

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (05.13.06)

УДК 681.51

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-122-131

## Исследование и оптимизация систем управления объектами атомной энергетики на основе имитационных моделей

В.П. Зверьков, В.Ф. Кузищин, В.Р. Сабанин

Рассмотрены вопросы создания имитационной всережимной нелинейной модели двухконтурной автоматической системы регулирования давления пара в главном паровом коллекторе (ГПК) второго контура энергоблока АЭС с реактором ВВЭР. Изложена двухэтапная процедура оптимизации динамической настройки системы с применением на первом этапе частотного метода расчета линейных систем, а на втором этапе — численного метода имитационного моделирования и оптимизации с учетом нелинейностей технических средств регулирования и объекта управления. Использован эволюционный алгоритм мультипараметрической оптимизации по комплексному показателю оптимальности, учитывающему специфические требования, предъявляемые к системе. Проведено исследование эффективности работы системы в широком диапазоне изменения мощности блока.

*Ключевые слова:* автоматическая система регулирования, имитационная модель, нелинейности, настройка, регулятор, дифференциатор, главный сервомотор турбины, регулирующий орган, давление пара, критерий оптимальности, функция цели.

*Для цитирования:* Зверьков В.П., Кузищин В.Ф., Сабанин В.Р. Исследование и оптимизация систем управления объектами атомной энергетики на основе имитационных моделей // Вестник МЭИ. 2021. № 6. С. 122—131. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-122-131.

## A Study and Optimization of Nuclear Power Facility Control Systems with the Use of Simulation Models

V.P. Zver'kov, V.F. Kuzishchin, V.R. Sabanin

Matters concerned with development of a fully variable nonlinear simulation model of a double-loop system for automatically controlling the steam pressure in the main steam header (MSH) of a VVER type reactor based NPP power unit's secondary circuit are considered. A two-stage procedure for optimizing the control system dynamic tuning is described, which uses the linear system frequency analysis method at the first stage and a numerical simulation and optimization method at the second stage, which takes into account the nonlinearities of the control equipment and control object. An evolutionary algorithm of multiparametric optimization with respect to a complex optimality indicator than takes into account the specific requirements for the system is used. The system performance efficiency in a wide range of the power unit outputs has been studied.

*Key words:* automatic control system, simulation model, nonlinearities, tuning, controller, differentiator, turbine main servo motor, control member, steam pressure, optimality criterion, objective function.

*For citation:* Zver'kov V.P., Kuzishchin V.F., Sabanin V.R. A Study and Optimization of Nuclear Power Facility Control Systems with the Use of Simulation Models. Bulletin of MPEI. 2021;6:122—131. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-122-131.

### Введение

Основа исследования систем управления технологическими процессами — математические модели, как правило, включающие в себя модели физических процессов, происходящих в объекте управления [1, 2] и автоматических устройств, реализующих необходимые законы управления [3 — 5]. Моделирование систем

управления объектами энергоблока с ядерными реакторами рассматривается во многих работах [6 — 10]. Одним из прогрессивных методов решения проблем оптимизации структуры и параметров систем управления является имитационное моделирование технологических объектов и автоматических систем регулирования (АСР).

Имитационное моделирование (ИМ) — способ представления сложных объектов и систем управления ими, основанный на воспроизведении функций элементов системы и связей между ними и отображающий развитие во времени переменных системы в целом и составляющих ее элементов при действии входных сигналов.

При системном подходе к созданию оптимальных систем управления [11] обычно возникают противоречивые требования, между которыми приходится находить некоторый компромисс, от которого зависит достоверность математического представления динамических характеристик технологического оборудования энергоблока и средств автоматизации.

Работоспособность создаваемой системы управления следует проверять с учетом различных возможных ситуаций на энергоблоке [9]. К ним относят: выход из строя одного и более главных циркуляционных насосов (ГЦН) или турбины, переход АЭС в режим собственных нужд, отключение подогревателя высокого давления, отказы элементов системы управления и т. д.

При выборе вида математического описания нужно учитывать нелинейные свойства объекта, что связано, главным образом, с зависимостью параметров модели от нагрузки энергоблока. Кроме того, принимают во внимание отличия характеристик реальных технических средств автоматизации от идеальных, что относится, в первую очередь, к исполнительным устройствам и формирователям алгоритмов управления [12].

Приведены результаты создания и динамической настройки имитационной модели АСР давления пара в ГПК энергоблока с реактором ВВЭР-440, выполненной с учетом характерных нелинейностей элементов системы и обеспечивающей достаточное качество процессов регулирования.

**Краткое описание автоматических систем регулирования давления пара в главном паровом коллекторе**

В энергоблок ВВЭР-440 входят две турбины, подключенные к шести парогенераторам через ГПК, что способствует выравниванию давления пара [13]. Коллектор можно разделить на два полукolleктора, из которых пар будет поступать к турбинам.

Рассмотрим режим, при котором давление пара в ГПК стабилизируется регулятором по схеме «До себя». Каждая турбина вместе со своим вспомогательным оборудованием образует самостоятельную систему, потребляющую пар от парогенераторов.

На рисунках 1, 2 показаны принципиальная схема АСР давления пара в ГПК «До себя» и ее расчетная структурная схема (для одной турбины).

АСР давления пара реализована по двухконтурной схеме, содержащей пропорционально-дифференциальный (ПИ) регулятор и дифференциатор с передаточными функциями  $W_p(s)$  и  $W_d(s)$ . Основной регулируемой

величиной  $y$  является давление в главном паровом коллекторе (среднее значение),  $y = P_{ГПК}$ , а промежуточной  $z$  — среднее значение давления в регулирующих ступенях (РС) турбоагрегатов,  $z = P_{РС}$ . В процессе работы АСР изменения сигнала РРС, возникающие с опережением относительно основного сигнала  $P_{ГПК}$ , передаются через дифференциатор на вход ПИ-регулятора, а в установившемся состоянии сигнал на выходе дифференциатора исчезает (становится равным нулю).

