

Синтез оптимальных систем автоматического управления энергоблока АЭС в нормальных режимах эксплуатации

Для параметрического синтеза систем автоматического управления и изучения различных законов управления энергоблоком атомной электростанции при нормальных режимах эксплуатации построены математические модели систем управления ядерным реактором, парогенератором, паровой турбиной, энергоблоком. Выполнен синтез оптимальных систем автоматического управления с линейными и нечеткими регуляторами генетическими алгоритмами для ядерного реактора, парогенератора, паровой турбины и всего энергоблока, что позволяет сравнить нечеткие регуляторы и традиционные ПИД-регуляторы.

Ключевые слова: энергоблок атомной электростанции, системы автоматического управления, синтез систем управления, генетические алгоритмы.

В. П. Северин, О. М. Нікуліна

Синтез оптимальных систем автоматического управления энергоблока АЭС в нормальных режимах эксплуатации

Для параметричного синтезу систем автоматичного керування й вивчення різних законів керування енергоблоком атомної електростанції за нормальних режимів експлуатації побудовано математичні моделі систем керування ядерним реактором, парогенератором, паровою турбіною, енергоблоком. Виконано синтез оптимальних систем автоматичного керування з лінійними і нечіткими регуляторами генетичними алгоритмами для ядерного реактора, парогенератора, парової турбіни й усього енергоблока, що дає змогу порівняти нечіткі регулятори та традиційні ПІД-регулятори.

Ключові слова: енергоблок атомної електростанції, системи автоматичного керування, синтез систем керування, генетичні алгоритми.

© В. П. Северин, Е. Н. Никулина, 2013

Энергоблоки атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000, в создании которых участвовали многие организации, специалисты, инженеры, ученые [1, 2], — одни из самых мощных в мире. Они эксплуатируются в течение нескольких десятилетий в Украине, России, Болгарии и Чехии, их пуск планируется в Иране, Индии и Китае.

В настоящее время запросы практики требуют повышения качества управления энергоблоками, что обусловлено задачами безопасности, энергосбережения и энергоэффективности, перспективой интеграции энергосистемы Украины в Европейскую энергосистему. Повышение качества управления может быть достигнуто как улучшением существующих алгоритмов управления, так и применением принципиально новых интеллектуальных алгоритмов.

В системах управления энергоблоков ВВЭР-1000 в основном используются традиционные ПИ- и ПИД-регуляторы, обеспечивающие безопасность и надежность работы энергоблока [1, 2]. В то же время требования к повышению качества управления требуют развития законов управления, что может быть достигнуто применением интеллектуальных, в том числе нечетких, регуляторов [3, 4]. Синтез нечетких регуляторов связан с многоэкстремальными целевыми функциями, для оптимизации которых применяют методы глобального поиска — генетические алгоритмы [3—11].

Цель статьи — представить результаты многокритериального параметрического синтеза для систем автоматического управления энергоблока АЭС с традиционными ПИД-регуляторами и нечеткими регуляторами на основе применения генетических алгоритмов для оптимизации показателей качества систем управления.

Рассматриваются задачи синтеза параметров систем автоматического управления (САУ). Приводятся результаты оптимизации параметров регуляторов локальных САУ ядерным реактором, парогенератором и паровой турбиной. Дается модель энергоблока как объекта управления. Анализируются результаты синтеза САУ энергоблоков в основных нормальных режимах эксплуатации. По результатам синтеза сравнивается эффективность традиционных ПИД-регуляторов и интеллектуальных нечетких регуляторов.

Постановка задач синтеза. Технологическая схема энергоблока ВВЭР-1000 включает ядерный реактор (ЯР), парогенератор (ПГ), паровую турбину (ПТ), электрический генератор (ЭГ) и многочисленное вспомогательное оборудование [9]. Для исследования выделены три локальные системы автоматического управления: мощностью ядерного реактора ВВЭР-1000 (САУМ ЯР), уровнем воды в парогенераторе ПГВ-1000 (САУУ ПГ), частотой вращения ротора паровой турбины К-1000–60/1500 (САУЧ ПТ), а также системы автоматического поддержания нейтронной мощности реактора и давления пара перед турбиной, которые обеспечивают основные режимы нормальной эксплуатации энергоблока «Н» и «Т».

Для оценки качества САУ применяются прямые показатели: перерегулирование σ , показатели колебательности — размах колебаний ζ и показатель затухания колебаний λ , время регулирования t_c и его относительное значение $\tau = t_c/T_f$, где T_f — время наблюдения переходного процесса [6]. Эти прямые показатели качества (ППК) в задаче синтеза зависят от вектора переменных параметров $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$, который принадлежит допустимой области D , определяемой двусторонними ограничениями параметров $a_i \leq x_i \leq b_i$, $i = \overline{1, p}$ и условиями устойчивости САУ.

Приведем постановку трех задач параметрического синтеза САУ энергоблока.

