

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПИТАНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГБЛОКА АЭС

Л.А. Денисова (ОмГТУ)

Представлена математическая модель системы питания парогенератора энергоблока АЭС, учитывающая действия случайных возмущений на объект управления. В качестве исходных данных для разработки модели использована архивная информация о ТП на энергоблоке. Получена передаточная функция формирующего фильтра для генерации случайного сигнала с требуемой автокорреляционной функцией. Приведены результаты модельных исследований и оптимизации параметров системы автоматического регулирования с помощью генетического алгоритма.

**Ключевые слова:** математическая модель, система питания парогенераторов, случайный процесс, формирующий фильтр, показатель качества, генетический алгоритм.

### Введение

Для модернизации системы автоматического регулирования (САР) питания парогенераторов (ПГ) энергоблоков Кольской АЭС в ЗАО "Автоматика-Э" создан программно-технический комплекс (ПТК) на базе выносных локальных регуляторов ВЛР-2.1 [1]. ПТК САР ПГ предназначен для поддержания во всех режимах работы энергоблока расходов питательной воды в парогенераторы в соответствии с расходами генерируемого пара и поддержания заданного уровня воды в ПГ.

Система питания парогенераторов является одним из важнейших элементов энергоблока АЭС с водородным энергетическим реактором (ВВЭР). ПТК САР ПГ, обеспечивая надежную и экономичную работу системы питания парогенераторов, влияет на показатели всего энергоблока. Для решения задачи тестирования прикладного ПО ПТК САР ПГ на соответствие техническим требованиям и оптимизации настроек каналов регулирования необходима адекватная математическая модель.

С учетом того, что информация о протекании основных ТП в действующих САР ПГ регистрируется и архивируется имеющейся информационно-вычислительной системой, она может быть использована в качестве исходных данных для разработки математической модели объекта управления. На основе архивной информации могут быть получены данные не только о динамических характеристиках ПГ, но и о статистических характеристиках действующих случайных возмущений.

САР ПГ реализует трехимпульсную систему регулирования: на вход регулятора подаются сигналы измеренного уровня воды (основная регулируемая величина), расхода питательной воды (вспомогательная переменная) и расхода перегретого пара (возмущающее воздействие). САР ПГ формирует управляющие воздействия на электропривод регулирующего питательного клапана (РПК), через который осуществляется подача воды из напорного коллектора в парогенератор, обогреваемый теплоносителем первого контура энергоблока. Дополнительно вводимые сигналы позволяют уменьшить влияние на уровень в ПГ возмущений со стороны РПК и изменения паровой нагрузки.

К стабилизации уровня в ПГ предъявляются высокие требования. Для ПГ с ВВЭР-400 номинальный уровень воды  $h_{\text{зад}}=1900$  мм. Точность поддержания заданного уровня в стационарных режимах  $\pm 50$  мм. Допустимый динамический заброс при изменении нагрузки  $\pm 75$  мм. Повышение уровня от номинального не допускается из-за возможности заброса пара в турбину, снижение уровня — для предотвращения оголения поверхности нагрева.

Управляющим воздействием САР ПГ является расход питательной воды, а возмущающим — расход пара турбиной, изменяющийся при изменении мощности турбины. На уровень воды, кроме того, оказывают влияние изменения мощности реактора, теплоподвода со стороны первого контура и другие факторы [2, 3].

