

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

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПАРОГЕНЕРАТОРА

Приведена структурна схема системи автоматичного керування продуктивністю парогенератора. Обчислені значення постійних параметрів математичних моделей систем автоматичного керування парогенератора. Розроблені математичні моделі систем автоматичного керування продуктивністю з різними регуляторами.

The block diagram of automatic system control of the steam generator output is resulted. Values of constant parameters of mathematical models of automatic systems control of the steam generator output are calculated. Models of automatic systems control of output are developed with various regulators.

Постановка проблемы. Энергоблоками атомных электростанций с реакторными установками ВВЭР-1000 вырабатывается более 40% электроэнергии Украины. Перспективными планами развития энергетики Украины предусмотрено строительство новых энергоблоков ВВЭР-1000. При проектировании таких энергоблоков нового поколения и модернизации существующих особое внимание уделяется эффективности работы их систем автоматического управления (САУ) в переходных режимах. Изучение переходных режимов может быть выполнено на основании математических моделей САУ реакторной установки.

Анализ литературы. Реакторная установка для производства высоко-технологичного пара включает самый мощный в Украине ядерный энергетический реактор ВВЭР-1000 и четыре парогенератора ПГВ-1000 [1, 2]. Качество стабилизации параметров пара существенно зависит от САУ производительностью парогенератора и входящей в нее САУ уровнем воды в парогенераторе, для которой разработаны математические модели с разными законами управления [3-5]. Проведенный синтез оптимальной локальной системы показал, что для стабилизации уровня воды наиболее эффективен пропорционально-интегральный закон управления. Для определения оптимальных значений параметров регулятора производительности парогенератора необходимы математические модели САУ производительностью.

В реакторной установке, происходят сложные ядерные, тепловые, гидравлические, механические и другие процессы, полное описание которых не представляется возможным [1]. К тому же для параметрического синтеза САУ реакторной установки в нормальном режиме эксплуатации с применением методов оптимизации математические модели систем управления должны явно зависеть от переменных параметров системы и использовать минимальное число арифметических операций. Поэтому для решения задач синтеза рассматриваются линейные модели систем.

Цель статьи заключается в разработке математических моделей САУ производительностью парогенератора с различными регуляторами для оптимального синтеза систем.

Постановка задачи. Сформулированы допущения для математического моделирования парогенератора как объекта автоматического управления, а также для моделирования его систем управления. Разрабатываются линейные, автономные, детерминированные математические модели систем управления производительностью с сосредоточенными параметрами в пространстве состояний и стандартными моделями регуляторов.

Рабочий процесс в парогенераторе определяется подводом к нему двух видов рабочей среды — питательной воды от питательного турбонасоса и теплоносителя от реактора, и отводом пара в паровой коллектор. Парогенератор как объект управления можно разделить на водяной и паровой аккумуляторы. Питательная вода поступает в водяной аккумулятор, где превращается в пар за счет тепла, переданного ей теплопередающей поверхностью трубок, по которым протекает теплоноситель. Наличие пара в водяном аккумуляторе парогенератора обуславливает движение рабочей среды в циркуляционном контуре.

Для математического моделирования САУ можно сделать следующие допущения. Все трубы теплообменного пучка парогенератора заменяются одним сплошным объемом теплоносителя, окруженным металлической оболочкой. Параметры скоростей движения пароводяной смеси в трубных пучках и объема парообразования усредняются. Процессы передачи теплоты от теплоносителя к металлу эквивалентной трубки в парогенераторе и от металла к воде происходят без потерь. При рассмотрении тепловых процессов полагаются постоянными удельные теплоемкости теплоносителя и металла, а также коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи. Давление во всех точках рабочего тела внутри объема парогенератора одинаково. Вся вода и весь пар в парогенераторе имеют температуру, равную температуре насыщения и зависящую от давления. Пренебрегаем распределенностью давления по контуру. Состояние парогенератора определяется средними температурами теплоносителя и металла, давлением пароводяной смеси, объемами воды и пароводяной смеси, а также расходом пара через зеркало испарения. Линеаризация уравнений материального и теплового баланса выполняется в окрестности режима номинальной мощности.