1. Задача максимального быстрогодействия САУ:

$$\min \tau(x), \quad x \in D, \quad \sigma(x) \leq \sigma_m, \quad \zeta(x) \leq \zeta_m, \quad \lambda(x) \leq \lambda_m, \quad (1)$$

где σ_m , ζ_m и λ_m — заданные предельно допустимые значения ППК.

2. Задача обеспечения желаемого времени регулирования t_e монотонного переходного процесса:

$$\min [\tau(x) - t_e/T_f]^2, \quad x \in D, \quad \sigma(x) = 0, \quad \zeta(x) = 0. \quad (2)$$

3. Задача минимизации улучшенной интегральной квадратичной оценки (ИКО):

$$\min I(x), \quad x \in D, \quad I(x) = \int_0^{\infty} [z(x,t) + \tau_1 dz(x,t)/dt]^2, \quad (3)$$

где z — отклонение управляемой переменной от ее установившегося значения; $\tau_1 = t_e/\tau_e$, $\tau_e = 2,995729$ с.

Синтез системы управления реактором. Нелинейная и линейная модели ядерного реактора ВВЭР-1000 как объекта управления имеют вид [9]

$$dX_R/dt = f_R(X_R, u),$$

$$dX_R/dt = A_R X_R + B_R u, \quad v = C_R X_R, \quad (4)$$

где u — входное управляющее воздействие регулятора мощности (РМ); v — выходная переменная нейтронной мощности реактора. Порядок моделей $n = 7$.

Определены модели САУМ с ПИ-регулятором и выходной переменной мощности v :

$$dX_N/dt = f_N(X_N, v_s), \quad (5)$$

$$dX_N/dt = A_N X_N + B_N v_s, \quad v = C_N X_N, \quad (6)$$

$$f_N(X_N, v_s) = \begin{pmatrix} f_R(X_R, K_P(v_s - v) + u_I) \\ \lambda_I(v_s - v) \end{pmatrix},$$

$$X_N = \begin{pmatrix} X_R \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A_N = \begin{pmatrix} A_R - K_P B_R C_R & B_R \\ -\lambda_I C_R & 0 \end{pmatrix},$$

$$B_N = \begin{pmatrix} K_P B_R \\ \lambda_I \end{pmatrix}, \quad C_N = (C_R \quad 0),$$

где v_s — входное воздействие, соответствующее скачку уставки мощности; u_I — интегральная составляющая переменной управления; K_P , $\lambda_I \in [0; 100]$ — переменные параметры РМ; $n = 8$.

Построена модель САУМ с нечетким ПИ РМ [10]:

$$\frac{dX_N}{dt} = \begin{pmatrix} f_R(X_R, f_F(\xi_p, \eta_p, K_P(v_s - v))K_u + u_I) \\ \lambda_I(v_s - v) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где вектор $x = (K_P, \lambda_I, K_u, \xi_p, \eta_p)$ переменных параметров нечеткого ПИ-регулятора включает параметр $\lambda_I \in [0; 100]$ линейного И-регулятора, параметры нечеткого П-регулятора — входной и выходной коэффициенты усиления K_P и $K_u \in [0; 100]$, параметры функций принадлежности $\xi_p, \eta_p \in [0; 1]$.

Поскольку согласно требованиям безопасности ядерного реактора ВВЭР-1000 время регулирования САУМ задают в пределах от 90 с до 120 с [2], в задачах синтеза (2) и (3) задано значение желаемого времени регулирования $t_e = 100$ с. В задаче (2) ППК вычисляются матричными методами интегрирования на интервале от 0 до $T_f = 200$ с при количестве шагов интегрирования $L = 100$. Для вычисления времени регулирования задается параметр зоны установившегося значения управляемой переменной $\delta_z = 0,05$.

Для решения задач синтеза САУМ (2) и (3) сформированы векторные целевые функции $F(x)$ с двумя проекциями: функцией уровня $F_1(x)$, представляющей число выполненных ограничений, и функцией штрафа $F_2(x)$, вычисляющей штраф нарушенного ограничения или скалярную целевую функцию при выполнении всех ограничений [6]. Для оптимизации векторных целевых функций модифицирован бинарный генетический алгоритм (ГА) [10].

Результаты решения задач (2) и (3) модифицированными ГА приведены в табл. 1, где для линейной (L), нелинейной (N) и нечеткой (F) моделей (М) САУМ (5)–(7), критериев качества (КК) ИКО и ППК представлены оптимальные значения параметров линейного и нечеткого ПИ-регуляторов. Во всех случаях получено время регулирования САУМ $t_c = 100$ с. На рис. 1 представлены оптимальные переходные процессы изменения мощности реактора, соответствующие табл. 1. Самый медленный процесс, который отвечает минимуму ИКО, предпочтителен для безопасности реактора [2]. Процесс синтеза параметров линейного ПИ-регулятора по улучшенной ИКО показан на рис. 2 и 3. Начальная точка отмечена кругом, конечная — ромбом, лучшие точки поиска соединены.

