

В. П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
Н. Ю. СЕВЕРИНА, ассистент НТУ «ХПИ»;
М. Н. ВИТЯЗЬ, студент НТУ «ХПИ»

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000

У статті розглянуто покроковий підхід багатокритеріального синтезу систем автоматичного управління потужністю ядерного реактора за прямими показниками якості. Представлена структурна схема лінійної системи автоматичного управління нейтронною потужністю реактора. Побудована математична модель ПІ регулятора. Проведено багатокритеріальний синтез систем управління і виконано аналіз отриманих результатів.

В статье рассмотрен пошаговый подход многокритериального синтеза систем автоматического управления мощностью ядерного реактора по прямым показателям качества. Представлена структурная схема линейной системы автоматического управления нейтронной мощностью реактора. Построена математическая модель ПИ регулятора. Проведен многокритериальный синтез систем управления и выполнен анализ полученных результатов.

This article describes the step-by-step approach of automatic control systems multicriterion synthesis of reactor capability by direct quality indexes. The block diagram of automatic line control of neutron reactor power is carried out. The mathematical model of the proportional-integral controller is constructed. The multicriterion synthesis of control system has been carried out and the analysis of findings has been performed.

Введение. Основной задачей автоматического управления ядерным реактором ВВЭР-1000 атомной электростанции (АЭС) является управление нейтронной мощностью [1, 2]. Создание современных сложных систем автоматического управления (САУ) приводит к проблеме оптимизации их показателей качества, которая характеризуется большим количеством конструктивных и обобщённых параметров моделей систем управления и необходимостью учёта многих ограничений, накладываемых на эти параметры и на критерии качества систем. Современные САУ мощностью (САУМ) ядерного реактора должны удовлетворять многочисленным требованиям, среди которых требования надёжности, устойчивости, быстродействия, качества процессов и многие другие. Эти требования должны учитываться при проектировании моделей САУМ в виде ограничений параметров этих моделей. Множество ограничений моделей систем управления имеет иерархическую структуру, которую целесообразно учитывать при многокритериальном синтезе систем.

Цель статьи состоит в рассмотрении методов многокритериального синтеза систем автоматического управления нейтронной мощностью ядерного реактора ВВЭР-1000 по прямым показателям качества (ППК).

Обосновывается пошаговый подход синтеза САУ. На основании модели реактора разрабатываются модели САУМ ядерного реактора с различными типами регуляторов. Решаются задачи синтеза регуляторов для САУМ ядерного реактора, проводится анализ эффективности регуляторов.

Обоснование пошагового метода. Для решения задач синтеза САУМ применяется пошаговый подход, основанный на иерархии критериев с уровнями притязаний и переходе к оптимизации векторной целевой функций (ВЦФ) [2]. Основная идея пошагового принципа заключается в том, чтобы упорядочить все ограничения модели САУ в процессе ее проектирования и во время поиска оптимального решения последовательно их выполнять, пока не встретится нарушенное ограничение (активное), которое и будет задавать направление поиска. Это позволит последовательно увеличивать общее количество выполненных ограничений, приближаясь к допустимой области.

Для реализации пошагового подхода формируется двумерная ВЦФ:

$$F(x) = \left\{ (k(x), g_{k+1}(x)) \mid x \in H_k, k = \overline{0, M} \right\}, \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_p) \in R^p$ – вектор варьируемых параметров;

$k(x)$ или $F_1(x)$ – функция уровня, равная числу последовательно выполненных ограничений;

$g_{k+1}(x)$ или $F_2(x)$ – функция штрафа, которая при $k = \overline{0, M-1}$ является функцией ограничения и при его нарушении становится штрафной функцией;

M – количество ограничений задачи синтеза;

$g_{M+1}(x)$ – минимизируемая целевая функция.

В формуле (1) также используются области уровней ограничений

$$H_0 = R^p \setminus D_1, \quad H_k = D_k \setminus D_{k+1}, \quad k = \overline{1, M-1}, \quad H_M = D_M, \quad (2)$$

где $D_1 = G_1$, $D_k = D_{k-1} \cap G_k$, $k = \overline{2, M}$ – квазидопустимые области;

$G_k = \{ x \mid g_k(x) \leq 0 \}$, $k = \overline{1, M}$ – области ограничений.