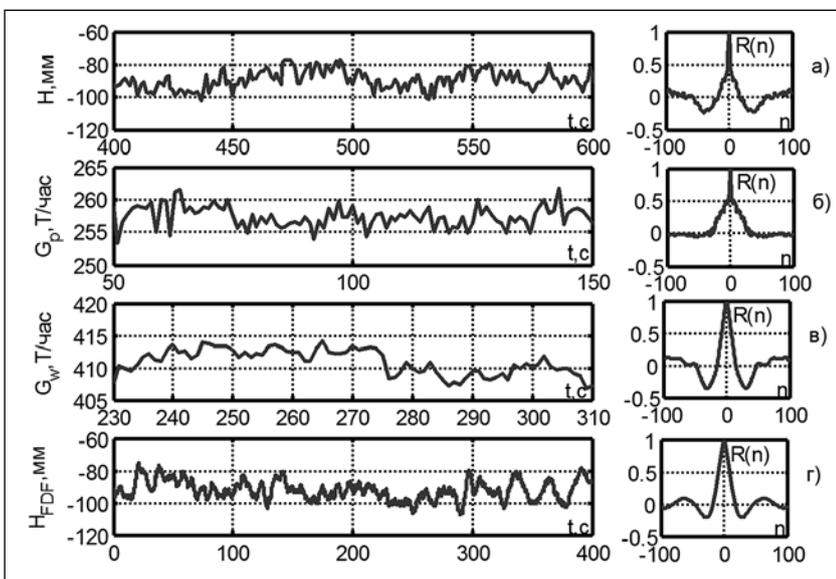


Рис. 1. Реализации случайных процессов и соответствующие им автокорреляционные функции:

а) изменение уровня в ПГ; б) изменение расхода пара; в) изменение расхода питательной воды; г) изменение моделируемого уровня в ПГ при использовании формирующего фильтра

В статье представлена математическая модель системы питания ПГ энергоблока АЭС, учитывающая действия случайных возмущений на объект управления. На основе архивной информации о ТП на энергоблоке получены оценки автокорреляционных функций случайных изменений технологических параметров. Для генерации случайных сигналов с требуемыми автокорреляционными функциями синтезирован формирующий фильтр. С использованием разработанной математической модели выполнены исследования и оптимизации параметров САР ПГ на основе генетического алгоритма.

Следует отметить, что полученная передаточная функция формирующего фильтра может быть использована для моделирования и других ТП, характеризующихся действием случайных возмущений, если к качеству управления предъявляются высокие требования.

#### Оценка статистических характеристик возмущений и синтез формирующего фильтра

Изменения уровня воды в ПГ, а также расходов питательной воды и пара являются случайными процессами. На рис. 1, а-в показаны графики изменения технологических параметров системы, построенные по архивным данным Кольской АЭС. Из имеющихся массивов информации выбраны реализации, где процессы практически удовлетворяют условию стационарности по признаку постоянства математического ожидания и по ним были оценены статистические характеристики флуктуаций. Полученные оценки нормированных автокорреляционных функций рассматриваемых случайных процессов для выборок объема  $n=100$  также приведены на рис. 1, а-в.

Для моделирования случайных изменений технологических параметров на основе полученных исходных данных необходимо синтезировать формирующий фильтр, генерирующий случайный сигнал с требуемой автокорреляционной функцией.

Передаточная функция формирующего дискретного фильтра может быть получена на основе метода спектрального разложения [4]. При этом необходимо руководствоваться следующим.

Известно, что при воздействии дискретного белого нормированного шума на дискретный линейный фильтр с передаточной функцией

$$K(z) = \frac{A(z)}{B(z)}$$

на выходе фильтра будет дискретный случайный процесс со спектральной плотностью, равной квадрату модуля передаточной функции:

$$F(z) = \left| \frac{A(z)}{B(z)} \right|^2 = \frac{A'(z) A'(z^{-1})}{B'(z) B'(z^{-1})} = |K^*(z)|^2 = |K(z^{-1})|^2, \quad (1)$$

где  $K^*(z)$  и  $K(z^{-1})$  — дискретная передаточная функция формирующего фильтра для операторов прямого и обратного сдвигов соответственно;  $A'(z)$

$(A'(z^{-1}), B'(z) (B'(z^{-1}))$  — полиномы числителя и знаменателя  $K^*(z) (K(z^{-1}))$ .

Входным сигналом формирующего фильтра является нормально распределенный дискретный белый шум  $\xi(n)$ , то есть некоррелированная последовательность случайных чисел с математическим ожиданием  $M_{\xi} = 0$  и дисперсией  $\sigma_{\xi}^2 = 1$ .

Экспериментально полученные автокорреляционные функции колебаний сигналов для непрерывного процесса приближенно аппроксимируются выражением:

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\tilde{\alpha}|\tau|} \cos \tilde{\beta}\tau,$$

где параметры  $\tilde{\alpha}$  и  $\tilde{\beta}$  — коэффициенты, характеризующие затухание автокорреляционной функции и частоту периодической составляющей процесса соответственно;  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение сигнала;  $\tau$  — временной лаг.