Таблица 1. Синтез регуляторов мощности

М	КК	K_P^*	λ_I^*	K_u^*	ξ_p^*	η_p^*
L	ИКО	6,635	0,152	—	—	—
L	ППК	10,47	0,186	—	—	—
N	ППК	10,51	0,188	—	—	—
F	ППК	0,698	0,263	27,5	0,178	0,876

Синтез управления парогенератором. Модель парогенератора ПГВ-1000 как объекта управления представим в виде [8–10]

$$dX_G/dt = A_G X_G + B_{Gw} u + B_{Gs} u_s, \quad \xi_c = C_G X_G,$$

где u — входное управляющее воздействие регулятора уровня (РУ); u_s — возмущающее воздействие на клапан регулирования турбины; ξ_c — выходная переменная отклонения уровня воды; $n = 9$.

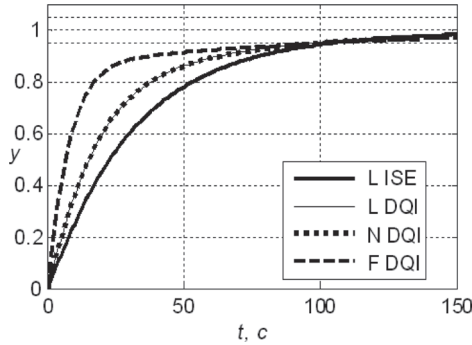


Рис. 1. Изменение мощности

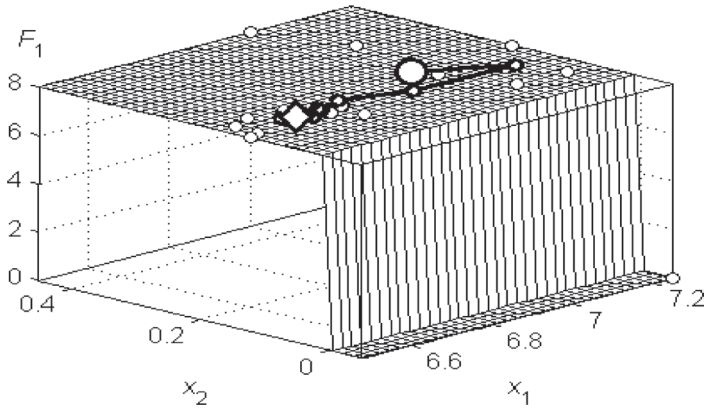


Рис. 2. Синтез РМ на $F_1(x)$

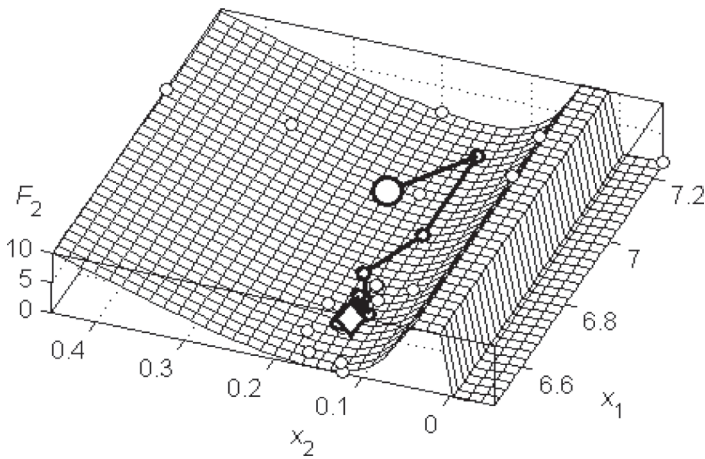


Рис. 3. Синтез РМ на $F_2(x)$

Определена модель САУУ с ПИ-регулятором, $n=10$:

$$dX_L/dt = A_L X_L + B_L u_s, \quad \xi_c = C_L X_L, \quad C_L = (C_G \quad 0),$$

$$X_L = \begin{pmatrix} X_G \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A_L = \begin{pmatrix} A_G - B_{Gw} K_P D_G & B_{Gw} \\ -\lambda_I D_G & 0 \end{pmatrix}, \quad B_L = \begin{pmatrix} B_{Gs} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Эта модель САУУ включает 34 параметра; значения многих параметров определены с большой абсолютной погрешностью. Параметры модели (8) идентифицированы

