

Математическая модель первого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 и оценка ее динамической точности в переменных режимах

Д.В. Лаврентичев, Ю.С. Тверской
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Современная технология создания многофункциональных АСУТП электростанций требует оценивать управляемость технологического оборудования и эффективность систем управления на более ранних стадиях разработки проекта энергоблока, привлекая для этих целей всережимные математические модели. Однако разрабатываемые для АЭС полномасштабные тренажеры создаются на стадии ввода энергоблока и на ранних стадиях проектирования в цикле принимаемых решений не используются. В связи с этим разработка математических и имитационных моделей, оценка их статической и динамической точности являются актуальными задачами проектирования АСУТП АЭС.

Материалы и методы: При построении математической модели первого контура энергоблока АЭС как полимодельного комплекса применен феноменологический подход, который опирается на методы теории неравновесной термодинамики. Современная неравновесная термодинамика рассматривает практически все интересующие нас энергетические процессы, в том числе сложные процессы тепломеханического движения сред. Из этого следует, что уравнения математических моделей динамики объектов (процессов) управления должны быть согласованы с фундаментальными законами неравновесной термодинамики. Имитационная модель разработана в среде Simulink.

Результаты: Разработана всережимная динамическая математическая модель первого контура энергоблока АЭС, отличающаяся инвариантной и варьируемой частями, что обеспечивает удобство конфигурирования и корректировки модели под параметры другого энергоблока АЭС типа ВВЭР. На основе математической модели и данных по энергоблоку АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 разработана имитационная модель. На основе сравнительного анализа реальных трендов моделируемого энергоблока дана оценка статической и динамической точности модели в диапазоне рабочих нагрузок блока.

Выводы: Разработанная математическая модель первого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 может быть использована для создания полной математической модели блока и включена в состав математического обеспечения стадии функционального проектирования многофункциональных АСУТП энергоблоков АЭС.

Ключевые слова: технология многофункциональных АСУТП, атомная электростанция, математическое моделирование, ядерный реактор, первый контур, имитационная модель, полимодельный комплекс.

The mathematical model of the NPP power unit primary circuit with reactor of PWR-1000 type and evaluation of her dynamic accuracy in variable modes

D.V. Lavrentichev, Yu.S. Tverskoy
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Abstract

Background: Modern technologies of designing multifunctional automated process control systems (APCS) require assessing process equipment controllability and control systems effectiveness at the earlier stages of power unit project development employing for these purposes mathematical models. However, full-scale simulators (FSS), developed for nuclear power plants, are designed at the stage of power unit commissioning and are not taken into account while making decisions at the early design stages. All this makes it urgent to develop mathematical and simulation models and to evaluate their static and dynamic accuracy.

Materials and methods: The all-mode dynamic mathematical model of the NPP power unit primary circuit as a polymodel complex was constructed according to the phenomenological approach, which relies in its basis on the theory of nonequilibrium thermodynamics methods. The modern nonequilibrium thermodynamics considers almost all the energy processes that interest us, including the complex processes of thermal mechanical environments motion. This implies that the equations of mathematical models of control objects (processes) dynamics must be consistent with the fundamental laws of non-equilibrium thermodynamics. The imitating model is developed in the Simulink environment.

Results: An all-mode dynamic mathematical model of NPP power unit primary circuit has been developed. The model has specific invariant and variable parts, which makes it more convenient to configure and adjust to other NPP power units of PWR type. A simulation model has also been developed based on the mathematical model and the data about the NPP power unit with a PWR-1000 reactor. The model static and dynamic adequacy within the workload range was evaluated based on comparative analysis of the real trends of the simulated power unit.

Conclusions: The developed mathematical model of the NPP power unit primary circuit with a PWR-1000 reactor can be used to develop a complete mathematical model of the unit and incorporated into the mathematical software of functional design stage of multifunctional APCS of NPP power units.

Key words: technologies multifunctional APCS, nuclear power plant, mathematic modeling, nuclear reactor, primary circuit, simulation model, poly-model complex.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.047-058

Стратегия развития атомной энергетики предусматривает доведение удельного веса АЭС в общей структуре генерирующих мощностей до уровня 25 %, обеспечив при этом их гарантированную безопасность и технологическую работоспособность в широком диапазоне нагрузок в целях возможного участия энергоблоков АЭС в общем первичном регулировании общесистемных параметров [1, 2].

Инновационное направление эффективного решения этих актуальных задач связано с оснащением энергоблоков многофункциональными автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП). Современная технология создания многофункциональных АСУТП электростанций требует (для повышения уровня проектирования и эксплуатации) оценки управляемости технологического оборудования и эффективности систем управления на более ранних стадиях разработки проекта энергоблока, привлекая для этих целей всережимные математические модели и тренажерные комплексы [3–7].

В основе теории построения высокоточных математических моделей технологических процессов и установок лежат фундаментальные законы неравновесной термодинамики (феноменологический подход), позволяющие получать распределенные трехмерные детерминированные всережимные динамические модели [3, 8].

Однако по ряду объективных трудностей разработки ограничены на уровне моделей с сосредоточенными параметрами. При этом разрабатываемые в соответствии с техническим заданием полномасштабные тренажеры (ПМТ) энергоблоков АЭС создаются, как правило, под готовый проект конкретного энергоблока, и на ранних стадиях разработки проекта энергоблока либо еще не созданы, либо не могут быть сконфигурированы для проведения определенных испытаний (модель используется только в качестве тренажера эксплуатационного персонала) [9–13].

Практически остается нерешенной проблема оценки качества моделей. Актуальность данной проблемы еще более возрастает в том случае, когда исследуемый объект описывается не одной моделью, а полимодельным комплексом [14].

Поэтому задачи, связанные с разработкой математических моделей оборудования АЭС, совершенствованием технологии создания полимодельных комплексов и методов оценки меры адекватности получаемых результатов, являются актуальными задачами современной технологии проектирования.

Ниже представлены результаты разработки динамической математической модели первого контура энергоблока АЭС [7]. Динамическая математическая модель второго контура энергоблока АЭС была опубликована ранее [3].

Математическая модель. Разрабатываемая математическая модель относится к классу полимодельных комплексов, имеет открытую структуру, элементы которой представляют собой технологические участки оборудования.

Технологическая структура первого контура энергоблока АЭС (рис. 1) представляет собой закрытую потоковую систему, содержащую:

- реакторную установку В-320;
- четыре парогенератора ПГВ-1000М (ПГ-1,2,3,4);
- главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ);
- систему компенсации давления в первом контуре.