Для регулирования тепловой мощности, поддержания баланса между давлениями питательной воды и пара, подаваемого в турбину, предназначена САУ производительностью парогенератора. На основании принципов работы этой системы и принятых допущений разработана ее структурная схема, которая представлена на рисунке и включает регулятор производительности (РП), исполнительный механизм (ИМ), питательный турбонасос (ПТН), подогреватель высокого давления (ПВД), модель парогенератора, цилиндр высокого давления (ЦВД) и обратные связи. На вход САУ подается уставка те-

пловой мощности q_s , выходом является тепловая мощность q . Возмущающими воздействиями являются координаты тепловой мощности теплоносителя q_t и вход следящего привода (СП) регулирующего клапана турбины u_s . Сигнал ε поступает на вход регулятора производительности с передаточной функцией $W_C(s)$, который по заданному закону регулирования формирует управляющее воздействие u . Управляющее воздействие подается на привод исполнительного механизма. Исполнительный механизм перемещает клапан подачи пара в ПТН и изменяет его положение μ_a , изменяя давление питательной воды π_p , поступающей на ПВД. После ПВД вода под давлением π_w подается в парогенератор и изменяет вектор его состояния X_L . Входной сигнал регулятора представим в виде

$$\varepsilon = q_s - q - v, \quad (1)$$

где v – значение разности давления воды в ПВД и пара в парогенераторе:

$$v = k_w \pi_w - k_s \pi_s.$$

Здесь π_w и π_s – значения давления воды в ПВД и пара в парогенераторе, k_w , k_s – масштабирующие коэффициенты. По формуле (1)

$$\varepsilon = q_s - k_t \theta_t - k_w \pi_w + k_s \pi_s, \quad (2)$$

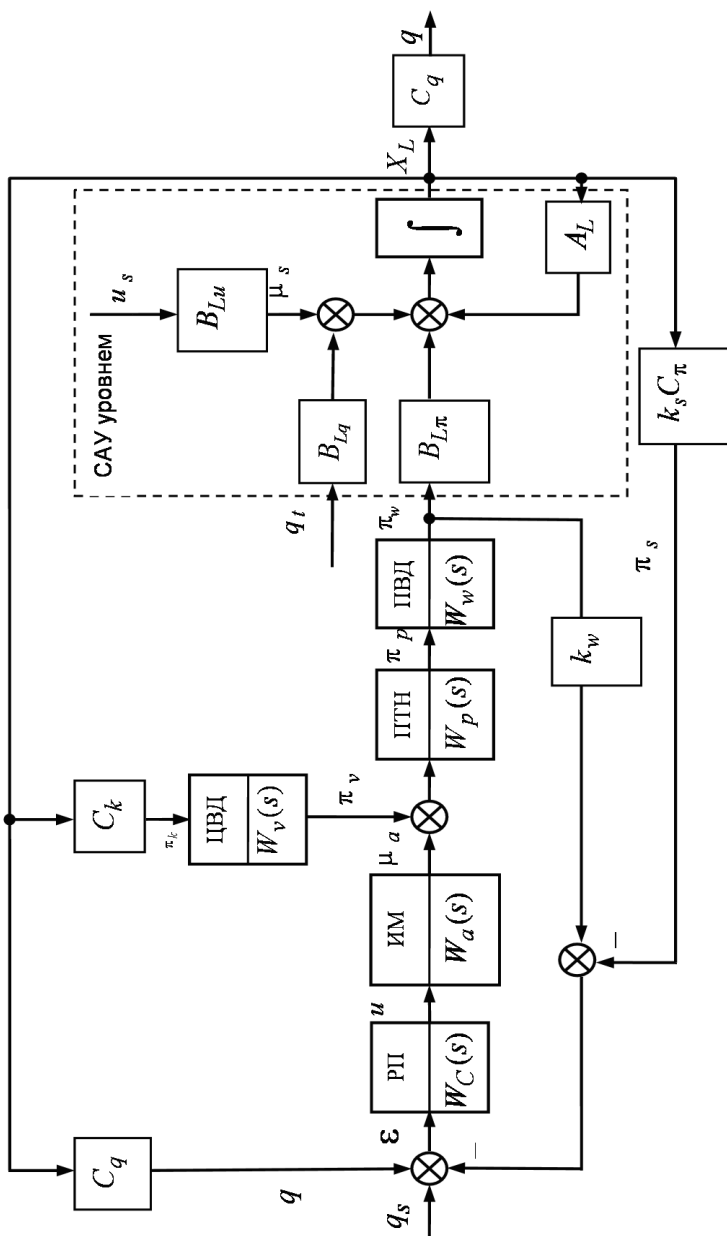
где θ_t – температура теплоносителя, k_t – коэффициент перехода от температуры к тепловой мощности.