В области уровня (2) с номером k выполняется ровно k ограничений, а следующее ограничение с номером $k+1$ нарушается. Степень нарушения этого ограничения отображает его функция $F_2(x)$. Таким образом, любую точку поиска $x \in R^p$ характеризуют две величины: количество выполненных ограничений $F_1(x) = k(x)$, принимающее значения от 0 до M , и значение штрафной функции активного ограничения $F_2(x) = g_{k+1}(x)$. Чтобы из недопустимой точки перейти в допустимую, необходимо максимизировать функцию уровня $F_1(x)$. Она является кусочно-постоянной функцией любой точки x и по ней самой затруднительно установить направление ее возрастания.

Поэтому для максимизации функции уровня применяется вторая функция $F_2(x)$, характеризующая величину нарушения активного ограничения. Минимизация функции штрафа приведет к выполнению активного ограничения, а значит к возрастанию количества выполненных ограничений, то есть к росту функции уровня $F_1(x)$.

Итак, реализация пошагового метода заключается в следующей стратегии: на каждом шаге метода минимизируется функция штрафа $F_2(x)$ при неубывании функции уровня $F_1(x)$. Как только активное ограничение удовлетворяется, оно становится пассивным, $F_1(x)$ возрастает и начинается следующий шаг метода. Переход из любой недопустимой точки пространства варьируемых параметров в допустимую точку выполняется не более чем за M шагов. Реализация стратегии оптимизации ВЦФ осуществляется с учетом приоритета ее проекций в едином вычислительном процессе. Первая проекция, с большим приоритетом, максимизируется, а вторая – минимизируется. При сравнении двух значений ВЦФ (1) $U = (U_1, U_2)$ и $V = (V_1, V_2)$ применяется бинарная операция «лучше» $<$:

$$U < V = \begin{cases} 1, & U_1 > V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 < V_2, \\ 0, & U_1 < V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 \geq V_2. \end{cases} \quad (3)$$

Для реализации предложенного пошагового подхода можно модифицировать любой численный метод безусловной минимизации функций многих переменных. Пошаговый подход можно применять для любых сложных технических систем, задача проектирования которых может быть сформулирована как задача нелинейной параметрической оптимизации.

Моделирование системы автоматического управления мощностью ядерного реактора. Структурная схема линейной модели САУМ ядерного реактора, основанная на линейной точечной модели ядерного реактора с шестью группами запаздывающих нейтронов, представлена на рис. 1 [2].

На вход САУМ подается уставка мощности v_s , выходом является нейтронная мощность v . Текущее значение нейтронной мощности измеряется ионизационной камерой и отрицательной обратной связью подается на сумматор, формируя сигнал ошибки $\varepsilon = v_s - v$. Ошибка поступает на вход регулятора мощности (РМ) с передаточной функцией (ПФ) $W_C(s)$, который по заданному закону управления формирует управляющее воздействие u . Управляющее воздействие подается на привод исполнительного механизма (ИМ) системы управления и защиты реактора. ИМ перемещает управляющий стержень и изменяет составляющую реактивности ρ_d , которая передается в

модель ядерного реактора и изменяет вектор его состояния X_R , изменяя нейтронную мощность реактора.

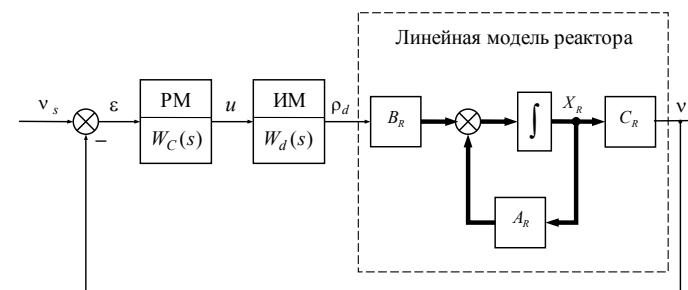


Рис. 1 – Структурная схема линейной САУМ ядерного реактора

ИМ опишем инерционным звеном первого порядка с передаточной функцией и соответствующим дифференциальным уравнением (ДУ):

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1}, \quad \frac{d\rho_d}{dt} = a_{dd}\rho_d + b_{du}u, \quad a_{dd} = -\frac{1}{T_d}, \quad b_{du} = \frac{K_d}{T_d},$$

где K_d и T_d – коэффициент усиления и постоянная времени привода.

Рассмотрим пропорциональный (П), интегральный (И) и дифференциальный (Д) регуляторы и соответствующие им законы управления, которые реализуются ПФ и ДУ П, И и Д регуляторов:

$$u_P = K_P \varepsilon, \quad u_I = \frac{1}{T_I} \int \varepsilon dt, \quad u_D = \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt},$$

$$W_P = K_P, \quad W_I(s) = \frac{1}{T_I s}, \quad W_D(s) = \frac{K_D T_D s}{T_D s + 1},$$

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

где u_P, u_I, u_D – законы управления регуляторов.