Особенности технологических процессов первого контура. Теплота, выделяющаяся внутри матриц тепловыделяющих элементов в результате контролируемой и управляемой ядерной реакции расщепления ядер урана тепловыми нейтронами, отводится теплоносителем первого контура, циркулирующим под давлением, через активную зону корпуса реактора.

Нагретый в реакторе теплоноситель поступает во входной коллектор, распределяется по трубкам и, пройдя через них, отдает свою теплоту воде, находящейся в межтрубном пространстве. Образующийся при нагреве питательной воды насыщенный пар, проходя из парового пространства парогенератора через жалюзийный сепаратор, подвергается сушке и затем через патрубки поступает в паровой коллектор.

При изменении средней температуры теплоносителя первого контура в переходных режимах, связанных с нарушением в работе оборудования, и при изменении нагрузки часть его перетекает из компенсатора в контур или из контура в компенсатор по соединительному трубопроводу. При этом ограничение отклонений давления от номинального значения достигается за счет сжатия или расширения паровой подушки в компенсаторе. Водяной объем также участвует в процессе компенсации давления: при расширении пара вода в компенсаторе давления (КД) испаряется, способствуя поддержанию давления, а при сжатии паровой фазы происходит конденсация на поверхности воды, что ограничивает рост давления.

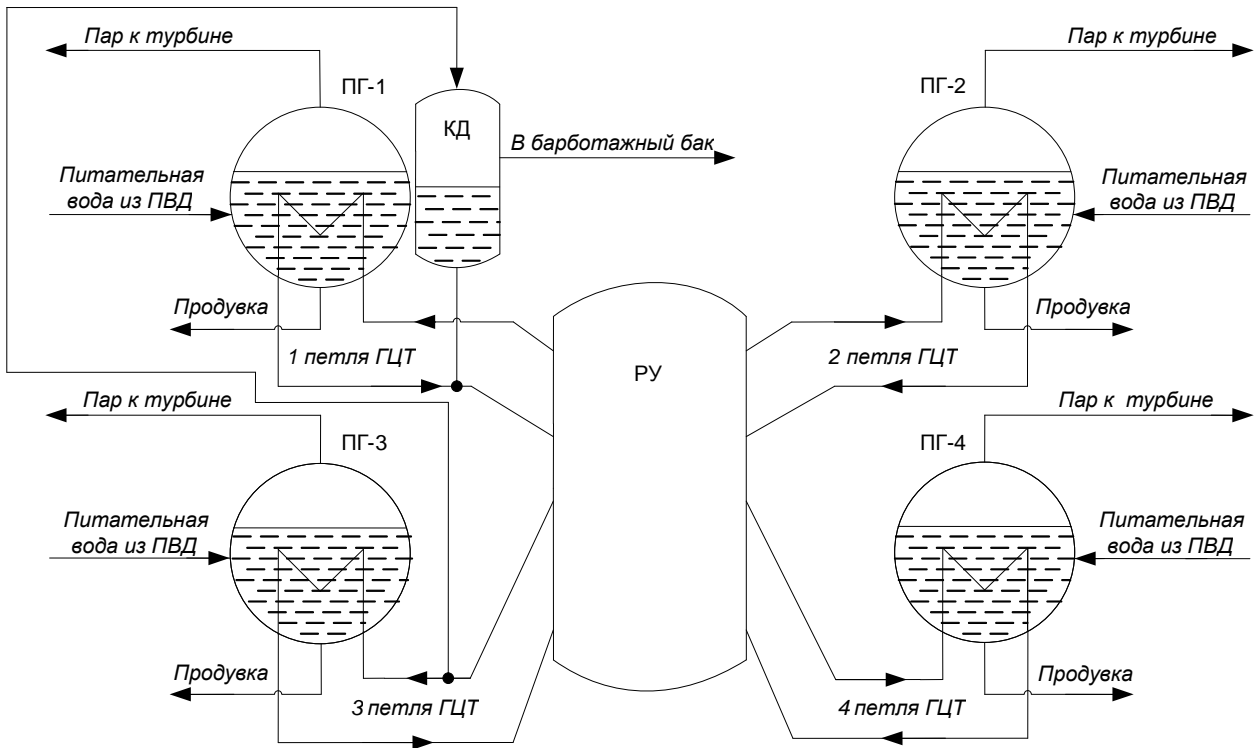


Рис. 1. Технологическая структура математической модели 1-го контура энергоблока АЭС: РУ – реакторная установка; ПГ – парогенератор; ГЦТ – главный циркуляционный трубопровод; КД – компенсатор давления; ПВД – подогреватель высокого давления

При большом росте давления через сопла, расположенные в верхней части КД, по линии впрыска подается теплоноситель из холодной нитки циркуляционного контура для конденсации пара в паровой подушке. Подача «холодного» теплоносителя замедляет или совсем прекращает рост давления в первом контуре. При понижении давления включаются трубчатые электронагреватели, размещенные под уровнем воды в нижней части КД [4].

При выводе уравнений, описывающих процессы, происходящие в первом контуре, принимались следующие допущения:

1) математическая модель представлена в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (модель с сосредоточенным параметром) и соответствующих уравнений состояния;

2) тепловые потери в окружающую среду пренебрежимо малы (отсутствуют);

3) при изменении температуры теплоносителя запаздывание теплового потока учитывается приближенно;

4) полагается, что изменение давления пара перед турбиной и в парогенераторе одинаково;

5) давление во всех точках КД одинаково и равно сумме давлений пара и азота, при этом сжатие пара в КД происходит по линии насыщения;

6) конденсация пара, нагрев впрыскиваемой воды и ее испарение происходят мгновенно.

Математическая модель реакторной установки включает уравнения, описывающие термическую работу нагрева топлива, термическую работу нагрева топливной оболочки, термическую работу теплоносителя в реакторе, кинетическую работу перемещения теплоносителя в реакторе, гидродинамическую работу теплоносителя в реакторе [4, 8, 10–12].