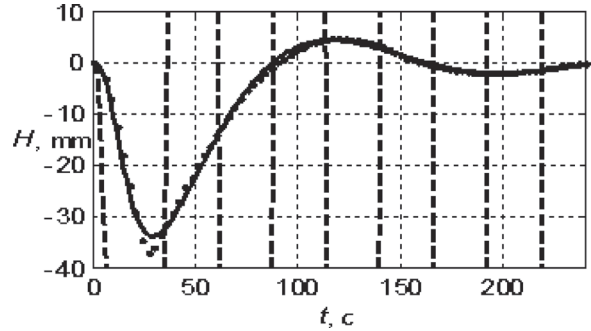


Рис. 4. Отклонение уровня при отключенном регуляторе

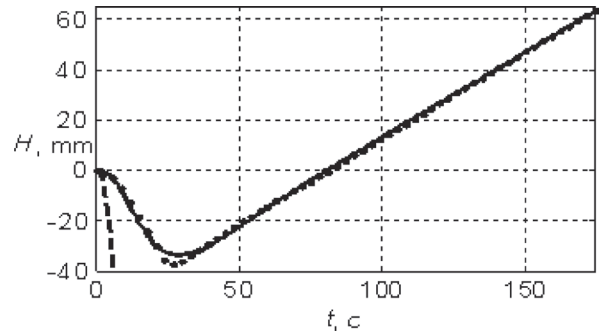


Рис. 5. Отклонение уровня при включенном регуляторе

по 140 экспериментальным точкам модифицированным ГА путем оптимизации векторной целевой функции, включающей двусторонние ограничения параметров, условия устойчивости САУУ и требование минимизации функции невязки как суммы квадратов отклонений точек теоретических переходных процессов от экспериментальных процессов. Это позволило обеспечить совпадение процессов в построенной модели с экспериментальными данными при отключенном и включенном регуляторе уровня (рис. 4 и 5).

Получена модель САУУ с нечетким регулятором:

$$\frac{dX_L}{dt} = \begin{pmatrix} A_G X_G + B_{Gw} (f_F(\xi_p, \eta_p, K_P(v_s - v)) K_u + u_I) + B_{Gs} u_s \\ \lambda_I (\xi_{cs} - D_G X_G) \end{pmatrix}$$

Для задачи синтеза САУУ (1) заданы значения параметров: $\sigma_m = 1$, $\zeta_m = 0$, $\lambda_m = 0$, $\delta_z = 0,05$. Модифицированным ГА выполнена оптимизация параметров РУ. В табл. 2 для различных РУ приведены оптимальные значения параметров регуляторов K_p^* , λ_I^* , K_u^* , ξ_p^* , η_p^* и показателей качества σ^* , t_c^* .

Таблица 2. Оптимизация параметров РУ

РУ	K_p^*	λ_I^*	K_u^*	ξ_p^*	η_p^*	σ^*	t_c^*, c
ПИ	2,49	0,146	—	—	—	0,903	98,4
НПИ	0,40	0,144	1,9	0,26	0,4	0,905	97,6