Пульсации сигнала с автокорреляционной функцией данного вида реализует стационарный случайный сигнал с полосовым частотным спектром, что делает возможным формировать пульсации в требуемой полосе частот, изменяя параметры  $\tilde{\alpha}$  и  $\tilde{\beta}$ .

Нормированная автокорреляционная функция соответствующего дискретного процесса:

$$R(n) = e^{-\alpha n} \cos \beta n,$$

где  $\alpha = \tilde{\alpha} t_0; \beta = \tilde{\beta} t_0; t_0$  — интервал дискретизации по времени.

Спектральная плотность для дискретного случайного процесса является двусторонним дискретным преобразованием Лапласа от его автокорреляционной функции равна:

$$F(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} R(n) e^{-j\omega n} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} R(n) z^n.$$

Для получения двустороннего дискретного преобразования Лапласа воспользуемся соотношением

$$F(z) = F^+(z) + F^+(z^{-1}) - R(0), \quad (2)$$

где  $F^+(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} R(n) z^n$  — одностороннее

$z$ -преобразование автокорреляционной функции. Тогда

$$F^+(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} R(n) z^n = \sum_{n=0}^{+\infty} (e^{-\alpha n} \cos \beta n) z^n.$$

По таблице  $z$ -преобразований [4, стр. 764] получим:

$$F^+(z) = \frac{1 - z e^{-\alpha} \cos \beta}{1 - 2z e^{-\alpha} \cos \beta + z^2 e^{-2\alpha}} = \frac{1 - z \gamma \cos \beta}{1 - 2z \gamma \cos \beta + z^2 \gamma^2};$$

$$\gamma = e^{-\alpha}.$$

Следовательно, спектральная функция  $F(z)$  в соответствии с выражением (2) принимает вид

$$F(z) = \frac{1 - z \gamma \cos \beta}{1 - 2z \gamma \cos \beta + z^2 \gamma^2} + \frac{1 - z^{-1} \gamma \cos \beta}{1 - 2z^{-1} \gamma \cos \beta + z^{-2} \gamma^2} - 1.$$

После приведения к общему знаменателю, приведения подобных членов и введения новых обозначений получим:

$$F(z) = \frac{-z^{-1}(A_0 + A_1z + A_0z^2)}{|1 + B_1z + B_2z^2|^2}, \quad (3)$$

где  $A_0 = (1 - \gamma^2)\gamma \cos \beta$ ;  $A_1 = -(1 - \gamma^4)$ ;

$$B_1 = -2\gamma \cos \beta; B_2 = \gamma^2.$$

Произведем факторизацию спектральной функции  $F(z)$ , то есть разобьем выражение в правой части (3) на два сомножителя в соответствии с (1). Знаменатель выражения (3) уже представляет собой произведение двух сомножителей. Для факторизации числителя найдем его корни:

$$v_{1,2} = \frac{-A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4A_0^2}}{2A_0} = v_0 \pm \sqrt{v_0^2 - 1}; \quad v_0 = \frac{1 + \gamma_0}{2\gamma \cos \beta}.$$

Так как уравнение  $A_0 + A_1z + A_0z^2 = 0$  является симметричным, то любой из его корней  $v_{1,2}$  можно использовать в разложении, например,  $v_1$ . Тогда числитель можно представить в виде:

$$-z^{-1}(A_0 + A_1z + A_0z^2) = \rho(z - v_1)(z^{-1} - v_1); \quad \rho = \frac{A_0}{v_1}.$$

Таким образом, дискретная передаточная функция формирующего фильтра для реализации случайного процесса с автокорреляционной функцией  $R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau$  имеет вид:

$$K(z^{-1}) = \frac{a_0 + a_1z^{-1}}{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}},$$

где  $a_0 = -\sigma v_1 \sqrt{\rho}$ ;  $a_1 = \sigma \sqrt{\rho}$ ;  $b_1 = B_1$ ;  $b_2 = B_2$ .