Регулирующим воздействием  $\mu$  считается изменение степени открытия регулирующих органов (РО) — клапанов турбины и соответствующее изменение расхода пара на турбину  $G$ , реализуемое с помощью главного сервомотора турбины (ГСМ). Регулирующее воздействие передается одновременно на исполнительные механизмы (ИМ) двух турбин через схему синхронизации. Основное возмущение для АСР давления пара в ГПК — изменение расхода пара от парогенераторов, возникающее вследствие изменения мощности реактора  $N$ .

На основе аналитического анализа уравнений математической физики, связывающих отклонения давления пара в ГПК  $P_{ГПК}$  и регулирующей ступени турбины  $P_{РС}$  с отклонениями степени открытия регулирующих клапанов  $\Delta\mu = \Delta G_n$  [1], получены следующие передаточные функции динамической математической модели объекта управления:

- по каналу действия РО на промежуточную регулируемую величину  $\mu(t) \rightarrow z(t)$ :

$$W_1(s) = \frac{K_1}{(T_1s + 1)(0,5T_1s + 1)} \exp(-\tau s); \quad (1)$$

- по каналу действия РО на основную регулируемую величину  $\mu(t) \rightarrow y(t)$ :

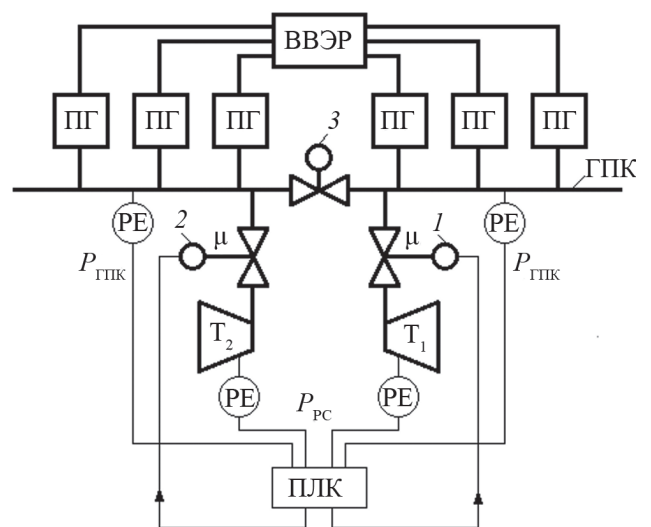


Рис. 1. Принципиальная схема АСР давления пара в ГПК: ПГ — парогенератор;  $T_1, T_2$  — турбины; ПЛК — программируемый логический контроллер; PE — измерительные преобразователи давления пара; 1, 2 — исполнительные механизмы; 3 — задвижка

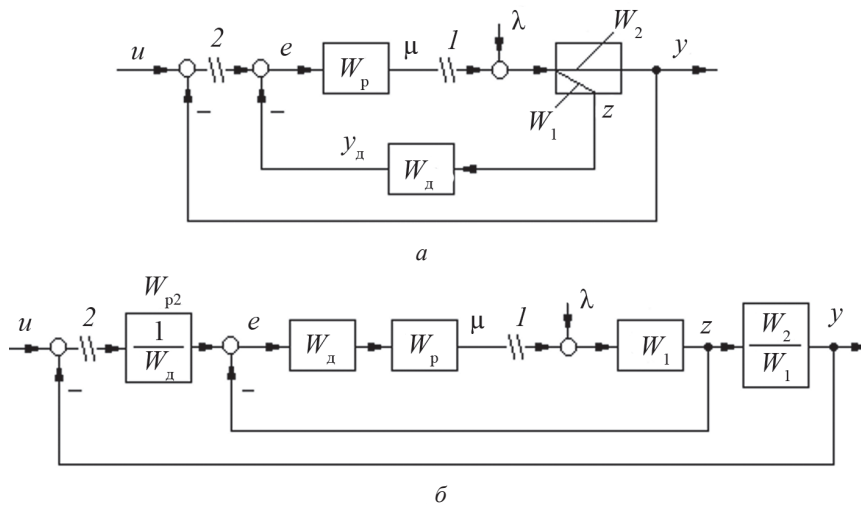


Рис. 2. Структурная схема АСР давления пара в ГПК:

*a* — исходная схема; *б* — эквивалентная каскадная схема;  $W_1(s), W_2(s)$  — передаточные функции объекта по каналам  $\mu \rightarrow z$  и  $\mu \rightarrow y$ ;  $u$  — задание по давлению пара в ГПК;  $e$  — сигнал рассогласования;  $\lambda$  — сигнал возмущения по изменению расхода пара от парогенераторов;  $\mu$  — перемещение регулирующих органов;  $1, 2$  — точки разрыва для контроля КЧХ разомкнутой системы внутреннего и внешнего контуров

$$W_2(s) = \frac{K_2}{(T_2s + 1)(0,5T_2s + 1)} \exp(-\tau_2s). \quad (2)$$

Для передаточных функций (1), (2) с учетом конструктивных данных энергоблока ВВЭР-440 рассчитаны значения параметров  $K, T$  и  $\tau$  в зависимости от мощности реактора  $N$  в диапазоне от 10 до 110%. Указанные зависимости аппроксимированы следующими формулами:

$$K_1(N) = 0,211 + 0,00034N; T_1 = 2,5c; \tau_1 = 0,25 c; \quad (3)$$

$$K_2(N) = -bk - ck/(N + ak); T_2(N) = bt + ct/(N - at), \quad (4)$$

где  $ak = 189,24889; bk = 4,2417069; ck = -819,35735; at = 205,882353; bt = -1,3764706; ct = 5009,2734$ .

Здесь и далее сигналы по давлению пара приведены к процентам унифицированного сигнала (%УС), где 100 (%УС) = 6 МПа, а регулирующее воздействие  $\mu$  — к процентам степени открытия регулирующего органа (указателя положения) (%УП). Постоянные времени  $T$  и  $\tau$  выражены в секундах. Параметры объекта для значений мощности  $N = 20, 50$  и 100% приведены в табл. 1.

**Требования эксплуатации к качеству работы автоматической системы регулирования**

По требованиям эксплуатации энергоблока параметры настройки регулятора и дифференциатора должны обеспечивать работоспособность и качественную работу АСР в полном диапазоне нагрузок блока от 10 до 100%.