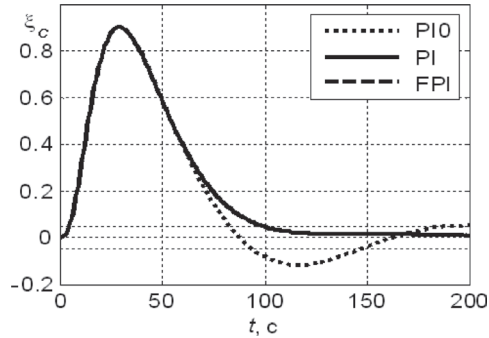


Рис. 6. Изменение уровня

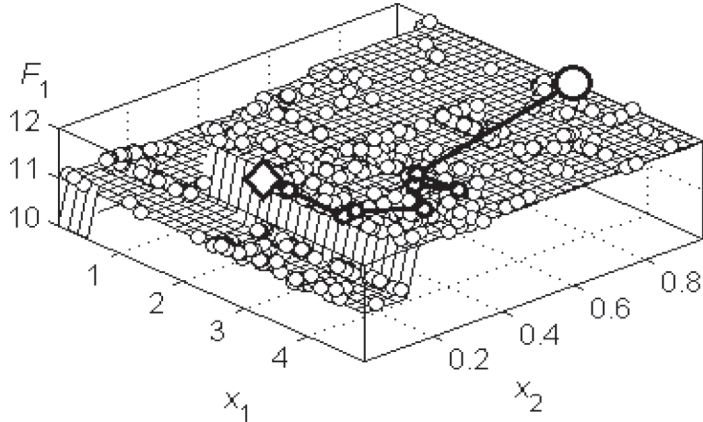


Рис. 7. Синтез РУ на $F_1(x)$

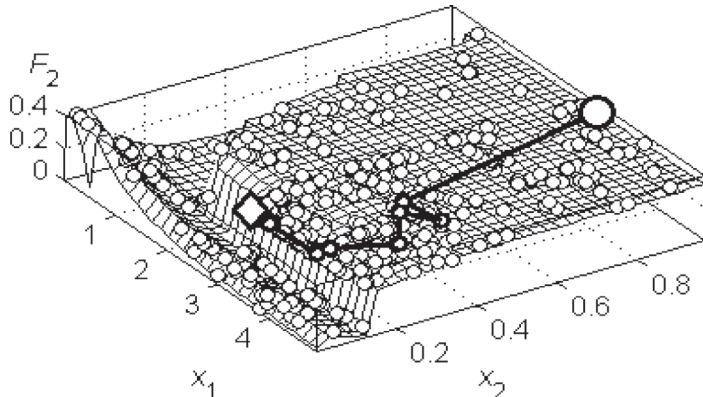


Рис. 8. Синтез РУ на $F_2(x)$

На рис. 6 представлены переходные процессы изменения уровня в оптимальных системах (PI, FPI) и переходный процесс в САУУ при идентифицированных значениях параметров ПИ-регулятора (PI0). Исходя из приведенных данных, можно сделать вывод, что нечеткий ПИ-регулятор с оптимальными значениями параметров не эффективнее оптимального традиционного линейного ПИ-регулятора.

Нечеткий ПИ-регулятор слегка уменьшает время установления процесса t_c , но при этом несколько увеличивается отклонение уровня σ^* (см. табл. 2). Процесс синтеза параметров ПИ-регулятора модифицированным бинарным генетическим алгоритмом показан на графиках проекций векторной целевой функции (рис. 7 и 8).

Синтез управления паровой турбиной. Модель паровой турбины К-1000–60/1500 как объекта управления имеет вид [11]

$$dX_T/dt = A_T X_T + B_{Tu}u + B_{Tv}v_s, \quad \phi = C_T X_T,$$

где u — входное управляющее воздействие регулятора частоты (РЧ); v_s — возмущающее воздействие; ϕ — выходная переменная частоты вращения ротора турбины; $n = 19$.

Определена модель системы управления частотой с ПИ-регулятором и выходной переменной y отклонения частоты в процентах:

$$dX_F(x,t)/dt = A_F(x)X_F(x,t) + B_F v_s, \quad (9)$$

$$y(x,t) = 100C_F X_F(x,t), \quad (10)$$

$$X_F = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A_F = \begin{pmatrix} A_T - B_{Tu}K_P C_T & B_{Tu} \\ -\lambda_I C_T & 0 \end{pmatrix}, \quad B_F = \begin{pmatrix} B_{Tv} \\ 0 \end{pmatrix},$$

где $C_F = (C_T \ 0)$, $x_1 = K_p$ и $x_2 = \lambda_I$ — переменные параметры; возмущающее воздействие $v_s = -1(t)$ соответствует переходу турбины из режима номинальной мощности в режим холостого хода; $n = 20$.

Аналогично получены модели с ПИД-регулятором и нечетким ПИ-регулятором:

$$\frac{dX_F}{dt} = \begin{pmatrix} A_T X_T + B_{Tu}(f_F(\xi_p, \eta_p, (\phi_s - \phi))K_u + u_I) + B_{Tv}v_s \\ \lambda_I(\phi_s - \phi) \end{pmatrix}.$$

Для задачи синтеза САУЧ (1) заданы значения параметров: $\sigma_m = 4$, $\zeta_m = 1$, $\delta_z = 0,1$, $T_f = 20$ с, $L = 100$.

Выполнена оптимизация параметров регуляторов частоты. В табл. 3 для трех РЧ приведены оптимальные значения параметров K_p^* , λ_I^* , λ_D^* , K_u^* , ξ_p^* , η_p^* и показателей качества процессов σ^* , ζ^* , λ^* , t_c^* .

На рис. 9 представлены переходные процессы изменения частоты вращения ротора турбины, выраженной в процентах номинального значения частоты, в оптимальных системах. Процесс синтеза параметров ПИ-регулятора показан (рис. 10 и 11) на графиках проекций векторной целевой функции. Полученные результаты позволяют

Таблица 3. Оптимальные параметры показатели регуляторов частоты

РЧ	K_p^*	λ_I^*	λ_D^*	K_u^*	ξ_p^*	η_p^*	σ^*	ζ^*	λ^*	t_c^*, c
ПИ	100,0	26,45	—	—	—	—	3,475	1,000	1,850	5,196
ПИД	98,13	33,54	1,695	—	—	—	3,360	0,904	2,038	4,200
НПИ	7,084	47,68	—	8,01	0,87	0,057	1,711	0,224	17,057	2,208

