_N & -\lambda_D \end{pmatrix}, \quad B_{Hpd} = \begin{pmatrix} (K_P + K_D) B_N \\ -\lambda_D K_D \end{pmatrix}. \quad (19)$$

ИД регулятор получим по уравнениям (2)–(4), (6), (7), при $v_s = u_I + u_D$:

$$\begin{cases} \frac{dX_N}{dt} = A_N X_N + B_N u_I + B_N v_D + B_N K_D (q_{rs} - C_N X_N), \\ \frac{du_I}{dt} = \lambda_I (q_{rs} - C_N X_N), \\ \frac{dv_{HD}}{dt} = -\lambda_D v_D - \lambda_D K_D (q_{rs} - C_N X_N), \end{cases}, \quad q_r = C_N X_N. \quad (20)$$

$$X_{Hid} = (X_N \quad u_I \quad v_D)^T, \quad C_{Hid} = (C_N \quad 0 \quad 0), \quad (21)$$

$$A_{Hid} = \begin{pmatrix} A_N - K_D B_N C_N & B_N & B_N \\ -\lambda_I C_N & 0 & 0 \\ \lambda_D K_D C_N & 0 & -\lambda_D \end{pmatrix}, \quad B_{Hid} = \begin{pmatrix} K_D B_N \\ \lambda_I \\ -\lambda_D K_D \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Математическую модель системы с ПИД регулятором построим по уравнениям (2)–(7) при $v_s = u_P + u_I + u_D$:

$$\begin{cases} \frac{dX_N}{dt} = A_N X_N + B_N [u_I + v_D + (K_P + K_D)(q_{rs} - C_N X_N)], \\ \frac{du_I}{dt} = \lambda_I (q_{rs} - C_N X_N), \\ \frac{dv_D}{dt} = -\lambda_D v_D - \lambda_D K_D (q_{rs} - C_N X_N), \end{cases}, \quad q_r = C_N X_N. \quad (23)$$

$$X_{Hpid} = (X_N \quad u_I \quad v_D)^T, \quad C_{Hpid} = (C_N \quad 0 \quad 0), \quad (24)$$

$$A_{Hpid} = \begin{pmatrix} A_N - (K_P + K_D) B_N C_N & B_N & B_N \\ -\lambda_I C_N & 0 & 0 \\ \lambda_D K_D C_N & 0 & -\lambda_D \end{pmatrix}, \quad B_{Hpid} = \begin{pmatrix} (K_P + K_D) B_N \\ \lambda_I \\ -\lambda_D K_D \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Итак, формулы (8)–(25) представляют математические модели САР тепловой мощности ядерного реактора с различными типами регуляторов.

Выводы. На основании модели системы автоматического регулирования нейтронной мощности ядерного реактора ВВЭР-1000 и структурной схемы САР тепловой мощности получены математические модели САР тепловой мощности реактора в пространстве состояний с относительными переменными и вычислены значения постоянных параметров. Разработанные модели САРГМ с различными регуляторами, предназначены для многокритериального параметрического синтеза систем автоматического регулирования.

Список литературы: 1. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИздАТ. – 2002. – 480 с. 2. Северин В. П. Моделирование и оптимизация системы регулирования мощности ядерного реактора ВВЭР-1000 // Техн. электродинамика. Тематичний випуск «Силовая электроника та енергоефективність». – 2006. – Ч. 4. – С. 89–94. 3. Северин В. П. Моделирование системы автоматического регулирования ядерного реактора ВВЭР-1000 // Вестник НТУ «ХПИ» «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – №. 54. – С. 136-141.

Поступила в редколлегию 14.01.09