Функции регулятора и дифференциатора реализованы в промышленном контроллере в комплекте с исполнительным механизмом (ИМ) постоянной скорости. При этом управление исполнительным механизмом осуществляется с помощью последовательности импульсов, подаваемых на ГСМ.

Малая инерционность объекта управления обостряет влияние нелинейностей технических средств регулирования и создает необходимость их учета при настройке АСР. В частности, нелинейные эффекты вносят программная реализация алгоритмов управления в контроллере, ограничения по скорости и диапазону перемещения РО и работа в импульсном режиме ГСМ с РО. Нелинейности следует учесть в имитационной модели. При этом ГСМ и РО (система паровых клапанов) входят в комплект турбины. Они настроены на заводе-изготовителе, и при эксплуатации их корректировка запрещена.

Таблица 1

**Параметры объекта и параметры настройки АСР для первого этапа**

Мощность, $N, \%$	Канал $\mu \rightarrow P_{pc}$			Канал $\mu \rightarrow P_{ГПК}$			Регулятор		Дифференциатор	
	$K_1$	$T_1$	$\tau_1$	$K_1$	$T_1$	$\tau_1$	$K_1$	$T_1$	$\tau_1$	T1
20	0,218	2,5	0,25	0,053	20,8	1,94	39,5	3,15	0,20	26,0
50	0,228	2,5	0,25	0,136	18,2	1,78	14,9	3,10	0,50	24,0
100	0,245	2,5	0,25	0,235	15,0	1,50	8,92	2,94	0,75	20,0

При эксплуатации АСР в программе контроллера можно корректировать только зону нечувствительности ПИ-регулятора и минимальную длительность импульсов, т. е. система регулирования должна обеспечивать достаточное качество регулирования без коррекции параметров динамической настройки регулятора и дифференциатора во всем диапазоне изменения нагрузки.

В настроенной системе нежелательны колебательные процессы регулируемой величины (давления пара в ГПК), то есть характер процессов регулирования должен быть близок к аperiodическому виду.

Для АСР давления пара в ГПК с учетом приведенных требований предложена двухэтапная процедура настройки.

На первом этапе определим первое приближение для параметров настройки АСР аналитическими частотными методами расчета линейных систем [4, 11, 15]. На втором проанализируем работу системы в целом и выполним корректировку параметров настройки с учетом влияния нелинейных факторов с использованием численных методов имитационного моделирования [3, 12, 14].

**Этап 1. Аналитическая настройка автоматической системы регулирования частотным методом**

Цель оптимизации параметров настройки АСР — минимум интегрального показателя качества при ограничении на запас устойчивости, например, на частотный показатель колебательности  $M$  [11]. Важное условие эффективной работы подобных многоконтурных систем — наличие частотной развязки контуров. В данном случае для двухконтурной АСР давления пара в ГПК благоприятным фактором является малая инерционность опережающего участка по давлению пара в регулирующей ступени, что позволяет использовать методику поочередной настройки контуров каскадных систем с применением нескольких шагов приближений.

В эквивалентной каскадной двухконтурной схеме (см. рис. 2, б) во внешнем контуре действует эквивалентный ПИ-регулятор с передаточной функцией  $W_{p2}(s)$ , считающийся обратным оператором по отношению к передаточной функции дифференциатора  $W_d(s)$ :  $W_{p2}(s) = 1/W_d(s)$ , где  $W_{p2}(s) = K_{п2}[1 + 1/(sT_{п2})]$ ;  $W_d(s) = K_d T_d s / (T_d s + 1)$ . При этом  $K_d = 1/K_{п2}$ ;  $T_d = T_{п2}$ .

В ходе расчетов сначала вычисляли параметры ПИ-регулятора внутреннего контура  $W_p(s) = K_{п}[(1 + 1/(sT_{п}))]$  при фиксированных параметрах дифференциатора, а затем определяли параметры эквивалентного ПИ-регулятора внешнего контура  $W_{p2}(s)$  и, следовательно, параметры дифференциатора. После изменения параметра  $K_d$  дифференциатора перерасчитывался параметр  $K_{п}$  регулятора для сохранения найденного ранее значения коэффициента  $K_d K_{п}$  внутреннего контура.

На первом шаге начальные параметры дифференциатора  $[K_{д0}; T_{д0}]$  вычисляли по методу компенсированной настройки [16], который сводится к условию, что при ступенчатом изменении сигнала  $\mu(t)$  в разомкнутой системе суммарный сигнал  $e(t) = y_d(t) + y(t)$  на входе регулятора  $W_p(s)$  имеет наибольшее быстроедействие и монотонный (аperiodический) вид переходного процесса.

В ходе оптимизации системы в качестве необходимого условия учитывали ограничение на максимум амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) внутреннего и внешнего контуров — частотный показатель колебательности:  $M \leq M_{доп}$ , где  $M_{доп}$  — допустимое значение показателя  $M$ . При выборе  $M_{доп}$  принимали во внимание требование эксплуатации об отсутствии колебательных процессов регулирования для  $P_{ГПК}$ . В связи с этим установлено ограничение  $M_{доп} = 1,02$ , что приблизительно соответствует степени затухания  $\Psi = 0,994$ .

Комплексные частотные характеристики (КЧХ) разомкнутых систем  $W_{pc}(j\omega)$  при размыкании внутреннего (первого) и внешнего (второго) контуров вычислены по формулам

$$W_{p,c1}(j\omega) = W_{p2}(j\omega)[W_1(j\omega)W_d(j\omega) + W_2(j\omega)]; \quad (5)$$

$$W_{p,c2}(j\omega) = \frac{W_p(j\omega)W_2(j\omega)}{[1 + W_p(j\omega)W_1(j\omega)W_d(j\omega)]}, \quad (6)$$

где  $\omega$  — угловая частота, рад/с.

С учетом (5), (6) КЧХ замкнутой системы можно выразить следующим образом.