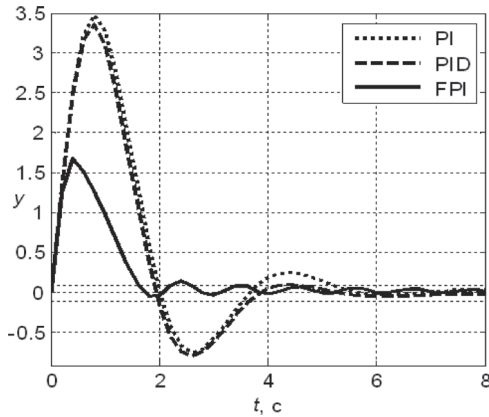


Рис. 9. Изменение частоты

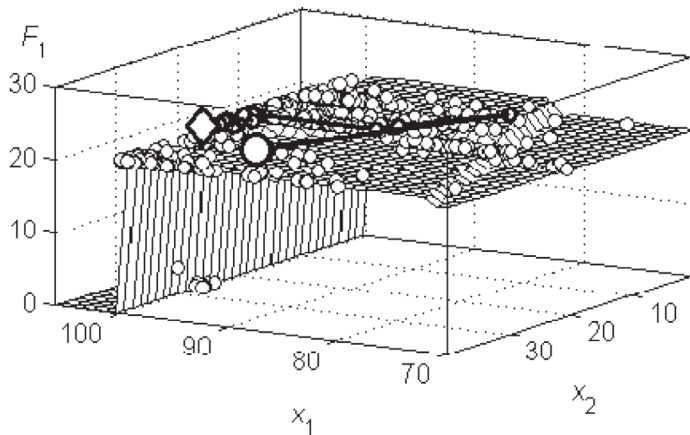


Рис. 10. Синтез РЧ на $F_1(x)$

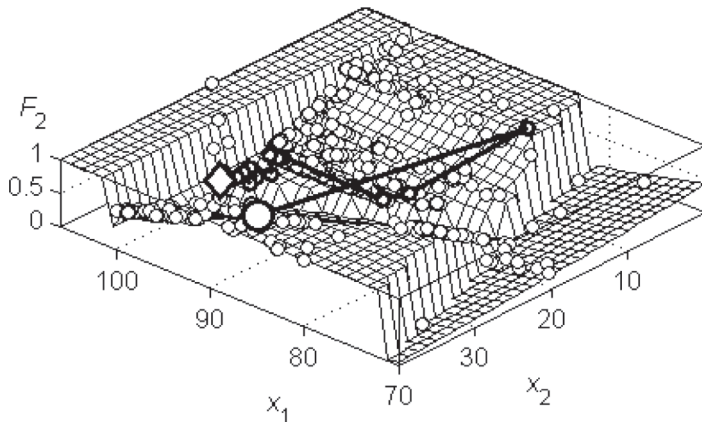


Рис. 11. Синтез РЧ на $F_2(x)$

сделать вывод, что нечеткий ПИ-регулятор с оптимальными значениями параметров обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс с наименьшим отклонением частоты.

Рассмотрим модели и результаты синтеза оптимальных систем управления энергоблоком в нормальных режимах эксплуатации.

Математическая модель энергоблока. Математическая модель энергоблока АЭС как объекта управления построена на основании развития моделей его основных элементов (4)–(10).

Модель ядерного реактора ВВЭР-1000

$$dX_R/dt = A_R X_R + B_R u + B_{RT} \theta_{Ti}, \quad (11)$$

$$v = C_R X_R, \quad \theta_r = C_{Rr} X_R \quad (12)$$

включает входные воздействия — управляющий сигнал регулятора мощности u и температуру воды во входном трубопроводе θ_{Ti} , а также выходные переменные — нейтронную мощность реактора v и среднюю температуру теплоносителя в реакторе θ_r , $n = 7$.

Модель выходного трубопровода реактора

$$d\theta_T/dt = a_{TT} \theta_T + b_{Tr} \theta_r \quad (13)$$

позволяет определить температуру воды в выходном трубопроводе θ_T .

Модель системы управления парогенератором

$$dX_L/dt = A_L X_L + B_{Lc} \xi_{cs} + B_{LT} \theta_T + B_{LD} \mu_m, \quad (14)$$

$$\xi_c = C_L X_L, \quad \theta_t = C_{Lt} X_L, \quad \pi_k = C_{Lk} X_L \quad (15)$$

включает входные воздействия — уставку уровня воды в парогенераторе ξ_{cs} , температуру воды во входном трубопроводе θ_T и положение сервомотора привода турбины μ_m , а также выходные переменные — уровень воды в парогенераторе ξ_c , температуру теплоносителя в парогенераторе θ_t и давление пара в главном паровом коллекторе π_k .

Модель соединения выходного трубопровода парогенератора, главного циркуляционного насоса и входного трубопровода реактора

$$dX_c/dt = A_c X_c + B_c \theta_t, \quad \theta_{Ti} = C_c X_c \quad (16)$$

включает входное воздействие по температуре теплоносителя в парогенераторе θ_t и выходную переменную температуры теплоносителя во входном трубопроводе реактора θ_{Ti} [10].

Перечисленные элементы образуют первый контур энергоблока, по которому циркулирует теплоноситель. Во второй контур кроме парогенератора входит паровая турбина.

Модель системы управления паровой турбиной

$$dX_F/dt = A_F X_F + B_{Fk} \pi_k + B_{Fv} v_{Es}, \quad (17)$$

$$\phi = C_F X_F, \quad \mu_m = C_{F\mu} X_F \quad (18)$$

включает входные воздействия — давление пара в главном паровом коллекторе π_k и сигнал изменения электрической мощности v_{Es} , а также выходные переменные — частоту вращения ротора турбины ϕ и положение сервомотора следящего привода для управления клапаном регулирования турбины μ_m .