Математическая модель реакторной установки описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{dt_f}{dt} = \frac{Q_p - \frac{L_f}{R_L}(t_f - t_{об})}{C_f G_f}; \quad (1)$$

$$\frac{dt_{об}}{dt} = \frac{\frac{L_f}{R_L}(t_f - t_{об}) - \frac{H_{об}}{R_a}(t_{об} - t_{ср}^{(n)})}{C_{об} G_{об}}; \quad (2)$$

$$\frac{dt^{(n)}}{dt} = \frac{t_{ПГ}^{ВЫХ(n)} - t^{(n)}}{\tau_{ТП2}^{(n)}}; \quad (3)$$

$$\frac{dt^{(n)}}{dt} = \frac{\frac{H_{об}}{R_a}(t_{об} - t_{ср}^{(n)}) - C_f^{(n)} G_f^{(n)}(t^{(n)} - t^{(n)})}{V_T^{A3} \rho_T^{(n)} C_T^{(n)} + C_M^P G_M^P}; \quad (4)$$

$$Q_p = (H_{СТ} \cdot 5,38 + 1388,4) \cdot 1000000, \quad (5)$$

где Q_p – тепловая мощность реактора, Вт; $H_{СТ}$ – положение регулирующей группы стержней, см; t_f – средняя температура топлива, °С; L_f – общая длина тепловыделяющих элементов, м; R_L – термическое сопротивление топлива на единицу

длины тепловыделяющего элемента, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; $t_{об}$ – температура оболочки топлива, °C ; C_T – удельная теплоемкость топлива, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$; G_T – масса горючего, кг ; $H_{об}$ – площадь поверхности топливных оболочек, м^2 ; R_a – термическое сопротивление теплопередаче в канале, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; $t_{cp}^{(n)}$ – средняя температура теплоносителя первого контура в n -петле, °C ; $C_{об}$ – удельная теплоемкость материала оболочки топлива, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$; $G_{об}$ – масса оболочки топлива, кг ; $t^{(n)}$ – температура теплоносителя n -петли на входе в реактор, °C ; $t_{ПГ}^{БЫХ(n)}$ – температура теплоносителя n -петли на выходе из ПГ, °C ; $\tau_{TP2}^{(n)}$ – запаздывание, с ; $t^{(n)}$ – температура теплоносителя n -петли на выходе из реактора, °C ; $C_T^{(n)}$ – удельная теплоемкость теплоносителя n -петли, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$; $G_T^{(n)}$ – расход теплоносителя первого контура в одну нитку n -петли, $\text{кг}/\text{с}$; V_T^{A3} – объем теплоносителя в активной зоне реактора, м^3 ; $\rho_T^{(n)}$ – плотность теплоносителя n -петли, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_M^P – теплоемкость металла корпуса реактора, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$; G_M^P – масса корпуса реактора и его внутрикорпусных устройств, кг ; t – время, с .

Математическая модель парогенератора включает уравнения, описывающие кинетическую работу перемещения подпиточной воды, кинетическую работу перемещения продувочной воды, кинетическую работу перемещения пара, работу гравитационных сил для воды второго контура ПГ, работу гравитационных сил для пара в ПГ, гидродинамическую работу подпиточной воды, гидродинамическую работу продувочной воды, гидродинамическую работу пара в паропроводе, термическую работу нагрева воды второго контура ПГ, термическую работу пара в ПГ, термическую работу парообразования в ПГ.

Математическая модель парогенератора описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{dt_S^{(n)}}{dt} = \frac{H_{ПГ}}{R_{ПГ}} \left(t_{ПГ}^{CP(n)} - t_S^{(n)} \right) - D^{(n)} \left(i^{(n)} - i_{ПВ}^{(n)} \right); \quad (6)$$

$$\frac{dG_B^{(n)}}{dt} = D_{ПВ}^{(n)} - D_{ПР}^{(n)} - D_T^{(n)}; \quad (7)$$

$$\frac{dG_{П}^{(n)}}{dt} = D_T^{(n)} - D_{П}^{(n)}; \quad (8)$$

$$V_B^{(n)} = \frac{G_B^{(n)}}{\rho^{(n)}}; \quad (9)$$

$$\frac{dP^{(n)}}{dt} = \frac{1}{\rho^{(n)}} \left(D_{ПВ}^{(n)} - D_{ПР}^{(n)} \right) + \frac{0,5}{\rho^{(n)}} \left(D_{П}^{(n)} + D_{П}^{КОПП(n)} \right) + \frac{G_B^{(n)} \frac{d\rho^{(n)}}{dP^{(n)}} + G_{П}^{(n)} \frac{d\rho^{(n)}}{dP^{(n)}}}{\rho^{2(n)}} + \frac{1}{r^{(n)}} \left(\frac{1}{\rho^{(n)}} - \frac{1}{\rho^{(n)}} \right) \left(G_{ВВ}^{(n)} - D_{ПВ}^{(n)} \left(i^{(n)} - i_{ПВ}^{(n)} \right) \right) + \frac{1}{r^{(n)}} \left(\frac{1}{\rho^{(n)}} - \frac{1}{\rho^{(n)}} \right) \left(G_B^{(n)} \frac{di^{(n)}}{dP^{(n)}} + G_{П}^{(n)} \frac{di^{(n)}}{dP^{(n)}} \right); \quad (10)$$

$$D_T^{(n)} = \frac{1}{r^{(n)}} \left(G_{ВВ}^{(n)} - \left(G_B^{(n)} \frac{di^{(n)}}{dP^{(n)}} + G_{П}^{(n)} \frac{di^{(n)}}{dP^{(n)}} \right) \times \left. \frac{dP^{(n)}}{dt} - D_{ПВ}^{(n)} \left(i^{(n)} - i_{ПВ}^{(n)} \right) \right); \quad (11)$$

$$\frac{dH^{(n)}}{dt} = \frac{1}{\rho^{(n)}} \frac{dG_B^{(n)}}{dt} + \frac{1}{\rho^{(n)}} \frac{dG_{П}^{(n)}}{dt}; \quad (12)$$

$$\frac{dV_{П}^{(n)}}{dt} = \frac{D_T^{(n)}}{\rho^{(n)}} - \frac{V_{П}^{(n)}}{\rho^{(n)}} \frac{d\rho^{(n)}}{dP^{(n)}} \frac{dP^{(n)}}{dt} - \frac{V_{П}^{(n)}}{T^{(n)}}; \quad (13)$$