Для внутреннего контура по каналу  $\lambda \rightarrow \mu$ :

$$W_{z,c1}(j\omega) = W_{p,c1}(j\omega) / [1 + W_{p,c1}(j\omega)]. \quad (7)$$

Для внешнего контура по каналу задания  $u \rightarrow y$ :

$$W_{z,c2}(j\omega) = W_{p,c2}(j\omega) / [1 + W_{p,c2}(j\omega)]. \quad (8)$$

С помощью (7), (8) проверяли ограничение на показатель  $M$  и разнесение резонансных частот. Кроме того, изучали вид процессов регулирования при возмущении по каналу регулирующего органа при  $\lambda_0 = 10\%$ . По данным оптимизации системы частотными методами найдены оптимальные значения параметров регулятора и дифференциатора ( $K_{п}^*$ ,  $T_{п}^*$ ,  $K_d^*$ ,  $T_d^*$ ). В табл. 1 даны параметры модели объекта и настройки АСР, полученные на первом этапе для  $N = 20, 50$  и  $100\%$ .

Приведенные результаты расчетов, выполненных в частотной области, — промежуточные и, в определенной степени, идеализированные, так как они получены при условии, что элементы системы являются линейными, а для каждого уровня мощности установлены свои рассчитанные значения параметров настройки. Однако, по условиям эксплуатации система должна обеспечить достаточное качество процессов регулирования с учетом влияния нелинейностей, характерных



для элементов системы при постоянных значениях параметров настройки в рабочем диапазоне изменения мощности блока.

В связи с этим, результаты расчетов, проведенных для линейной системы, скорректированы на втором этапе настройки системы по виду процессов регулирования, получаемых в режиме имитационного моделирования (в пакете MathCad) с использованием численных методов оптимизации [17, 18] при возмущении по каналу регулирования с учетом нелинейных факторов.

**Этап 2. Настройка автоматической системы регулирования давления в главном паровом коллекторе численными методами**  
**Имитационная модель.**

На рисунке 3 показана структурная схема имитационной модели АСР с виртуальными элементами регулирующего контроллера

Имитационная модель АСР составлена из рекуррентных выражений — уравнений математической физики. В ее состав входят следующие компоненты:

- модель динамики объекта регулирования по основному (внешнему)  $W_2(s)$  и промежуточному (внутреннему)  $W_1(s)$  каналам с вводом параметров  $K, T$  и  $\tau$  в зависимости от мощности реактора и вводом возмущения  $\lambda$ ;
- модель контроллера (нелинейная), содержащая регулирующий блок РБИ со вводом параметров ПИ-алгоритма  $K_p, T_n$  и зоны нечувствительности  $\Delta$ , широтно-импульсный модулятор (ШИМ) со вводом параметра  $t_{имп}$  — минимальной длительностью импульса и блок дифференциатора  $W_d$  (реального дифференцирующего звена) со вводом параметров  $K_d, T_d$ ;
- модель главного сервомотора турбины (нелинейная), состоящая из модели исполнительного механизма постоянной скорости (ИМ) и регулирующего органа (РО) с параметрами:  $T_m$  — время полного хода штока ГСМ,  $T_{on}$  и  $T_{off}$  — показатели инерционности ИМ, а

именно, постоянные времени процессов пуска и останова ИМ:  $L_{уфт}$  — зона люфта в механической системе «ИМ — РО»;  $K_{vb}$  и  $K_{vm}$  — максимальное и минимальное ограничения для положения РО (модель конечных выключателей для направлений «Больше» и «Меньше»).

Блок ШИМ преобразует аналоговый сигнал  $y_{РБ}(t)$ , поступающий от регулирующего блока РБИ, в последовательность импульсов  $d(t)$  постоянной амплитуды, коэффициент заполнения которых соответствует сигналу  $y_{РБ}(t)$ .

При работе комплекта регулирующего блока РБИ и блока ШИМ формируются импульсные команды «Больше» — 0 — «Меньше», которыми управляется ГСМ и, в конечном счете, клапаны турбины. Выходной сигнал блока РБИ  $y_{РБ}(t)$  соответствует производной от ПИ-алгоритма, т. е. пропорционально-дифференциальному преобразованию сигнала рассогласования  $e(t)$ . С учетом интегрирующего характера ИМ относительно сигнала  $d(t)$  комплект блоков РБИ, ШИМ и ГСМ приближенно реализует ПИ-закон регулирования.

**Показатели качества работы автоматической системы регулирования**

В соответствии с поставленной задачей, система настроена на минимум показателя качества (меры ошибки) относительно ступенчатого возмущения по каналу регулирующего органа при ограничении в виде требования отсутствия колебаний регулируемой переменной  $P_{ГПК}$ .

Одной из особенностей предложенной процедуры оптимизации является то, что в качестве показателя качества процессов регулирования с учетом технической реализации АСР (управления ИМ импульсными сигналами) использован комплексный показатель