Для реализации модели случайного сигнала представим формирующий фильтр рекуррентной зависимостью

$$\tilde{\xi}(n) = a_0 \xi(n) + a_1 \xi(n-1) - b_1 \tilde{\xi}(n-1) - b_2 \tilde{\xi}(n-2), \quad (4)$$

где  $\xi$ ,  $\tilde{\xi}$  — входной и выходной сигналы формирующего фильтра соответственно;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  — параметры формирующего фильтра, зависящие от  $\alpha$  и  $\beta$ .

На рис. 1, г приведены графики аппроксимирующей автокорреляционной функции и соответствующая реализация случайного процесса, полученные при моделировании случайного сигнала уровня в ПГ с использованием формирующего фильтра (4).

#### Математическая модель питания парогенератора

В среде MATLAB/Simulink [5] разработана математическая модель САР ПГ (рис. 2), которая в свою очередь содержит модели: цифрового импульсного регулятора (controller), исполнительного механизма (ИМ) с регулирующим питательным клапаном (regulating door) и технологического объекта управления (control object).

Цифровой регулятор САР ПГ, параметры которого необходимо оптимизировать, реализует традиционный способ регулирования, применяемый в САР с исполнительными механизмами постоянной скорости. Основой алгоритма регулирования является релейно-импульсный пропорционально-дифференциальный (ПД) преобразователь, представляющий собой два двухпозиционных релейных звена с зоной нечувствительности и гистерезисом, охваченные общей обратной связью. Инерционное звено в обратной связи имеет передаточную функцию:

$$W_{oc}(s) = \frac{1/k_p}{T_{и}s + 1},$$

где  $k_p$  — коэффициент передачи регулятора;  $T_{и}$  — постоянная времени интегрирования. Сигнал рассогласования на входе в регулятор формируется взвешенным суммированием сигналов заданного, текущего значений уровня, а также расходов пара и питательной воды. Сигнал материального баланса между расходами пара и питательной воды, умноженный на коэффициент передачи  $k_g$ , используется в системе в качестве местной обратной связи и позволяет обеспечить высокую точность поддержания заданного уровня.

В реализованном таким образом релейно-импульсном регуляторе скажность формируемых выходных импульсов связана ПД-зависимостью с изменением сигнала рассогласования. Регулятор совместно с исполнительным механизмом (ИМ) постоянной скорости приближенно осуществляет пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования. Кроме того, в модели присутствуют инерционные звенья для демпфирования входных сигналов (damping).

Параметрами настройки регулятора являются: коэффициент передачи  $k_p$ , постоянная времени интегрирования  $T_{и}$ , а также коэффициент обратной связи  $k_g$ . Содержащие указанные параметры звенья на рис. 2 выделены тенью.

Формируемая регулятором выходная последовательность импульсов поступает на исполнительный механизм РПК, который представлен усилительным и интегрирующим звеньями. С выхода усилительного звена, коэффициент передачи которого учитывает время открытия клапана  $T_{им}$ , сигнал скорости перемещения РПК поступает на интегратор с ограничениями (0...100%). Сигнал положения РПК поступает на объект управления, где формируется сигнал расхода питательной воды умножением сигнала положения РПК на соответствующий коэффициент передачи.

Подсистема steam generator предназначена для моделирования собственно парогенератора (рис. 3). Подсистема steam generator имеет два входа: расход питательной воды от регулирующего клапана и параметр perturbation для формирования глубоких возмущений изменением расхода пара. Выходными переменными являются уровень воды в ПГ, расходы пара и питательной воды с учетом их взаимного влияния.