$K_P, T_I, T_D, \lambda_I = 1/T_I, \lambda_D = 1/T_D$ – параметры регуляторов;

$K_D > 1$ и обычно $K_D = 10$, а $\tau_D = K_D T_D$ – параметр закона управления, близкого к дифференциальному.

По моделям П, И и Д регуляторов построим модели ПИ, ПД, ИД и ПИД регуляторов. Для оптимизации параметров K_P, λ_I и λ_D сформируем из них

вектор варьируемых параметров (ВВП) $x \in R^p$. Для П и И регуляторов $p = 1$, для ПИ, ПД и ИД регуляторов $p = 2$, для ПИД – $p = 3$.

На примере модели ПИ регулятора, уравнения ИМ и линейной модели ядерного реактора [2] определим линейную математическую модель САУМ реактора в пространстве состояний (см. рис. 1):

$$\frac{dX}{dt} = AX + Bv_s, \quad v = CX, \quad (4)$$

$$X = \begin{pmatrix} X_R \\ \rho_d \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} A_R & B_R & 0 \\ -b_{du}K_P C_R & a_{dd} & b_{du} \\ -\lambda_I C_R & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ b_{du}K_P \\ \lambda_I \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} C_R \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T. \quad (5)$$

Порядок полученной модели САУМ с ПИ регулятором $n = 12$.

Проведя анализ статики САУМ с различными регуляторами [2] можно сделать вывод, что Д регулятор неприменим в САУМ, так как заданное значение мощности v_s не достигается. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать модели САУМ с П, И, ПИ, ПД, ИД и ПИД регуляторами.

Многокритериальный синтез регуляторов. На основании матрицы $A = A(x)$ модели (4), (5) методом Фаддеева [3] определим коэффициенты характеристического многочлена $\alpha_i(x) > 0$, $i = \overline{0, n}$ и элементы первого столбца таблицы Рауса $\rho_k(x)$, $k = \overline{2, n-1}$.

Для оптимизации ППК САУМ реактора формируется ВЦФ вида (1):

$$F(x) = \begin{cases} (0; S(x)), & x \in H_0, \\ (1; P(x)), & x \in H_1, \\ (k; -\rho_k(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{2, n-1}, \\ (n; \sigma(x)), & x \in H_n, \\ (n+1; \zeta(x)), & x \in H_{n+1}, \\ (n+2; \tau(x)), & x \in H_{n+2}. \end{cases} \quad (6)$$

где $S(x) = \sum_{i=1}^p [\max\{0, a_i - x_i\} + \max\{0, x_i - b_i\}]$ и $P(x) = \sum_{i=0}^n \max\{0, -\alpha_i(x)\}$ – штрафные функции нарушения двусторонних ограничений ВВП $a_i \leq x_i \leq b_i$, $i = \overline{1, p}$ и учёта необходимых условий устойчивости соответственно;

$\sigma(x)$, $\zeta(x)$ и $\tau(x) = t_c(x)/T_f$ – прямые показатели качества – перерегулирование, размах колебаний и относительное значение времени

регулирования $t_c(x)$ соответственно, вычисленные путем решения системы дифференциальных уравнений (4) при $t \in [0; T_f]$.

Эта функция учитывает двусторонние ограничения варьируемых параметров, необходимые и достаточные условия устойчивости САУМ и требования к её ППК. ВЦФ (6) вычислим, объединив вычисление векторной штрафной функции неустойчивости и пошаговой векторной функции прямых критериев [2]. Для оптимизации параметров регуляторов САУМ функцию (6) будем оптимизировать с использованием операции сравнения (3) векторными методами адаптации шага при $p = 1$ или Нелдера-Мида при $p > 1$, с допустимой погрешностью по параметрам $\varepsilon = 10^{-10}$.

В табл. 1 для линейных моделей САУМ с различными типами РМ представлены оптимальные значения параметров РМ K_p^* , λ_I^* , λ_D^* , а также соответствующие им значения проекций функции (6) F_1^* , F_2^* и времени регулирования t_c^* . Поскольку $F_1^* = n + 2$, то все ограничения задач оптимизации ППК выполнены в оптимальных точках, которым отвечают монотонные переходные процессы с оптимальными значениями перерегулирования $\sigma^* = 0$ и показателя колебательности $\zeta^* = 0$.

На рис. 2 представлены переходные процессы в САУМ с ПИ регулятором при разных значениях верхнего ограничения пропорциональной составляющей K_p .