$$I = \int_0^{\tau_{proc}} |y(t)| dt + a_{imp} n_{\tau_{proc}} = \min. \tag{9}$$

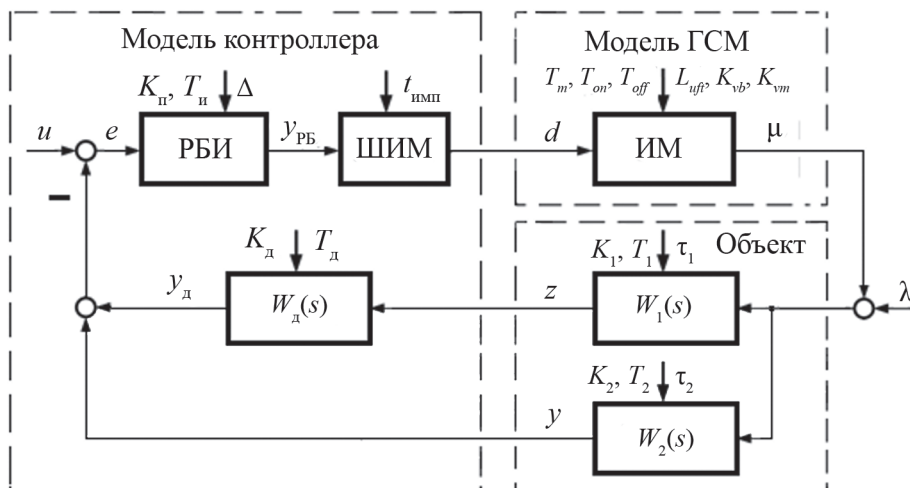


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели АСР давления пара в ГПК

Здесь первое слагаемое — оценка вычисленного на интервале времени  $\tau_{proc}$  интеграла по модулю отклонения регулируемой величины  $y(t)$  от заданного значения, а второе — число включений ИМ на фиксированном интервале времени переходного процесса, что является важным показателем с точки зрения обеспечения надежности электропривода ИМ. Коэффициент  $a$  нормирует соотношение составляющих показателя (9). Оптимизируемыми параметрами задачи поиска экстремума целевой функции (9) считаются параметры линейных алгоритмов (регулятора и дифференциатора)  $k_p = K_n$ ,  $T_i = T_n$ ,  $k_d = K_d$  и  $T_d = T_d$  при установленных значениях параметров всех нелинейных элементов  $\Delta$ ,  $t_i = t_{имп}$ ,  $T_m$ ,  $T_{on}$ ,  $T_{off}$ ,  $L_{uji}$ ,  $K_{vb}$  и  $K_{vm}$ .

Для выполнения требования на отсутствие колебаний в переходных процессах при оптимизации использованы два косвенных показателя:

- стандартный на основе оценки степени затухания  $\psi$ ;
- нестандартный дополнительный в виде требования близости оценок линейного интеграла и интеграла по модулю

$$\Delta I(k_p, T_i, k_d, T_d) = \left| 1 - \frac{\int_0^{\tau_{proc}} y(t) dt}{\int_0^{\tau_{proc}} |y(t)| dt} \right| < 10^{-5}. \quad (10)$$

Выполнение предложенного условия (10) обеспечивает отсутствие колебаний в процессе регулирования с переходом через ноль.

Оптимальные параметры  $k_p^*$ ,  $T_i^*$ ,  $k_d^*$  и  $T_d^*$  вычисляли эволюционным алгоритмом многопараметрической задачи оптимизации многоэкстремальных функций [17]. Для учета нарушений ограничений при расчете показателя качества работы АСР использованы функции штрафа.

**Результаты исследования качества работы автоматической системы регулирования численным методом имитационного моделирования**

Разработанная программа позволяет установить настройку АСР, обеспечивающую выполнение заданных требований при изменении мощности  $N$  реактора в широком диапазоне (от 10 до 110%). Для каждой мощности программа использует значения параметров объекта регулирования в соответствии с зависимостями (3), (4). Программа возвращает оптимальные значения параметров настройки и все прямые и косвенные показатели качества работы АСР.

На рисунке 4 изображены графики процессов в имитационной модели АСР (с учетом нелинейностей) при ступенчатом возмущении по каналу регулирования  $\lambda = 10\%$  для трех значений мощности  $N = 20, 50, 100\%$ . Сигнал  $P_{ГПК}$  приведен с коэффициентом  $-5$  для удобства отображения на одном графике с сигналом  $P_{PC}$ .

Установлены параметры регулятора и дифференциатора, рассчитанные на первом этапе (частотны-

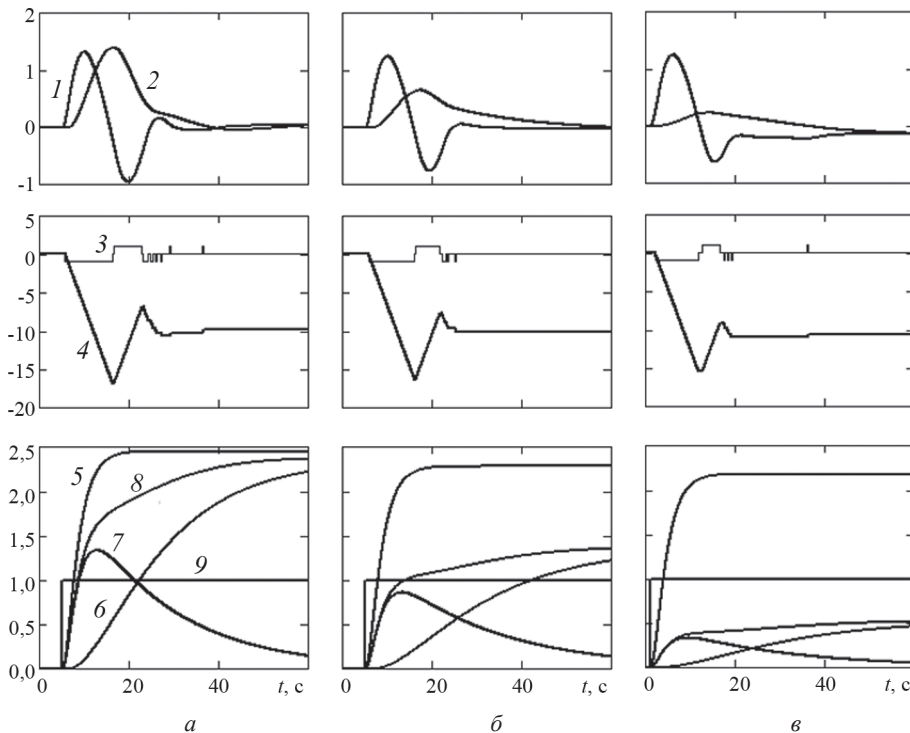


Рис. 4. Процессы в модели АСР при возмущении  $\lambda = 10\%$ :

$a$  —  $N = 100\%$ ;  $б$  —  $N = 50\%$ ;  $в$  —  $N = 20\%$ ; 1 —  $P_{PC}$ ; 2 —  $P_{ГПК} \cdot (-5)$ ; 3 —  $d$  (выход ШИМ); 4 —  $\mu$ ; нижний ряд: процессы в разомкнутой системе: 5 —  $P_{PC}$ ; 6 —  $P_{ГПК} \cdot (-1)$ ; 7 —  $y_d$ ; 8 —  $e$ ; 9 —  $\lambda = 1$

ми методами) в соответствии с мощностью блока. Из представленных графиков рис. 4 видно, что система достаточно эффективна.