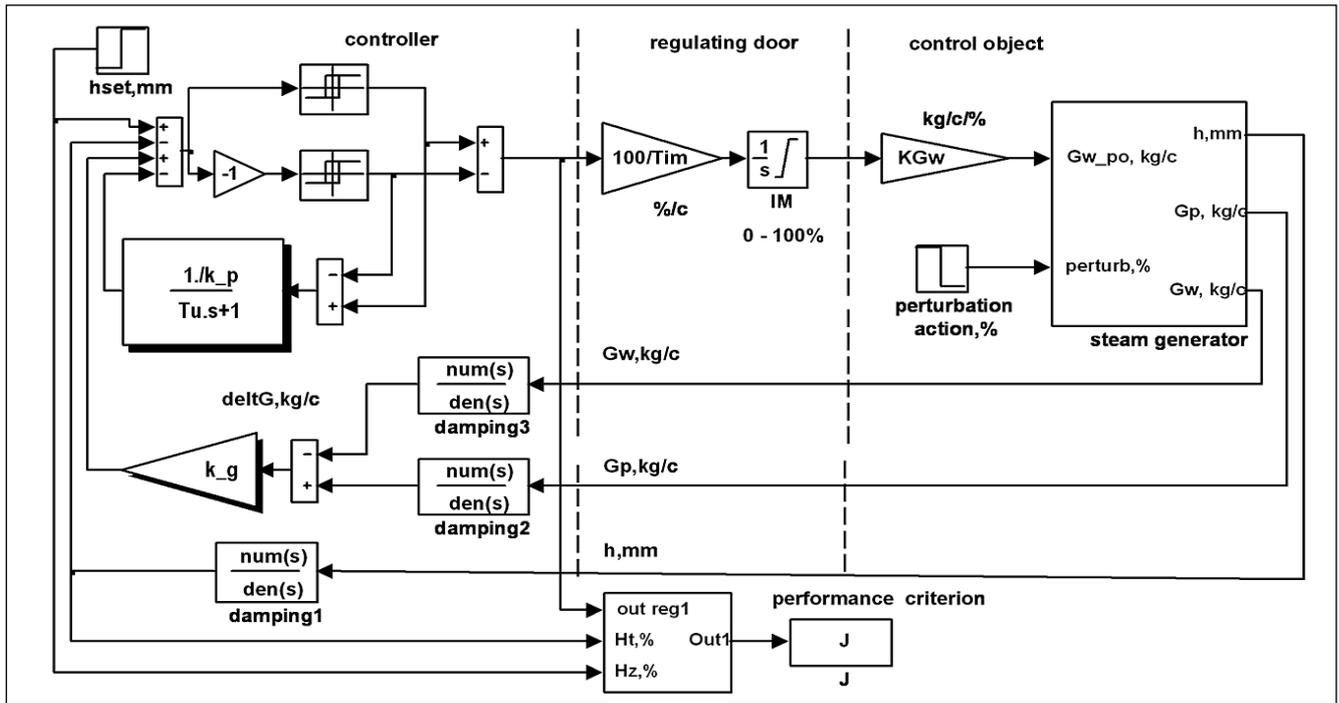


Рис. 2. Модель системы автоматического регулирования питания парогенератора

Значения параметров данной линейной модели ПГ получены на основе величин конструктивных и технологических параметров оборудования, а также путем аппроксимации динамических характеристик ПГ, рассчитанных по нелинейной модели энергоблока [3].

Уровень воды в парогенераторе является интегралом от материального небаланса между расходами пара и питательной воды. При моделировании динамических свойств ПГ по уровню воды каждый из каналов воздействий описывается суммой интегрального и апериодического звеньев, причем инте-

грирующее звено является общим для обоих каналов. Кроме того, в модели ПГ присутствуют апериодические звенья, необходимые для моделирования взаимного влияния возмущающих воздействий по расходам пара и воды.

Флуктуации случайных возмущений уровня, расходов пара и питательной воды реализуются формирующим фильтром Shaping Filter на основе экспериментально полученных автокорреляционных функции колебаний сигналов в соответствии с выражением (4), и далее суммируются с соответствующими

выходами модели ПГ. При этом генерация входного нормально распределенного белого шума производится с помощью блока Band-Limited White Noise.