Объединив модели (11)–(18), получим модель энергоблока для основных нормальных режимов эксплуатации:

$$dX_U/dt = A_U X_U + B_U u + B_{UE} v_{Es}, \quad (19)$$

$$v = C_U X_U, \quad \pi_k = C_{Uk} X_U, \quad (20)$$

$$X_U = \begin{pmatrix} X_R \\ \theta_T \\ X_L \\ X_c \\ X_F \end{pmatrix},$$

$$A_U = \begin{pmatrix} A_R & 0 & 0 & B_{RT}C_c & 0 \\ b_{Tr}C_{Rr} & a_{TT} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{LT} & A_L & 0 & B_{LD}C_{F\mu} \\ 0 & 0 & B_cC_{Lt} & A_c & 0 \\ 0 & 0 & B_{Fk}C_{Lk} & 0 & A_F \end{pmatrix},$$

$$B_U = (B_R^T \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T, \quad B_{UE} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ B_F^T)^T,$$

$$C_U = (C_R \ 0 \ 0 \ 0 \ 0), \quad C_{Uk} = (0 \ 0 \ C_{Lk} \ 0 \ 0).$$

Входными воздействиями являются управляющий сигнал регулятора нейтронной мощности u и сигнал изменения электрической мощности v_{Es} . Выходные переменные — нейтронная мощность реактора v и давление пара в главном паровом коллекторе π_k .

Применим полученную модель энергоблока для построения его систем управления в нормальных режимах эксплуатации «Н» и «Т» [2, 10].

Синтез управления режимом «Н». Модель системы управления энергоблоком в режиме «Н», которой соответствует система автоматического поддержания нейтронной мощности реактора, построена по модели энергоблока (19), (20) с ПИ-регулятором мощности:

$$dX_Q/dt = A_Q X_Q + B_Q v_s + B_{QE} v_{Es}, \quad (21)$$

$$v = C_Q X_Q, \quad \pi_k = C_{Qk} X_Q, \quad (22)$$

$$X_Q = \begin{pmatrix} X_U \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A_Q = \begin{pmatrix} A_U - B_U K_P C_U & B_Q \\ -\lambda_I C_U & 0 \end{pmatrix}, \quad B_Q = \begin{pmatrix} K_P B_U \\ \lambda_I \end{pmatrix},$$

$$C_Q = (C_U \ 0), \quad C_{Qk} = (C_{Uk} \ 0),$$

где входные воздействия — уставка мощности v_s и сигнал изменения электрической мощности v_{Es} , выходные переменные — нейтронная мощность реактора v и давление пара в главном паровом коллекторе π_k , $n = 41$. Аналогично построена модель с нечетким ПИ-регулятором мощности.

Решением задач синтеза (2) и (3) выполнена оптимизация параметров регуляторов мощности и получено желаемое время регулирования $t_e = 100$ с. В табл. 4 для двух ПИ-регуляторов мощности (РМ) и критериев качества

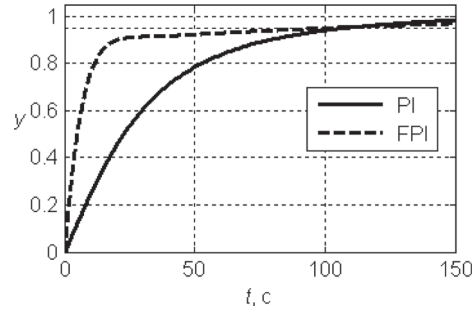


Рис. 12. Изменение мощности

(КК) представлены оптимальные значения параметров регуляторов. На рис. 12 показаны переходные процессы изменения мощности реактора в оптимальных системах, имеющие одинаковое время регулирования $t_c = 100$ с. Самый медленный процесс, который отвечает минимуму улучшенной интегральной квадратичной оценки (ПИ), предпочтителен для безопасности энергоблока.

Таблица 4. Синтез параметров РМ

РМ	КК	K_p^*	λ_I^*	K_u^*	ξ_p^*	η_p^*
ПИ	ИКО	6,453	0,174	—	—	—
НПИ	ППК	0,957	0,334	26,7	0,287	0,707

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что оптимальный линейный ПИ-регулятор нейтронной мощности эффективнее оптимального нечеткого ПИ-регулятора.