Однако указанный эффект достигнут при перестройке параметров настройки АСР в зависимости от мощности, что не согласуется с предъявляемыми условиями эксплуатации. В связи с этим с помощью программы численного эволюционного алгоритма оптимизации [17] выполнен поиск компромиссной [11] настройки системы, обеспечивающей выполнение предъявляемых требований в полном диапазоне изменения мощности блока без изменения параметров регулятора и дифференциатора.

На рисунке 5 и в табл. 2 приведены графики и показатели работы АСР с найденными компромиссными значениями параметров настройки при возмущении  $\lambda = 10\%$  на трех нагрузках блока (10, 50 и 100%). Процессы в нижнем ряду (кривые разгона) демонстрируют работу отдельных составляющих на входе регулятора. На графиках отсутствуют колебания в переходных процессах регулируемой переменной  $P_{ГПК}$  (степень затухания равна единице). Можно считать, что работа настроенной АСР отвечает предъявляемым требованиям.

Полученные на имитационной модели с нелинейными элементами значения параметров настройки регуляторов использованы в системе регулирования давления пара в ГПК на 4-м энергоблоке Кольской АЭС при проведении пусконаладочных испытаний в связи с модернизацией систем управления. На рисунке 6 дан фрагмент переходных процессов регулирования давления пара в ГПК 4-го энергоблока Кольской АЭС при пусконаладочных испытаниях. Полученные кривые переходных процессов показали достаточно хорошее качество регулирования, соответствующее требуемым условиям эксплуатации. Анализ переходных процессов, полученных при испытаниях, и процессов в имитационной модели с нелинейными элементами позволил сделать вывод о пригодности имитационной модели АСР, эффективности принятого критерия оптимальности и методики поиска его минимума.

### Выводы

Предложена имитационная всережимная нелинейная модель АСР давления пара в главном паровом коллекторе (ГПК) второго контура энергоблока с реактором

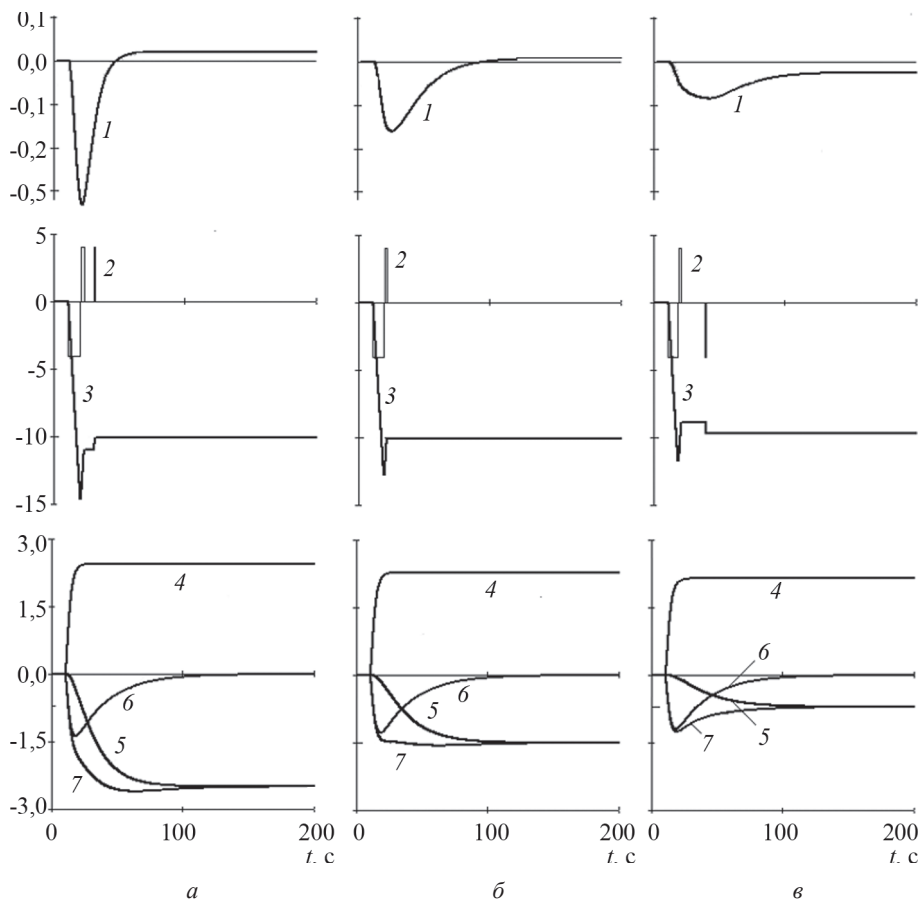


Рис. 5. Процессы регулирования в модели АСР с компромиссными значениями параметров регулятора и дифференциатора: а —  $N = 100\%$ ; б —  $N = 50\%$ ; в —  $N = 10\%$ ; 1 —  $P_{ГПК}$ ; 2 —  $d$  (выход ШИМ); 3 —  $\mu$ ; нижний ряд: процессы в разомкнутой системе: 4 —  $P_{PC}$ ; 5 —  $P_{ГПК}$ ; 6 —  $y_d$ ; 7 —  $e$

## Показатели качества и компромиссные параметры настройки АСР

Мощность блока $N, \%$	10	50	100
Интеграл по модулю $I_{\text{мод}}$	7,138	5,721	7,756
Максимальное отклонение давления $P_{\text{ГПК}}, \% \text{УС}$	0,080	0,153	0,318
Время переходного процесса $T_{\text{пр}}, \text{с}$	132,7	106,7	59,9
Степень затухания $\Psi$	1	1	1
Минимальная длительность импульса $t_{\text{имп}}$	0,5	0,5	0,5
Зона нечувствительности $\Delta, \% \text{УС}$	0,1	0,1	0,1
Число импульсов $n_{\text{имп}}$ за время $T_{\text{пр}}$	3	2	3
Коэффициент ПИ-регулятора $K_{\text{п}}, \% \text{УП}/\% \text{УС}$	9,58	9,58	9,58
Постоянная времени ПИ-регулятора $T_{\text{п}}, \text{с}$	4,96	4,96	4,96
Коэффициент дифференциатора $K_{\text{д}}$	0,734	0,734	0,734
Постоянная времени дифференциатора $T_{\text{д}}, \text{с}$	25,4	25,4	25,4