Табл. 1 – Результаты оптимизации РМ

РМ	K_p^*	λ_I^*	λ_D^*	F_1^*	F_2^*	t_c^* , с
Р	45,8	—	—	13	0,231	23,19
И	—	0,082	—	14	0,343	343,25
ПИ	100	2,594	—	14	0,137	13,78
ПД	100	—	0,043	14	0,114	11,42
ИД	—	0,082	100,00	15	0,343	343,33
ПИД	100	2,594	99,852	15	0,137	13,78

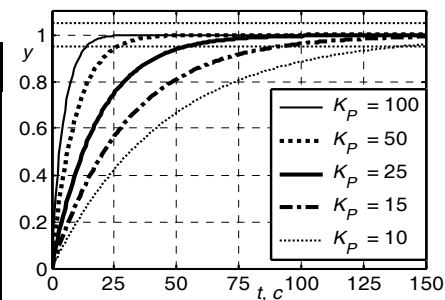


Рис. 2 – Оптимизация ПИ регулятора

На рис. 3 и 4 представлен процесс оптимизации ППК для САУМ с ПИ регулятором векторным методом Нелдера-Мида (МНМ) с начальным шагом $\delta = 1$. Здесь на графиках проекций $F_1(x)$ и $F_2(x)$ ВЦФ (6) и ВВП из $x_1 = K_p$ и $x_2 = \lambda_I$ показаны лучшие точки поиска. Начальная точка отмечена кругом: $x^{(0)} = (5; 1)$, $F^{(0)} = (12; 0,2609)$, $\sigma^{(0)} = 0,2609$; конечная – ромбом. Показатели конечной точки приведены в табл. 1. На вычисление оптимального решения

векторный МНМ потратил 226 итераций с 456 вычислениями функции (6), причем получено 164 лучших точек поиска. В пределах траектории лучших точек функция уровня $F_1(x)$ на рис. 1 принимает значения 12 и 14, которым соответствуют процессы с перерегулированием и монотонные процессы. График функции штрафа $F_2(x)$ на рис. 2 состоит из графиков функций перерегулирования $\sigma(x)$ и относительного времени регулирования $\tau(x)$. При уменьшении значения K_p в окрестности оптимальной точки возрастает перерегулирование. При уменьшении λ_I вблизи оптимальной точки увеличивается время регулирования монотонного переходного процесса, а при увеличении – увеличивается перерегулирование.

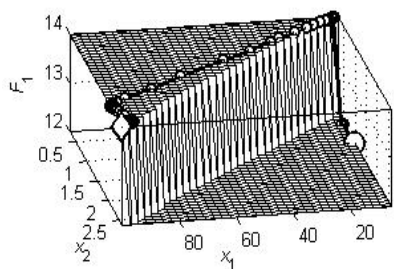


Рис. 3 – Функция уровня

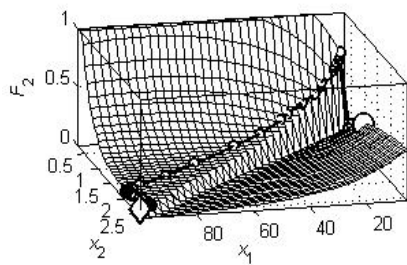


Рис. 4 – Функция штрафа

Выводы. Данная статья посвящена математическому моделированию и оптимизации показателей качества САУМ ядерного реактора ВВЭР-1000. Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Рассмотрен пошаговый подход многокритериального синтеза САУМ по ППК, позволяющий в едином вычислительном процессе выполнить ограничения ВВП, перейти в область устойчивости и оптимизировать ППК.

2. Представлена структурная схема линейной САУМ реактора. Построена математическая модель ПИ регулятора САУ ядерного реактора для решения задач оптимизации ППК.

3. Рассмотрен пример многокритериального синтеза САУМ ядерного реактора. Проведен анализ полученных результатов оптимизации прямых критериев качества для систем управления мощностью ядерного реактора.

Список литературы: 1. Иванов В. А. Регулирование энергоблоков / В. А. Иванов. – Л. : Машиностроение, 1982. – 311 с. 2. Витязь М. Н. Многокритериальный синтез регуляторов системы управления ядерным реактором ВВЭР-1000 в пакете MATLAB / М. Н. Витязь, В. П. Северин // Труды V Международной научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – Харьков : ФЛП Шейнина Е. В. – 2011. – С. 254–282. 3. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц, 4-е изд. / Ф. Р. Гантмахер. – М. : Наука, 1988. – 552 с.