$$T^{(n)} = \frac{V_{П}^{(n)} \rho^{(n)}}{D_{П0}^{(n)}}; \quad (14)$$

$$D_{П}^{КОПП(n)} = D_{П0}^{(n)} \frac{P_T^{(n)}}{P_{T0}^{(n)}} Z; \quad (15)$$

$$i_{ПВ}^{(n)} = f(P, t); \quad (16)$$

$$\rho^{(n)} = f(P, t); \quad (17)$$

$$\rho^{(n)} = f(P, t); \quad (18)$$

$$i^{(n)} = f(P, t); \quad (19)$$

$$i^{(n)} = f(P, t); \quad (20)$$

$$D_{П}^{(n)} = D_T^{(n)} \frac{D_{ТН}^{(n)}}{414}; \quad (21)$$

где $t_S^{(n)}$ – температура насыщенного пара в n -ПГ, °C ; $H_{ПГ}$ – площадь поверхности теплообмена в ПГ, м^2 ; $R_{ПГ}$ – термическое сопротивление теплопередаче в ПГ, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; $t_{ПГ}^{CP(n)}$ – средняя температура теплоносителя первого контура в n -ПГ, °C ; $D^{(n)}$ – паропроизводительность n -ПГ, $\text{кг}/\text{с}$; $i^{(n)}$ – энтальпия пара в n -ПГ, $\text{Дж}/\text{кг}$; $i_{ПВ}^{(n)}$ – энтальпия питательной воды n -ПГ, $\text{Дж}/\text{кг}$; $C_{Т2К}^{(n)}$ – удельная теплоемкость теплоносителя второго контура n -ПГ, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$; $V_{Т2К}$ – объем второго контура ПГ, м^3 ; $\rho_{Т2К}^{(n)}$ – плотность теплоносителя второго контура n -ПГ, $\text{кг}/\text{м}^3$; $C_M^{ПГ}$ – теплоемкость металла ПГ, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$; $G_{М2К}^{ПГ}$ – масса ПГ без трубной системы, кг ; $G_B^{(n)}$ – масса воды второго контура в n -ПГ, кг ; $D_{ПВ}^{(n)}$ – расход питательной воды в n -ПГ, $\text{кг}/\text{с}$; $D_{ПР}^{(n)}$ – расход воды второго контура на продувку n -ПГ, $\text{кг}/\text{с}$; $D_T^{(n)}$ – генерация па-

ра в n -ПГ, кг/с; $G_{\text{П}}^{(n)}$ – масса пара в n -ПГ, кг; $D_{\text{П}}^{(n)}$ – расход пара на турбину от n -ПГ, кг/с; $V_{\text{В}}^{(n)}$ – объем воды второго контура в n -ПГ, м³; $\rho^{(n)}$ – плотность воды второго контура в n -ПГ, кг/м³; $P^{(n)}$ – давление в n -ПГ, Па; $i^{(n)}$ – теплота парообразования в n -ПГ, Дж/кг; $\rho^{(n)}$ – плотность пара в n -ПГ, кг/м³; $D_{\text{П}}^{\text{корр}(n)}$ – корректирующий параметр для расхода пара на турбину, кг/с; $Q_{\text{ВВ}}^{(n)}$ – тепловой поток от теплоносителя n -петли, Дж/с; $i^{(n)}$ – энтальпия воды второго контура в n -ПГ, Дж/кг; $i^{(n)}$ – энтальпия пара в n -ПГ, Дж/кг; $D_{\text{П}}^{(n)}$ – генерация пара в n -ПГ, кг/с; $H^{(n)}$ – уровень пароводяной смеси в n -ПГ, м; $F_{\text{З}}$ – площадь зеркала испарения ПГ, м²; φ – объемное паросодержание; $V_{\text{П}}^{(n)}$ – объем пара в n -ПГ, м³; $T^{(n)}$ – постоянная времени для n -ПГ; $D_{\text{П0}}^{(n)}$ – номинальный расход пара на турбину от n -ПГ, кг/с; $D_{\text{П}}^{(n)}$ – расход теплоносителя первого контура в n -нитку, кг/с; $P_{\text{Т}}^{(n)}$ – давление пара перед турбиной n -ПГ, Па; $P_{\text{Т0}}^{(n)}$ – номинальное давление пара перед турбиной n -ПГ, Па; Z – перемещение сервомотора регулирующих клапанов турбины; t – время, с.

Математическая модель главного циркуляционного контура включает уравнения, описывающие кинетическую работу перемещения теплоносителя горячей нитки ГЦТ, кинетическую работу перемещения теплоносителя холодной нитки ГЦТ, гидродинамическую работу теплоносителя горячей нитки ГЦТ, гидродинамическую работу теплоносителя холодной нитки ГЦТ, термическую работу теплоносителя в горячей нитке ГЦТ, термическую работу теплоносителя в холодной нитке ГЦТ.

Математическая модель главного циркуляционного трубопровода описывается следующей системой уравнений:

$$Q_{\text{ВВ}}^{(n)} = D_{\text{П}}^{(n)} C_{\text{П}}^{(n)} (t^{(n)} - t^{(n)}); \quad (22)$$

$$\frac{dt_{\text{П}}^{\text{ВХ}(n)}}{dt} = \frac{t^{(n)} - t_{\text{П}}^{\text{ВХ}(n)}}{\tau_{\text{ТР1}}^{(n)}}; \quad (23)$$

$$\frac{dt_{\text{П}}^{\text{ВЫХ}(n)}}{dt} = \frac{C_{\text{Т}}^{(n)} G_{\text{Т}}^{(n)} (t_{\text{П}}^{\text{ВХ}(n)} - t_{\text{П}}^{\text{ВЫХ}(n)}) - \frac{H_{\text{ПГ}}}{R_{\text{ПГ}}} (t_{\text{П}}^{\text{СР}(n)} - t_{\text{С}}^{(n)})}{C_{\text{Т}}^{(n)} \rho_{\text{Т}}^{(n)} V_{\text{Т}}^{\text{ПГ}(n)} + C_{\text{М}}^{\text{ПГ}} G_{\text{М1К}}^{\text{ПГ}}}; \quad (24)$$

$$\tau_{\text{ТР1}}^{(n)} = \frac{l_1^{(n)}}{w_1^{(n)}}; \quad (25)$$

$$\tau_{\text{ТР2}}^{(n)} = \frac{l_2^{(n)}}{w_2^{(n)}}; \quad (26)$$

$$C_{\text{П}}^{(n)} = f(P, t), \quad (27)$$

где $Q_{\text{ВВ}}^{(n)}$ – тепловой поток от теплоносителя n -петли, Дж/с; $D_{\text{П}}^{(n)}$ – расход теплоносителя пер-