На основании структурной схемы САУ производительностью требуется разработать математические модели систем с различными регуляторами, предназначенные для параметрического синтеза регуляторов.

Решение задачи. Модель САУ уровнем воды в парогенераторе с ПИ регулятором представим в виде системы дифференциальных уравнений (СДУ) [4, 5]:

$$dX_L/dt = A_L X_L + B_{L\pi} \pi_w + B_{Lq} q_t + B_{Lu} u_s, \quad q_s = C_L X_L.$$

Исполнительный механизм с передаточной функцией $W_a(s)$ запишем дифференциальным уравнением (ДУ):



$$d\mu_a/dt = a_a\mu_a + b_a u, \quad (3)$$

где μ_a – относительная координата исполнительного механизма, u – входное воздействие, $a_a = -1/T_a$, $b_a = 1/T_a$, T_a – постоянная времени привода.

Питательный турбонасос ($W_p(s)$) представим ДУ

$$d\pi_p/dt = a_p\pi_p + b_p\mu_a + b_v\pi_v, \quad (4)$$

где π_p – относительное значение давления ПТН, $a_p = -1/T_p$, $b_p = K_p/T_p$, K_p и T_p – коэффициент усиления и постоянная времени насоса, π_v и b_v – относительная координата давления в цилиндре высокого давления и коэффициент этой координаты. Модель ПВД $W_w(s)$ запишем в виде ДУ

$$T_w d\pi_w/dt = -\alpha_{ws}\pi_s - k_{pw}\pi_w - \mu_w + (k_{pp} - \alpha_{wp})\pi_p, \quad (5)$$

где T_w – постоянная времени ПВД, α_{ws} , α_{wp} – коэффициенты линеаризации расхода воды, k_{pw} , k_{pp} – коэффициенты линеаризации ПВД. Также ДУ представим ЦВД ($W_v(s)$) и прилегающие к нему трубопроводы:

$$d\pi_v/dt = a_v\pi_v + b_{vk}\pi_k, \quad a_v = -1/T_v, \quad b_{vk} = K_v/T_v, \quad (6)$$

где K_v , T_v – коэффициент усиления и постоянная времени ЦВД.

На основании уравнений (2)–(6) запишем модель парогенератора как объекта управления производительностью ПТН СДУ порядка $n = 14$:

$$dX_C/dt = A_C X_C + B_C u + B_{Cq} q + B_{Cu} u_s, \quad q = C_{Cq} X_C, \quad (7)$$

$$A_C = \begin{pmatrix} A_L & B_{L\pi} & 0 & 0 & 0 \\ z_1 & -k_{pw}a_w & b_w a_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_p & b_p & b_v \\ 0 & 0 & 0 & a_a & 0 \\ z_2 & 0 & 0 & 0 & a_v \end{pmatrix}, \quad X_C = \begin{pmatrix} X_L \\ \pi_w \\ \pi_p \\ \mu_a \\ \pi_v \end{pmatrix}, \quad B_C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_a \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Cq} = \begin{pmatrix} B_{Lq} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$B_{Cu} = (B_{Lu} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T, \quad C_{Cq} = (0 \ 0 \ 0 \ \alpha_{ws} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \alpha_{wp} \ 0 \ 0 \ 0), \quad (9)$$

$$a_w = 1/T_w, \quad b_w = k_{pp} - \alpha_{wp}, \quad z_1 = (0 \ 0 \ 0 \ -\alpha_{ws} a_w \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -a_w \ 0),$$

$$z_2 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b_{vk} \ 0 \ 0 \ 0).$$

С учетом формулы (8) получим для входного сигнала регулятора (2)

$$\varepsilon = q_s - D_g X_C, \quad (10)$$

где
$$D_g = (-k_t \ 0 \ 0 \ -k_s \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ k_w \ 0 \ 0 \ 0). \quad (11)$$

Коэффициенты и параметры формул (2)–(11) представлены в таблице.