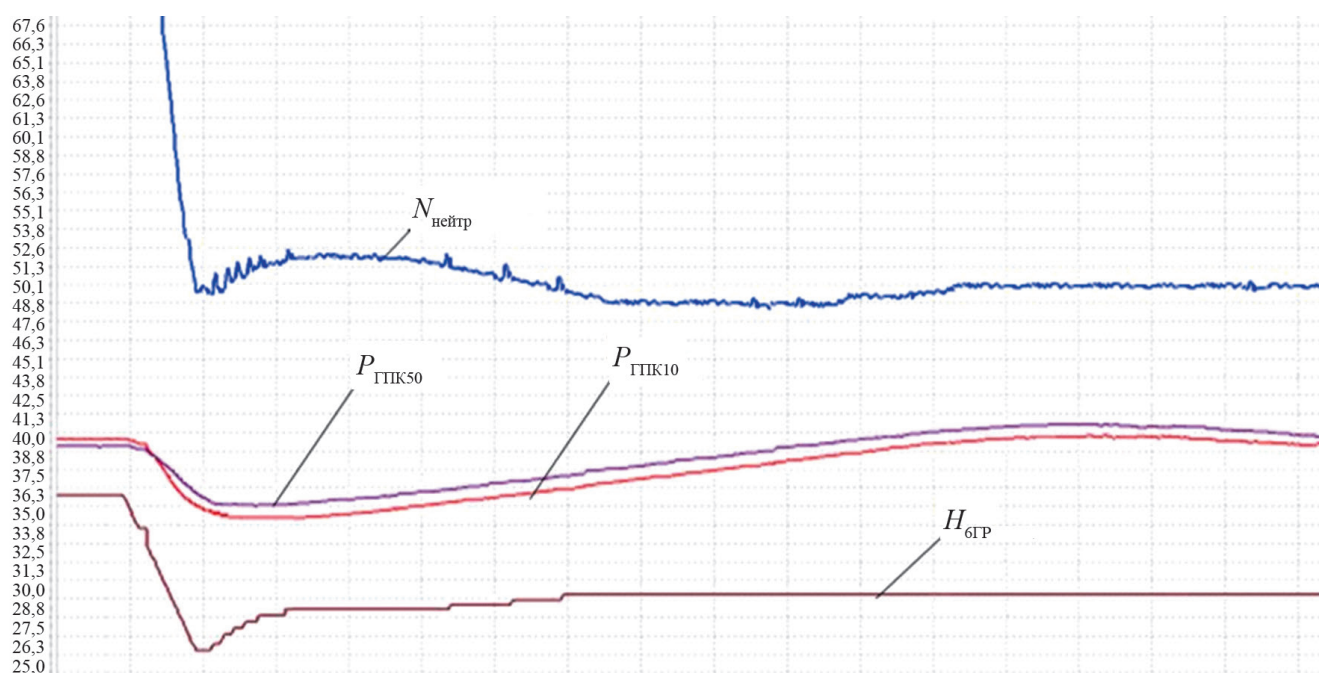


Рис. 6. Переходные процессы регулирования давления пара в ГПК при пусконаладочных испытаниях в режиме отключения трех ГЦН из 6.

ВВЭР. Имитационная модель системы, включая контроллер и исполнительный механизм постоянной скорости, отражает характерные для них реальные свойства.

На основе разработанной имитационной модели и программы эволюционного алгоритма многопа-

раметрической задачи оптимизации получены значения параметров регулятора и дифференциатора, обеспечивающие выполнение заданных требований при работе блока в полном диапазоне изменения нагрузки.

## Литература

1. Плютинский В.И., Погорелов В.И. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1983.

## References

1. Plyutinskiy V.I., Pogorelov V.I. Avtomaticheskoe Upravlenie i Zashchita Teploenergeticheskikh Ustanovok AES. M.: Energoatomizdat, 1983. (in Russian).