вого контура в n -нитку, кг/с; $C_{\text{П}}^{(n)}$ – средняя изобарная теплоемкость теплоносителя n -петли, Дж/(кг·°С); $t^{(n)}$ – температура теплоносителя n -петли на входе в реактор, °С; $t^{(n)}$ – температура теплоносителя n -петли на выходе из реактора, °С; $t_{\text{П}}^{\text{ВХ}(n)}$ – температура теплоносителя n -петли на входе в ПГ, °С; $\tau_{\text{ТР1}}^{(n)}$ – запаздывание для n -петли, с; $t_{\text{П}}^{\text{ВЫХ}(n)}$ – температура теплоносителя n -петли на выходе из ПГ, °С; $C_{\text{Т}}^{(n)}$ – удельная теплоемкость теплоносителя n -петли, Дж/(кг·°С); $G_{\text{Т}}^{(n)}$ – расход теплоносителя первого контура в одну нитку n -петли, кг/с; $H_{\text{ПГ}}$ – площадь поверхности теплообмена в ПГ, м²; $R_{\text{ПГ}}$ – термическое сопротивление теплопередаче в ПГ, м²·°С/Вт; $t_{\text{П}}^{\text{СР}(n)}$ – средняя температура теплоносителя первого контура в n -ПГ, °С; $t_{\text{С}}^{(n)}$ – температура насыщенного пара в n -ПГ, °С; $\rho_{\text{Т}}^{(n)}$ – плотность теплоносителя n -петли, кг/м³; $V_{\text{Т}}^{\text{ПГ}(n)}$ – объем теплоносителя первого контура в n -ПГ, м³; $C_{\text{М}}^{\text{ПГ}}$ – теплоемкость металла ПГ, Дж/(кг·°С); $G_{\text{М1К}}^{\text{ПГ}}$ – масса металла трубной системы ПГ, кг; $l_1^{(n)}$ – длина трубопровода от реактора до n -ПГ, м; $w_1^{(n)}$ – скорость теплоносителя в трубопроводе от реактора до n -ПГ, кг/с; $\tau_{\text{ТР2}}^{(n)}$ – запаздывание для n -петли, с; $l_2^{(n)}$ – длина трубопровода от n -ПГ до реактора, м; $w_2^{(n)}$ – скорость теплоносителя в трубопроводе от n -ПГ до реактора, кг/с; t – время, с.

Математическая модель системы компенсации давления в первом контуре включает уравнения, описывающие кинетическую работу перемещения теплоносителя на впрыск в компенсатор давления, кинетическую работу перемещения пара в барботажный бак (ББ), кинетическую работу перемещения теплоносителя из нитки в КД, гидродинамическую работу теплоносителя на впрыск в КД, гидродинамическую работу пара, сбрасываемого в ББ, гидродинамическую работу теплоносителя, поступающего из нитки в КД, термическую работу воды на впрыск в КД, термическую работу пара, сбрасываемого в ББ, термическую работу теплоносителя, поступающего из нитки в КД, термическую работу воды в КД, термическую работу пара в КД, термическую работу парообразования в КД, термическую работу конденсации пара, работу гравитационных сил для воды в КД.

Математическая модель системы компенсации давления описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{d\rho_{\text{П}}}{dt} = \frac{d\rho_{\text{П}}}{dt_{\text{КО}}} \frac{dt_{\text{КО}}}{dt}; \quad (28)$$

$$\frac{d\rho_{\Pi}}{dt} = \frac{\rho_{\Pi}}{V - V_B} \frac{dV_B}{dt}; \quad (29)$$

$$\frac{dt_{\text{КО}}}{dt} = \frac{Q_{\text{НАГ}} + G_{\text{ВПР}} \rho_{\text{ХН}} t_{\text{ХН}} + G_1 \rho_B C_B (t_{\text{КО}} - t_{\text{ГН}})}{V_B C_B \rho_B + V_{\Pi} C_{\Pi} \rho_{\Pi}}; \quad (30)$$

$$G_{\text{КИ}} = \frac{1}{(\rho_{\Pi} - \rho_B)} \left[(V - V_B) \frac{d\rho_a}{dt} - \rho_{\Pi} \left(\sum_i G_i - G_{\text{ТЕЧЬ}} + G_{\text{ПК}} \right) \right]; \quad (31)$$

$$\frac{dV_B}{dt} = \sum_i G_i - G_{\text{ТЕЧЬ}} + G_{\text{КИ}} - G_1; \quad (32)$$

$$\frac{dV_{\Pi}}{dt} = \frac{G_{\text{ПК}} \rho_a + G_{\text{КИ}} \rho_B + (V - V_B) \frac{d\rho_{\Pi}}{dt}}{\rho_{\Pi}}; \quad (33)$$

$$G_{\text{ПК}} = K \cdot \sqrt{P_{\text{КО}} - P_{\text{ББ}}}; \quad (34)$$

$$\rho_B = f(P_{\text{КО}}, t_{\text{КО}}); \quad (35)$$

$$\rho_{\text{ХН}} = f(P_{\text{ХН}}, t_{\text{ХН}}); \quad (36)$$

$$\rho_{\text{ГН}} = f(P_{\text{ГН}}, t_{\text{ГН}}); \quad (37)$$

$$C_B = f(P_{\text{КО}}, t_{\text{КО}}), \quad (38)$$

где ρ_{Π} – плотность пара в КД, кг/м³; $t_{\text{КО}}$ – температура в КД, °С; V – объем первого контура, м³; V_B – объем воды в КД, м³; $Q_{\text{НАГ}}$ – тепловыделение от электронагревателей, Дж/с; $G_{\text{ВПР}}$ – расход воды на впрыск в КД, кг/с; $\rho_{\text{ХН}}$ – плотность теплоносителя в холодной нитке, кг/м³; $t_{\text{ХН}}$ – температура теплоносителя в холодной нитке, °С; G_1 – расход теплоносителя, поступающего из первого контура в КД, кг/с; ρ_B – плотность воды в КД, кг/м³; C_B – удельная теплоемкость воды в КД, Дж/(кг·°С); $t_{\text{ГН}}$ – температура теплоносителя в горячей нитке, °С; V_{Π} – объем пара в КД, м³; C_{Π} – удельная теплоемкость пара в КД, Дж/(кг·°С); $G_{\text{КИ}}$ – количество конденсируемого пара в КД, кг/с; ρ_a – плотность азота в КД, кг/м³; G_i – расход теплоносителя в циркуляционном контуре, кг/с; $G_{\text{ТЕЧЬ}}$ – течь из первого контура, кг/с; $G_{\text{ПК}}$ – расход пара через предохранительный клапан, кг/с; K – коэффициент ($\pi \cdot D^2/4$); $P_{\text{КО}}$ – давление в КД, Па; $P_{\text{ББ}}$ – давление в барботажном баке, Па; $\rho_{\text{ГН}}$ – плотность теплоносителя в горячей нитке, кг/м³; $P_{\text{ХН}}$ – давление в холодной нитке, Па; $P_{\text{ГН}}$ – давление в горячей нитке, Па; t – время, с.

Технология разработки расчетной структуры (схема) математической модели первого кон-

тура энергоблока АЭС выполнена на основе агрегативного принципа [15]: технологическое оборудование (ПГ, РУ, КД, ГЦТ) представлено в виде агрегатов – математических объектов, элементами которых являются входные параметры (управляющие и параметры состояния системы) и параметры выходные. При этом выходные параметры одного агрегата являются входными для другого (рис. 2).