Значения параметров модели парогенератора

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$b_a, 1/c$	0,12	$a_w, 1/c$	0,667	α_{ws}	–4
$a_p, 1/c$	–1	k_w	2,4	α_{sk}	4,07
$b_p, 1/c$	1	k_s	1,9	k_{pp}	5
$b_v, 1/c$	1	k_t	42,08	k_{pw}	4,5
$a_v, b_{vk}, 1/c$	1	β_{wp}	–8,57	α_{wp}	4,5

Применение различных регуляторов в САУ производительностью парогенератора приводит к изменению структуры СДУ и различному количеству переменных параметров. Построим математические модели САУ производительностью парогенератора с различными регуляторами в виде

$$dX_{Cc}(x)/dt = A_{Cc}(x)X_{Cc}(x) + B_{C\Phi c}(x)\Phi_s + B_{Cqc}q + B_{Cuc}u_s, \quad q = C_{Cqc}X_{Cc}, \quad (12)$$

где индекс c соответствует типу регулятора, $x \in R^p$ – вектор из переменных параметров регулятора производительности K_{CP} , λ_{CI} , λ_{CD} – коэффициентов пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей регуляторов. Модель САУ с пропорциональным (П) регулятором определена на основании уравнений (7)–(12) [6]:

$$X_{Cp} = X_C, \quad A_{Cp} = A_C - K_{Cp}B_C D_g, \quad B_{C\Phi p} = K_{Cp}B_C, \quad (13)$$

$$B_{Cqp} = B_{Cq}, \quad B_{Cup} = B_{Cu}, \quad C_{Cqp} = C_{Cq}. \quad (14)$$

Для этой модели порядок $n = 14$, $x = K_{CP}$ – переменный параметр в задаче параметрического синтеза.

Модель САУ с интегральным (И) регулятором с учетом формул (7)–(12):

$$X_{Ci} = \begin{pmatrix} X_C \\ u_{CI} \end{pmatrix}, \quad A_{Ci} = \begin{pmatrix} A_C & B_C \\ -\lambda_{CI}D_g & 0 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$B_{C\pi i} = \begin{pmatrix} 0 \\ \lambda_{CI} \end{pmatrix}, B_{Cqi} = \begin{pmatrix} B_{Cq} \\ 0 \end{pmatrix}, B_{Cui} = \begin{pmatrix} B_{Cu} \\ 0 \end{pmatrix}, C_{Cqi} = \begin{pmatrix} C_{Cq} & 0 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где $x = \lambda_{CI}$ – переменный параметр, $n = 15$.

Модель САУ производительностью с дифференциальным (Д) регулятором определим по уравнениям (7)–(12):

$$X_{Cd} = \begin{pmatrix} X_C \\ v_{CD} \end{pmatrix}, A_{Cd} = \begin{pmatrix} A_C - B_C K_{CD} D_g & B_C \\ \lambda_{CD} K_{CD} D_g & -\lambda_{CD} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$B_{Cpd} = \begin{pmatrix} B_C K_{CD} \\ -\lambda_{CD} K_{CD} \end{pmatrix}, B_{Cqd} = \begin{pmatrix} B_{Cq} \\ 0 \end{pmatrix}, B_{Cud} = \begin{pmatrix} B_{Cu} \\ 0 \end{pmatrix}, C_{Cqd} = \begin{pmatrix} C_{Cq} & 0 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

где $x = \lambda_{CD}$, $n = 15$. Математические модели (12)–(8) содержат один переменный параметр регуляторов.

САУ с ПИ регулятором (7)–(12):

$$X_{Cpi} = \begin{pmatrix} X_C \\ u_{CI} \end{pmatrix}, A_{Cpi} = \begin{pmatrix} A_C - B_C K_{CP} D_g & B_C \\ -\lambda_{CI} D_g & 0 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

$$B_{C\pi pi} = \begin{pmatrix} B_C K_{CP} \\ \lambda_{CI} \end{pmatrix}, B_{Cqpi} = \begin{pmatrix} B_{Cq} \\ 0 \end{pmatrix}, B_{Cup i} = \begin{pmatrix} B_{Cu} \\ 0 \end{pmatrix}, C_{Cqpi} = \begin{pmatrix} C_{Cq} & 0 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

где $x = (K_{CP} \quad \lambda_{CI})$ – вектор переменных параметров, $n = 15$.