Для решения задачи оптимизации в модели выполняется расчет интегрального показателя качества регулирования (подсистема performance criterion на рис. 2):

$$J = \int_0^T (\varepsilon^2 + \lambda u)^2 dt,$$

где  $\varepsilon$  — отклонение регулируемого параметра от заданного значения;  $u$  — выходной сигнал регулятора на ИМ;  $\lambda$  — весовой коэффициент;  $t$  — текущее время;  $T$  — верхний предел интегрирования, выбираемый не менее времени

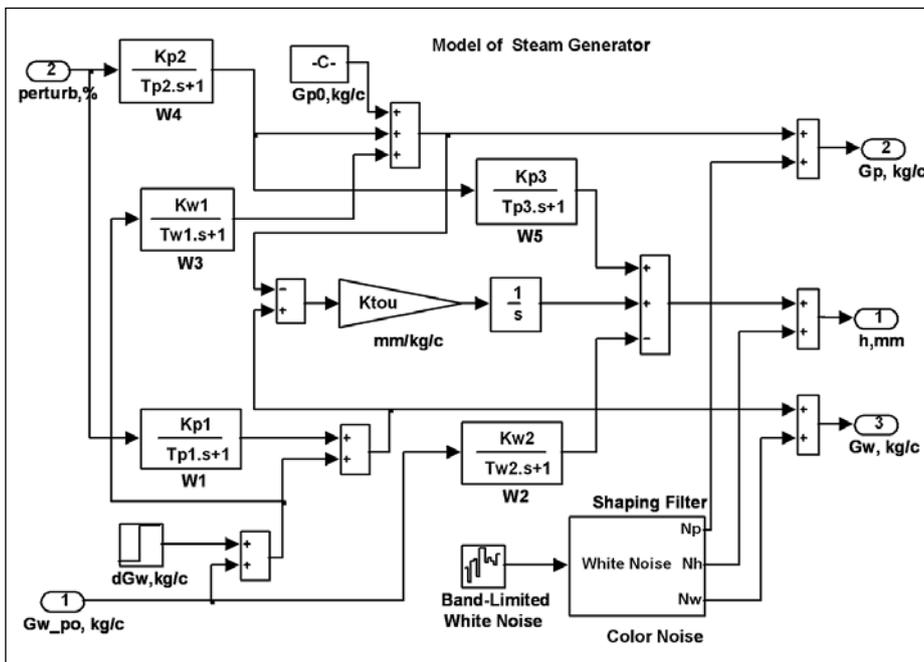


Рис. 3. Модель ПГ с учетом случайных возмущений

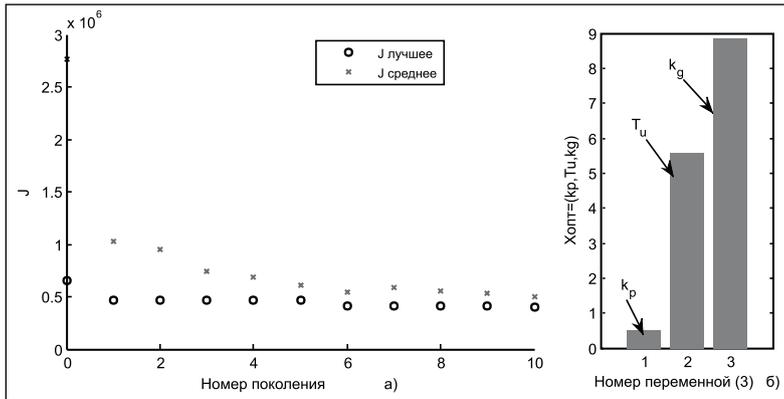


Рис. 4. Оптимизация САР ПГ с помощью генетического алгоритма

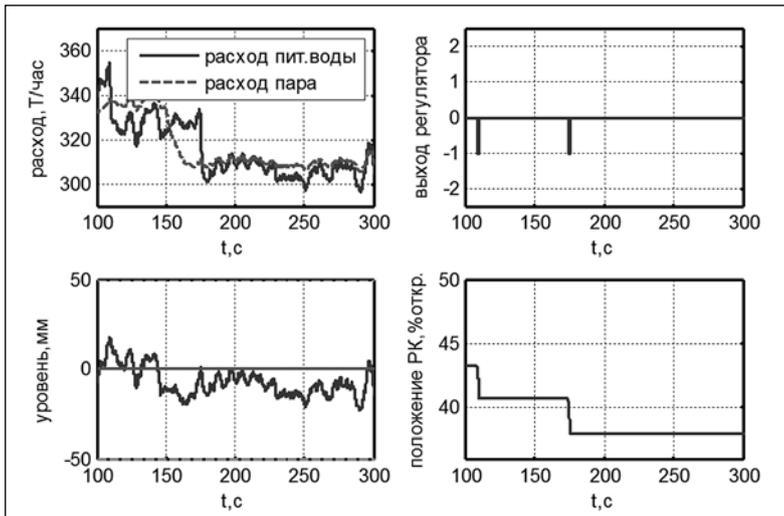


Рис. 5. Переходные характеристики САР ПГ при возмущении расходом пара

переходного процесса. Минимизация принятого показателя качества регулирования  $J$  позволяет обеспечить быстрое действие, отсутствие перерегулирования, а также уменьшение числа срабатываний исполнительного механизма.

Разработанная математическая модель системы питания парогенератора позволяет провести модельные исследования в различных режимах работы и определить параметры, обеспечивающих минимизацию выбранного показателя качества функционирования САР.

#### Экспериментальные исследования и оптимизация параметров САР ПГ

Экспериментальные исследования выполнялись с помощью m-файлов — сценариев системы MATLAB, осуществляющих многократные вызовы Simulink-модели САР ПГ. При этом принималось во внимание, что расчеты, проводимые при полном переборе настраиваемых параметров, требуют значительного времени, а увеличение диапазона или уменьшения шага изменения параметров для повышения точности решения ведет к дальнейшему увеличению временных затрат и делает задачу невыполнимой.

Применение для оптимизации САР генетического алгоритма (ГА) пакета MatLAB/Global Optimization

Toolbox позволяет решить эту проблему [6, 7]. С использованием ГА при незначительных временных затратах найдены оптимальные параметры САР ПГ и получены соответствующие им переходные процессы.