Таким образом, построена всережимная (рабочий диапазон нагрузок 80–100 %) многопараметрическая математическая модель первого контура энергоблока АЭС, которая представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений состояния комплекса технологического оборудования.

Имитационная модель. На основе разработанной математической модели была реализована имитационная модель. При этом в качестве исходных данных использованы конструктивные и режимные параметры реального оборудования. Разработка имитационной модели производилась в универсальной среде моделирования Simulink [3, 16, 17].

Для решения систем дифференциальных уравнений выбран многошаговый метод переменного порядка (ode15s), использующий формулы численного дифференцирования. Выбран именно этот метод решения. Выбранный метод решения является адаптивным.

Шаг интегрирования определяется автоматически и меняется в процессе расчета. При этом настройками определено: начальное значение шага, его минимальное и максимальное значение в процессе расчета определяются автоматически. По результатам оценки функционирования модели получены следующие замечания: минимальное значение шага зафиксировано в момент пуска модели ($1 \cdot 10^{-7}$ с), так как в этот момент происходят большие скачки значений параметров; в течение нескольких секунд после запуска модели значение шага увеличивается; максимальные значения шага наблюдаются в установившихся режимах работы модели. При этом имеется возможность моделирования в ускоренном масштабе времени.

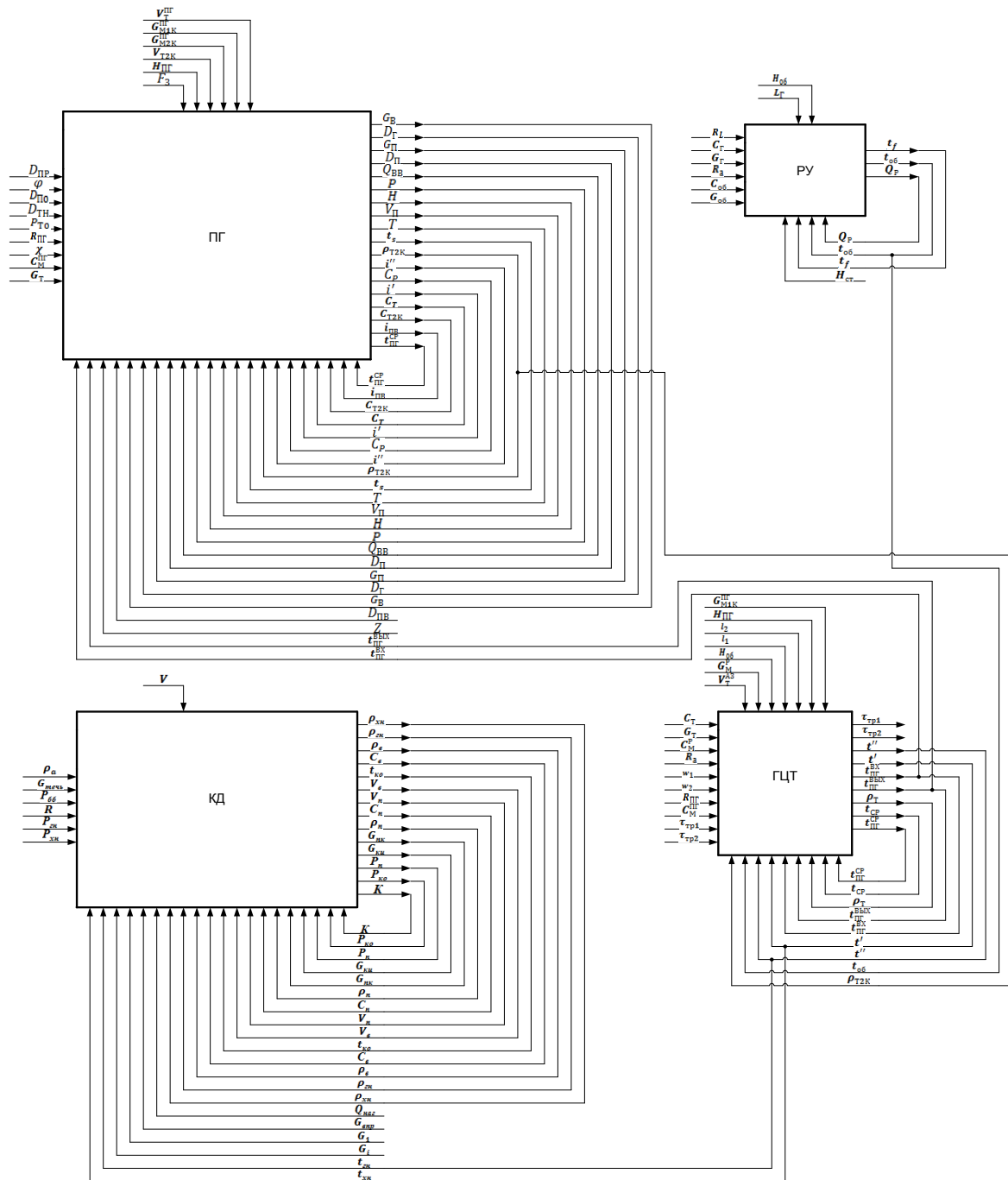


Рис. 2. Схема расчетной структуры математической модели первого контура энергоблока АЭС

Опробованы также методы решения ode23, ode23s, ode23tb, которые могут обеспечить более высокую скорость вычислений, но при этом точность результатов будет снижена. Одношаговые явные методы Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядков (ode45) не обеспечивают решения системы дифференциальных уравнений построенного полимодельного комплекса.

Оценка адекватности математической и имитационной моделей. Методика оценки адекватности математической и имитационной моделей включает два этапа [3, 14, 17, 18].

На первом этапе производилось сравнение проектных (реальных эксплуатационных)

значений параметров на заданном режиме и значений тех же параметров, полученных с помощью имитационной модели.

Рассмотрим номинальный режим, для которого все параметры имитационной модели соответствуют проектным значениям (табл. 1).

Отклонение значений параметров, полученных с помощью имитационной модели, от значений, приведенных табл. 1, не превышает 1%.

На втором этапе оценки адекватности модели был произведен сравнительный анализ графиков процессов, полученных с помощью имитационной модели, и реальных трендов, снятых с

архива действующего энергоблока АЭС при одном и том же возмущающем воздействии (рис. 3).