2. **Пикина Г.А., Ле Ван Дин, Пашченко Ф.Ф.** Модели динамики реактора ВВЭР с мощностным коэффициентом реактивности // Вестник МЭИ. 2016. № 2. С. 75—83.
3. **Лабутин А.Н. и др.** Нелинейная система каскадно-связанного управления тепловым режимом химического реактора // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. № 3. 2019. С. 41—48.
4. **Зверьков В.П., Кузищин В.Ф., Петроченко Ю.Н.** Моделирование систем управления технологическими процессами в среде Matlab/Simulink. Одноконтурные системы. М.: Изд-во МЭИ, 2018.
5. **Тугашова Л.Г.** Исследование возможности управления процессом ректификации нефти с применением типовых регуляторов // Вестник ЮУГУ. 2016. № 3(16). С. 120—131.
6. **Нестеров Ю.В., Александрова Н.Д., Пикин М.А., Добрый Е.Н.** Модельные исследования системы автоматического регулирования давления пара в главном паровом коллекторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-440 // Энергетик. 2014. № 11. С. 30—33.
7. **Раскин Е.М., Денисова Л.А., Шипилова Ж.В.** Система регулирования давления в главном паровом коллекторе энергоблока АЭС // Омский научный сборник. 2010. № 3(93). С. 209—214.
8. **Надточий П.Н., Федосеев М.И., Денисова Л.А.** Среда проектирования ТЕПРОЛ для разработки и моделирования систем управления // Автоматизация в промышленности. 2019. № 10. С. 60—64.
9. **Пипченко Г.Р. и др.** Применение полномасштабных моделей энергоблока АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 для расчетного моделирования пусконаладочных испытаний // Тяжелое машиностроение. 2016. № 7—8. С. 36—41.
10. **Денисова Л.А.** Моделирование и оптимизация системы регулирования питания парогенератора энергоблока АЭС // Автоматизация в промышленности. 2013. № 7. С. 14—19.
11. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоавтомиздат, 1985.
12. **Бочкарева Е.Ю., Кузищин В.Ф.** Настройка длительности импульсов регуляторов с исполнительным механизмом постоянной скорости // Новое в Российской электроэнергетике. 2009. № 9. С. 35—47.
13. **Зорин В.М.** Атомные электростанции. М.: Издат. дом МЭИ, 2012.
14. **Андрюшин А.В., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И.** Управление и инноватика в теплоэнергетике. М.: Изд-во МЭИ, 2011.
15. **Стефани Е.П.** Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М.: Энергия, 1972.
16. **Миронов В.Д.** Регулирование с опережающим импульсом // Известия ВТИ. 1948. № 8. С. 1—6.
2. **Pikina G.A., Le Van Din, Pashchenko F.F.** Modeli Dinamiki Reaktora VVER s Moshchnostnym Koeffitsientom Reaktivnosti. Vestnik MEI. 2016;2:75—83. (in Russian).
3. **Labutin A.N. i dr.** Nelineynaya Sistema Kaskadno-svyazannogo Upravleniya Teplovym Rezhimom Khimicheskogo Reaktora. Avtomatizatsiya i Modelirovanie v Proektirovanii i Upravlenii;3. 2019:41—48. (in Russian).
4. **Zver'kov V.P., Kuzishchin V.F., Petrochenko Yu.N.** Modelirovanie Sistem Upravleniya Tekhnologicheskimi Protsessami v Srede Matlab/Simulink. Odnokonturnye Sistemy. M.: Izd-vo MEI, 2018. (in Russian).
5. **Tugashova L.G.** Issledovanie Vozmozhnosti Upravleniya Protsessom Rektifikatsii Nefti s Primeneniem Tipovykh Regulyatorov. Vestnik YUUGU. 2016;3(16): 120—131. (in Russian).
6. **Nesterov Yu.V., Aleksandrova N.D., Pikin M.A., Dobryy E.N.** Model'nye Issledovaniya Sistemy Avtomaticheskogo Regulirovaniya Davleniya Para v Glavnom Parovom Kollektore Energebloka AES s Reaktorom VVER-440. Energetik. 2014;11:30—33. (in Russian).
7. **Raskin E.M., Denisova L.A., Shipilova Zh.V.** Sistema Regulirovaniya Davleniya v Glavnom Parovom Kollektore Energebloka AES. Omskiy Nauchnyy Sbornik. 2010;3(93):209—214. (in Russian).
8. **Nadtochiy P.N., Fedoseev M.I., Denisova L.A.** Sreda Proektirovaniya TEPROL dlya Razrabotki i Modelirovaniya Sistem Upravleniya. Avtomatizatsiya v Promyshlennosti. 2019;10:60—64. (in Russian).
9. **Pipchenko G.R. i dr.** Primenenie Polnomasshtabnykh Modeley Energebloka AES s Reaktorami tipa VVER-1000 dlya Raschetnogo Modelirovaniya Puskonaladochnykh Ispytaniy. Tyazheloe Mashinostroenie. 2016;7—8:36—41. (in Russian).
10. **Denisova L.A.** Modelirovanie i Optimizatsiya Sistem Regulirovaniya Pitaniya Parogeneratora Energebloka AES. Avtomatizatsiya v Promyshlennosti. 2013;7: 14—19. (in Russian).
11. **Rotach V.Ya.** Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya Teploenergeticheskimi Protsessami. M.: Energoavtomizdat, 1985. (in Russian).
12. **Bochkareva E.Yu., Kuzishchin V.F.** Nastroyka Dlitel'nosti Impul'sov Regulyatorov s Ispolnitel'nym Mehanizmom Postoyannoy Skorosti. Novoe v Rossiyskoy Elektroenergetike. 2009;9:35—47. (in Russian).
13. **Zorin V.M.** Atomnye Elektrostantsii. M.: Izdat. Dom MEI, 2012. (in Russian).
14. **Andryushin A.V., Sabanin V.R., Smirnov N.I.** Upravlenie i Innovatika v Teploenergetike. M.: Izd-vo MEI, 2011. (in Russian).
15. **Stefani E.P.** Osnovy Rascheta Nastroyki Regulyatorov Teploenergeticheskikh Protsessov. M.: Energiya, 1972. (in Russian).
16. **Mironov V.D.** Regulirovanie s Operezhayushchim Impul'som. Izvestiya VTI. 1948;8:1—6. (in Russian).

17. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610862. Универсальная программа для оптимизации многоэкстремальных задач «Optim-MGA» / Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.

18. **Денисова Л.А., Мещеряков В.А.** Системы регулирования объектов теплоэнергетики: разработка и многокритериальная оптимизация с использованием генетических алгоритмов // Автоматизация в промышленности. 2017. № 9. С. 23—30.

17. **Svidetel'stvo** ob Ofitsial'noy Registratsii Programmy dlya EVM № 2004610862. Universal'naya Programma dlya Optimizatsii Mnogoekestremal'nykh Zadach «Optim-MGA» / Sabanin V.R., Smirnov N.I., Repin A.I. (in Russian).

18. **Denisova L.A., Meshcheryakov V.A.** Sistemy Regulirovaniya Ob'ektov Teploenergetiki: Razrabotka i Mnogokriterial'naya Optimizatsiya s Ispol'zovaniem Geneticheskikh Algoritmov. Avtomatizatsiya v Promyshlennosti. 2017;9:23—30. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Зверьков Владимир Петрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: ZverkovVP@mpei.ru

**Кузищин Виктор Федорович (27.11.1940 — 23.12.2020)** — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ»

**Сабанин Владимир Романович (19.07.1940 — 01.04.2020)** — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ»

#### Information about authors:

**Zver'kov Vladimir P.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: ZverkovVP@mpei.ru

**Kuzishchin Viktor F. (27.11.1940 — 23.12.2020)** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI

**Sabanin Vladimir R. (19.07.1940 — 01.04.2020)** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 15.03.2021

**The article received to the editor:** 15.03.2021