Генетический алгоритм представляет собой метод поиска оптимальных решений, основанный на копировании механизмов биологического естественного отбора и генетического наследования. Преимуществом ГА по сравнению с традиционными методами оптимизации является то, что поиск решения выполняется, исходя из множества (популяции) точек. Вследствие применения оператора скрещивания (crossover) наиболее приспособленных особей в ходе оптимизации рассматриваются участки области поиска, являющиеся наиболее перспективными в смысле приближения к оптимальному значению. Выполнение оператора случайных мутаций (mutation) позволяет получать индивидуумы с новыми свойствами. Кроме того, лучшие (elite) представители без изменения переходят в следующее поколение, поэтому каждое новое поколение содержит более высокое соотношение характеристик, присущих лучшим особям предыдущего поколения, распространяемое далее по всей популяции. В результате этого популяция эволюционно сходится к оптимальному решению.

Так как при оптимизации САР ПГ осуществляется поиск параметров  $k_p$ ,  $T_d$ ,  $k_g$ , доставляющих минимум функционалу качества  $J = f(k_p, T_d, k_g)$ , то для использования генетического алгоритма в качестве «особи» принимается вектор параметров  $X = (k_p, T_d, k_g)$ . На каждом шаге работы алгоритма рассматривается вектор  $X$  и соответствующее ему значение показателя  $J$ . Начальные значения параметров САР случайным образом выбирались из принятых диапазонов:  $k_p \in [0, 01; 1]$ ,  $T_d \in [2; 20]$ ,  $k_g \in [1; 100]$ .

Рис. 4 иллюстрирует работу ГА на одной из выполненных реализаций при оптимизации САР. Рис. 4, а отражает динамику изменения показателя качества для лучших особей, а также усредненного значения по популяции. Для получения оптимальных параметров потребовалось всего 10 поколений: видно, что алгоритм сходится к решению. На рис 4, б приведены столбчатые графики элементов вектора оптимальных параметров  $X_{\text{opt}} = (k_p, T_d, k_g)$ .