Таблица 1. Значения основных параметров первого контура при номинальном режиме

Наименование параметра	Значение	
	$N = 100 \%$	$N = 80 \%$
Тепловая мощность реакторной установки, МВт	3000	2400
Температура теплоносителя на входе в ПГ, °С	320	314
Температура теплоносителя на выходе из ПГ, °С	289,7	286,5
Расход питательной воды в ПГ, кг/с	408,33	361,10
Уровень пароводяной смеси в ПГ, м	2,33	2,33
Паропроизводительность ПГ, кг/с	408,33	361,10
Давление генерируемого пара, МПа	6,27	6,27
Температура генерируемого пара, °С	278,5	274,5

В рассмотренном примере в качестве реального объекта выбран энергоблок №3 Калининской АЭС. Для проведения анализа выбран процесс снижения тепловой мощности реакторной установки, а затем ее подъем до номинального значения.

Критерием адекватности модели служит мера оценки значений среднего квадратичного отклонения (СКО) модельных переходных процессов и реальных трендов, а также общий характер их изменения.

Возмущающим воздействием является тренд изменения положения регулирующей группы стержней (рис. 4).

Ниже представлены результаты сопоставления тренда и модели по основным параметрам (рис. 5–9).

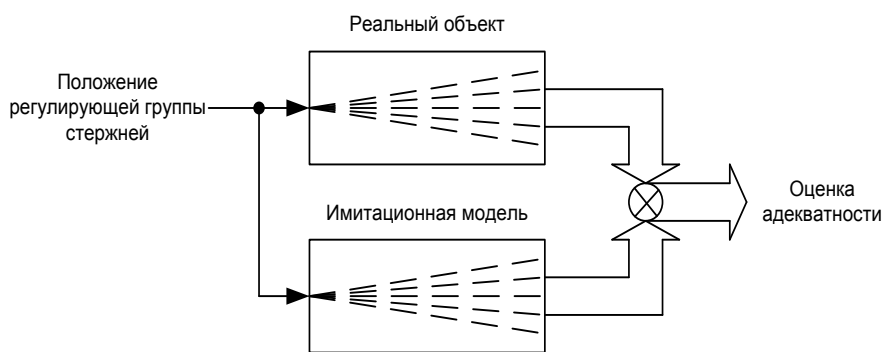


Рис. 3. Схема оценки меры адекватности математической модели

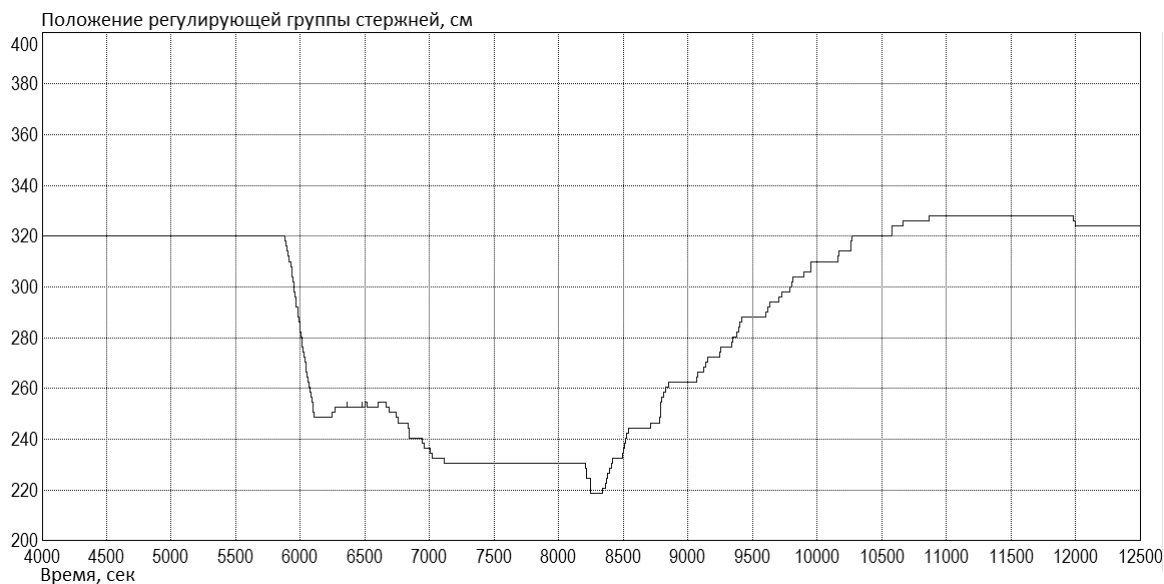


Рис. 4. Положение регулирующей группы стержней (тренд)