Математическая модель САУ с ПД регулятором (7)–(12):

$$X_{Cpd} = \begin{pmatrix} X_C \\ v_{CD} \end{pmatrix}, A_{Cpd} = \begin{pmatrix} A_C - B_C (K_{CP} + K_{CD}) D_g & B_C \\ \lambda_{CD} K_{CD} D_g & -\lambda_{CD} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

$$B_{C\pi pd} = \begin{pmatrix} B_C (K_{CP} + K_{CD}) \\ -\lambda_{CD} K_{CD} \end{pmatrix}, B_{Cqpd} = \begin{pmatrix} B_{Cq} \\ 0 \end{pmatrix}, B_{Cup d} = \begin{pmatrix} B_{Cu} \\ 0 \end{pmatrix}, C_{Cqpd} = \begin{pmatrix} C_{Cq} & 0 \end{pmatrix}, \quad (22)$$

где $x = (K_{CP} \quad \lambda_{CD})$, $n = 15$.

Модель САУ с ИД регулятором производительности (7)–(12):

$$X_{Cid} = \begin{pmatrix} X_C \\ u_{CI} \\ v_{CD} \end{pmatrix}, A_{Cid} = \begin{pmatrix} A_C - B_C K_{CD} D_g & B_C & B_C \\ -\lambda_{CI} D_g & 0 & 0 \\ \lambda_{CD} K_{CD} D_g & 0 & -\lambda_{CD} \end{pmatrix}, \quad (23)$$

$$B_{Cpid} = \begin{pmatrix} B_C K_{CD} \\ \lambda_{CI} \\ -\lambda_{CD} K_{CD} \end{pmatrix}, \quad B_{Cqid} = \begin{pmatrix} B_{Cq} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Cuid} = \begin{pmatrix} B_{Cu} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_{Cqid} = \begin{pmatrix} C_{Cq} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

где $x = (\lambda_{CI} \quad \lambda_{CD})$, $n = 16$. Математические модели (19)–(24) содержат по два переменных параметра регуляторов.

Модель системы управления с ПИД регулятором:

$$X_{Cpid} = \begin{pmatrix} X_C \\ u_{CI} \\ v_{CD} \end{pmatrix}, \quad A_{Cpid} = \begin{pmatrix} A_C - B_C(K_P + K_D)D_g & B_C & B_C \\ -\lambda_{CI}D_g & 0 & 0 \\ \lambda_{CD}K_{CD}D_g & 0 & -\lambda_{CD} \end{pmatrix},$$

$$B_{Cupid} = \begin{pmatrix} B_C(K_{CP} + K_{CD}) \\ \lambda_{CI} \\ -\lambda_{CD}K_{CD} \end{pmatrix}, \quad B_{Cqid} = \begin{pmatrix} B_{Cq} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Cupid} = \begin{pmatrix} B_{Cu} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_{Cupid} = \begin{pmatrix} C_{Cq} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T,$$

где $x = (K_{CP} \quad \lambda_{CI} \quad \lambda_{CD})$, $n = 16$. Эта модель содержит три переменных параметра регулятора. Таким образом, получены модели САУ с различными переменными параметрами регуляторов, что позволит выполнить их синтез.

Выводы. Приведены допущения для математического моделирования систем управления парогенератором ПГВ-1000. На основании модели системы автоматического управления уровнем воды и разработанной структурной схемы системы управления производительностью парогенератора получены ее линейные, автономные, детерминированные математические модели в пространстве состояний с сосредоточенными параметрами в относительных переменных. Эти модели с различными регуляторами предназначены для параметрического синтеза регуляторов систем автоматического управления производительностью парогенератора.

Список литературы: 1. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИздАТ. – 2002. – 480 с. 2. Демченко В. А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. – Одесса: Астропринт. – 2001. – 305 с. 3. Демченко В. А., Тодорцев Ю. К., Ложечников В. Ф. Математическая модель участка питания парогенератора ПГВ-1000 // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 73. – С. 133-138. 4. Северин В. П., Никулина Е. Н. Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – № 19. – С. 145-150. 5. Северин В. П. Математическое моделирование и оптимизация показателей качества систем автоматического регулирования реакторной установки // Ядерная и радиационная безопасность. – 2007. – Том 10. Вып. 2. – С. 66-77. 6. Никулина Е. Н. Математическое моделирование систем автоматического регулирования тепловой мощности реактора // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – № 54. – С. 136-141.

Статью представил д.т.н., профессор НТУ «ХПИ» Северин В.П.

Поступила в редакцию 11.05.2010