Синтез управления режимом «Т». Модель системы управления режимом «Т», которой соответствует система автоматического поддержания давления пара перед турбиной, построена по модели (21), (22) с ПИ-регулятором давления (РД):

$$dX_P/dt = A_P X_P + B_P v_{Es}, \quad \pi_k = C_P X_P, \quad C_P = (C_{Qk} \ 0),$$

$$X_P = \begin{pmatrix} X_Q \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A_P = \begin{pmatrix} A_Q - B_Q K_P C_{Qk} & B_Q \\ -\lambda_I C_{Qk} & 0 \end{pmatrix}, \quad B_P = \begin{pmatrix} B_{QE} \\ 0 \end{pmatrix};$$

имеет входное возмущающее воздействие — сигнал изменения электрической мощности v_{Es} и выходную переменную давления пара в главном паровом коллекторе π_k . Аналогично построены модели с линейным ПИД- и нечетким ПИ-регуляторами давления.

Выполнена оптимизация параметров регуляторов давления. В табл. 5 для трех РД приведены оптимальные значения параметров K_p^* , λ_I^* , λ_D^* , K_u^* , ξ_p^* , η_p^* и показателей качества σ^* , ζ^* , t_c^* .

Таблица 5. Оптимальные параметры регуляторов давления

РД	K_p^*	λ_I^*	λ_D^*	K_u^*	ξ_p^*	η_p^*	σ^*	ζ^*	λ^*	$t_c^*, \text{с}$
ПИ	12,70	5,694	—	—	—	—	1,000	0,206	1,652	10,984
ПИД	6,084	9,693	2,257	—	—	—	1,000	0,051	1,000	5,612
НПИ	0,950	8,837	—	2,97	0,542	0,155	0,950	0,200	18,389	7,911

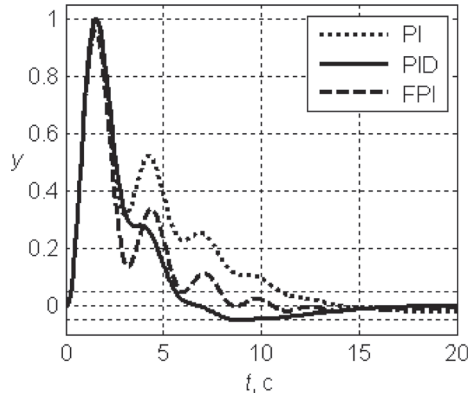


Рис. 13. Изменение давления пара

На рис. 13 представлены переходные процессы изменения давления пара в главном паровом коллекторе в оптимальных системах поддержания давления.

Эти результаты позволяют сделать вывод, что оптимальный традиционный линейный ПИД-регулятор давления обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс с небольшими колебаниями.

Выводы

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Генетическими алгоритмами выполнен синтез оптимальных систем автоматического управления с нечеткими ПИ-регуляторами для ядерного реактора, парогенератора и паровой турбины, что позволяет сравнить нечеткие регуляторы с ПИД-регуляторами.

2. Построены математические модели энергоблока АЭС, включающие взаимодействующие в нормальных режимах эксплуатации реактор, парогенератор, паровую турбину и их системы управления, что позволяет проводить синтез систем и исследовать различные законы управления энергоблоком.

3. На основании моделей систем автоматического управления энергоблока выполнен синтез регуляторов для нормальных режимов эксплуатации — автоматического поддержания нейтронной мощности (режим «Н») и давления пара перед турбиной (режим «Т»).

Список использованной литературы

1. Иванов В. А. Регулирование энергоблоков. — Л.: Машиностроение, 1982. — 311 с.
2. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. — М.: ИздАТ, 2002. — 480 с.
3. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. — Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 300 с.
4. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления. — К.: Радиоаматор, 2005. — 708 с.
5. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. — Харьков: Основа, 1997. — 112 с.
6. Северин В. П. Векторная оптимизация систем автоматического управления генетическими алгоритмами // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. — 2009. — Ч. 5. — С. 80–85.
7. Jafari H. S. M., Severin V. P. Optimal synthesis of intelligent control systems of atomic power station using genetic algorithms // Intelligent Information and Engineering Systems. Information Technologies and Knowledge. — 2009. — N 13. — Vol. 3. — P. 98–105.
8. Джафарі Х. С. М., Северин В. П., Чернай В. Ф. Перспективы применения генетических алгоритмов для синтеза интеллектуальных систем управления энергоблока атомной электростанции // Технічна електродинаміка. — 2009. — Ч. 5. — С. 92–97.
9. Джафарі Х. С. М., Северин В. П. Задачи многокритериального синтеза интеллектуальных систем управления энергоблока атомной электростанции с применением генетических алгоритмов // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС: сборник научных трудов / под ред. М. А. Ястребенецкого. — Одесса: Астропринт, 2010. — С. 217–234.
10. Джафарі Х. С. М. Багатокритеріальний синтез інтелектуальних систем керування енергоблоків АЕС генетичними алгоритмами: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.07. НТУ «ХПІ». Харків. — 2010. — 20 с.
11. Федянина К. Б., Кучер Е. А., Северин В. П. Оптимизация следящего привода и систем управления паровой турбиной с использованием генетических алгоритмов // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. — 2009. — Ч. 5. — С. 86–91.

Получено 09.07.2013.