В связи с тем, что начальная популяция ГА формируется с использованием генератора случайных чисел, выполнялись несколько реализаций расчетов и выбирались лучшие из полученных решений. Результат оптимизации для одной из реализаций приведен на рис. 5. Представлен расчет для возмущенного режима работы парогенератора: при снижении рас-

хода пара на 10% от номинального значения на 150-й секунде. Из графиков видно, что снижение расхода пара отрабатывается регулятором, управляющим подачей питательной воды в ПГ, всего за один импульс. Расход питательной воды приводится в соответствие с расходом пара, положение клапана в рабочем диапазоне меняется менее чем на 5%. Уровень в ПГ подерживается в зоне требуемой точности  $\pm 50$  мм.

Следует отметить, что отработка возмущающего воздействия за малое число формируемых регулятором импульсов наблюдалась в большинстве реализаций. В результате проведенных исследований сделан вывод, что предлагаемый метод оптимизации на основе генетического алгоритма эффективен при автоматизированном проектировании для оптимизации САР с учетом действующих случайных возмущений.

#### Заключение

Разработанная математическая модель питания парогенератора позволяет выполнять настройку каналов регулирования ПТК САР ПГ и тестовые расчеты динамических характеристик в переходных режимах с глубокими изменениями нагрузки различной природы с учетом действующих случайных возмущений.

В результате проведения динамических испытаний на разработанной модели подтверждено, что ПТК САР ПГ обеспечивает поддержание параметров ПГ в пределах требований нормальной эксплуатации блока. Использование математической модели пита-

ния парогенератора с учетом действующих случайных возмущений, реализованной на испытательном стенде ЗАО "Автоматика-Э", позволяет в короткие сроки провести испытание системы регулирования в различных режимах работы и выработать рекомендации по оптимизации параметров ПТК САР ПГ.

#### Список литературы

1. Раскин Е.М., Денисова Л.А., Надточий П.Н. Программно-технический комплекс для регулирования питания парогенераторов энергоблока АЭС // Автоматизация в промышленности. 2012. №11.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Уч. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд. МГТУ им Н.Э. Баумана. 2004.
3. Раскин Е.М., Денисова Л.А., Сеницын В.П., Нестеров Ю.В. Математическая модель системы питания парогенератора энергоблока // Автоматизация в промышленности. 2010. №7.
4. Дорф Р., Бишон Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.
5. Дьяконов В.П. MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. 768 с.
6. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем управления. М.: Наука, 2009. 228 с.
7. Денисова Л.А., Мещеряков В.А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования с использованием генетического алгоритма // Автоматизация в промышленности. 2012. №7.

*Денисова Людмила Альбертовна — канд. техн. наук, доцент Омского государственного технического университета (ОмГТУ), старший научный сотрудник ЗАО «Автоматика-Э». Контактный телефон (381-2) 23-23-43. E-mail: ladenisova@mail333.com*

## Опыт применения имитационной модели демонтажа кладки реактора АМБ-100 Белоярской АЭС

**Б.К. Былкин (НИЦ «Курчатовский институт»)**

**В.В. Кононов, В.Л. Тихоновский, Д.В. Чуйко, П.А. Бунто,**

**Д.В. Свиридов, В.Е. Трифонов (ЗАО «НЕОЛАНТ»)**

*Изложен опыт практического применения имитационного моделирования при отработке технологии демонтажа графитовой кладки реактора первого блока Белоярской АЭС.*

*Ключевые слова: АЭС, имитационное моделирование, реактор АМБ-100, графитовая кладка, технология демонтажа, аварийные ситуации.*

#### Введение

Вывод из эксплуатации (ВЭ) — завершающая стадия жизненного цикла блока АЭС, сравнимая по сложности и продолжительности со стадией эксплуатации. Но в отличие от эксплуатации — это затратный этап, который в силу своих особенностей оказывает существенное влияние на суммарные показатели эффективности АЭС.

В связи с потенциальной длительностью, сложностью и опасностью процесса ВЭ в требованиях нормативно-технических и руководящих документов

Ростехнадзора и Концерна РЭА определено создание и наполнение информационной системы БД вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС (ИС БДВЭ) с использованием трехмерного моделирования с целью всестороннего информационного сопровождения процесса ВЭ АЭС [1].

Основной целью создания и применения имитационной модели ВЭ блока АЭС является снижение издержек и повышение безопасности осуществления выбранного варианта ВЭ блока АЭС за счет системного управления требованиями к проекту ВЭ,