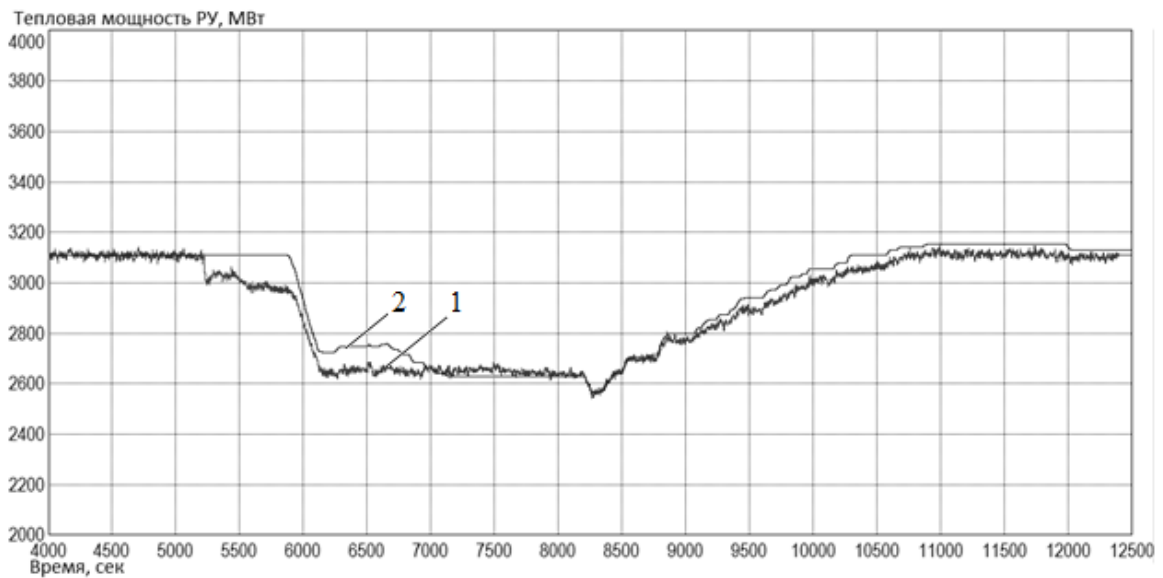


Рис. 5. Тепловая мощность реакторной установки: 1 – тренд; 2 – модель

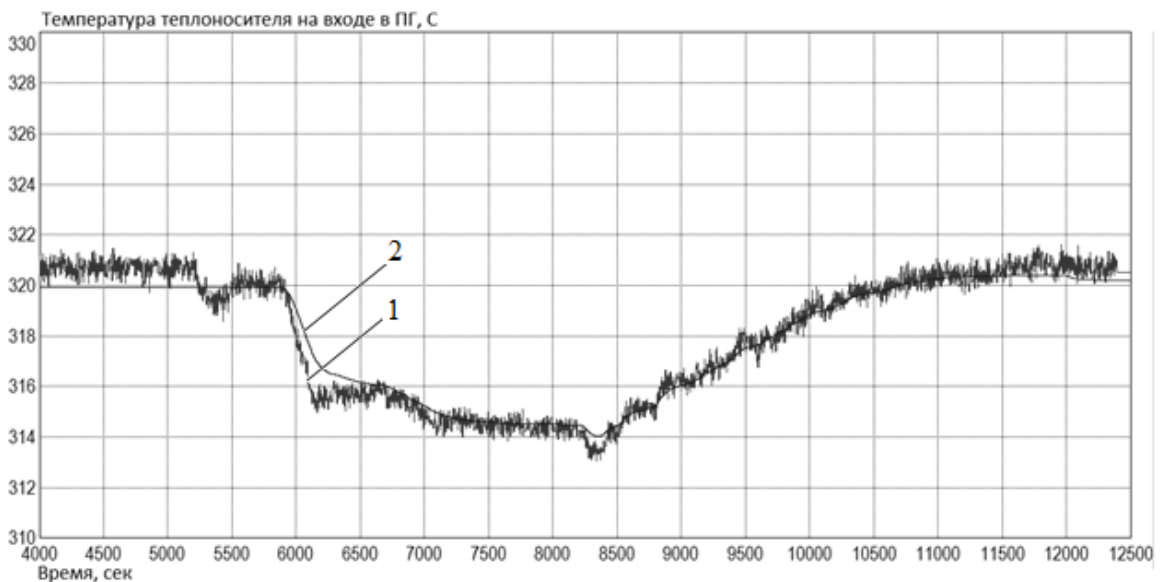


Рис. 6. Температура теплоносителя на входе в ПГ: 1 – тренд; 2 – модель

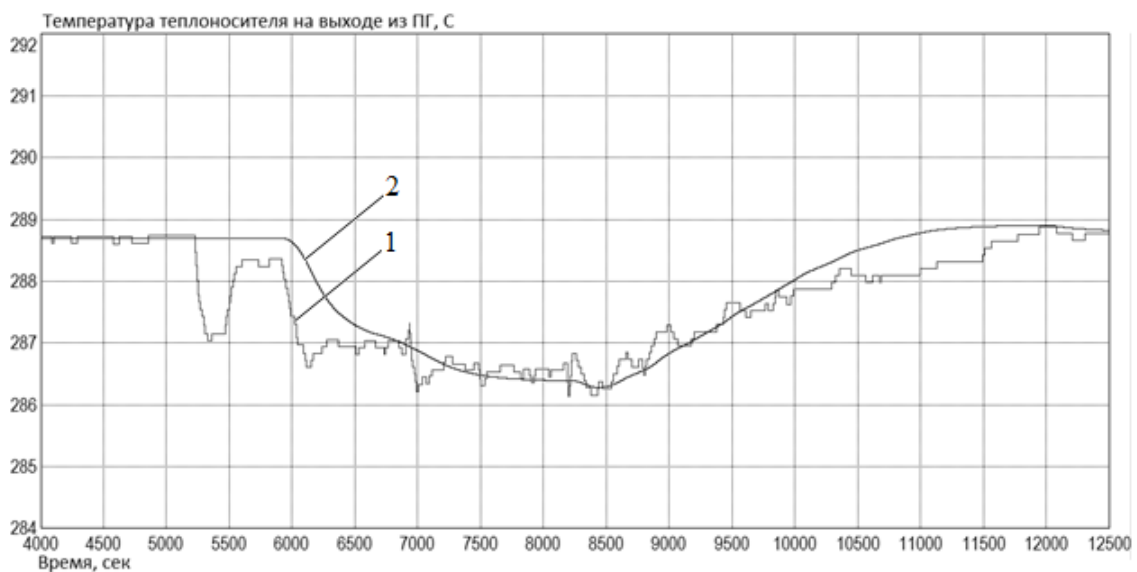


Рис. 7. Температура теплоносителя на выходе из ПГ: 1 – тренд; 2 – модель

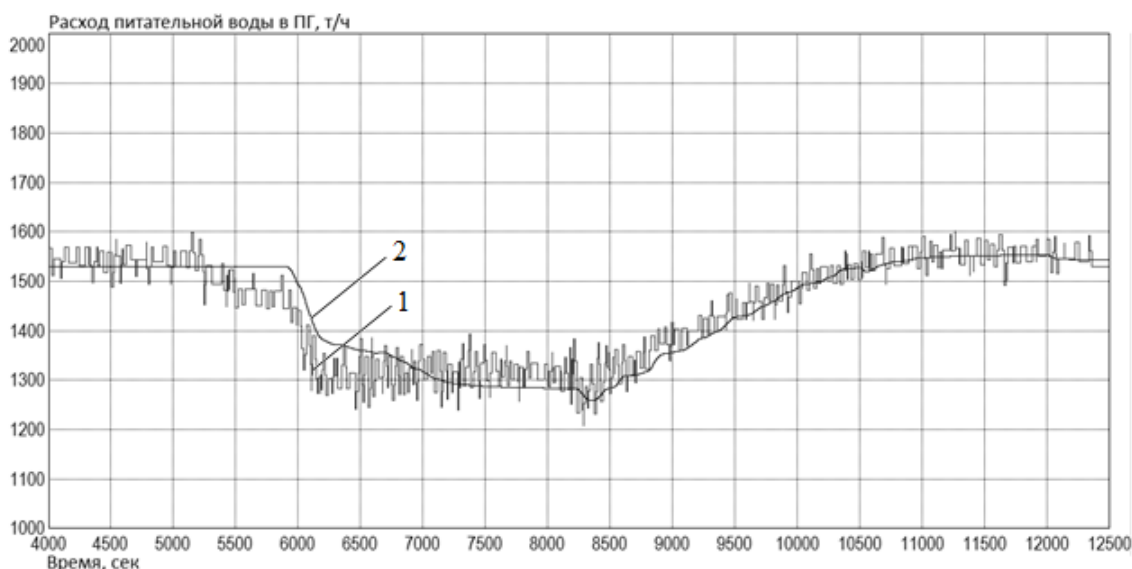


Рис. 8. Расход питательной воды в ПГ: 1 – тренд; 2 – модель

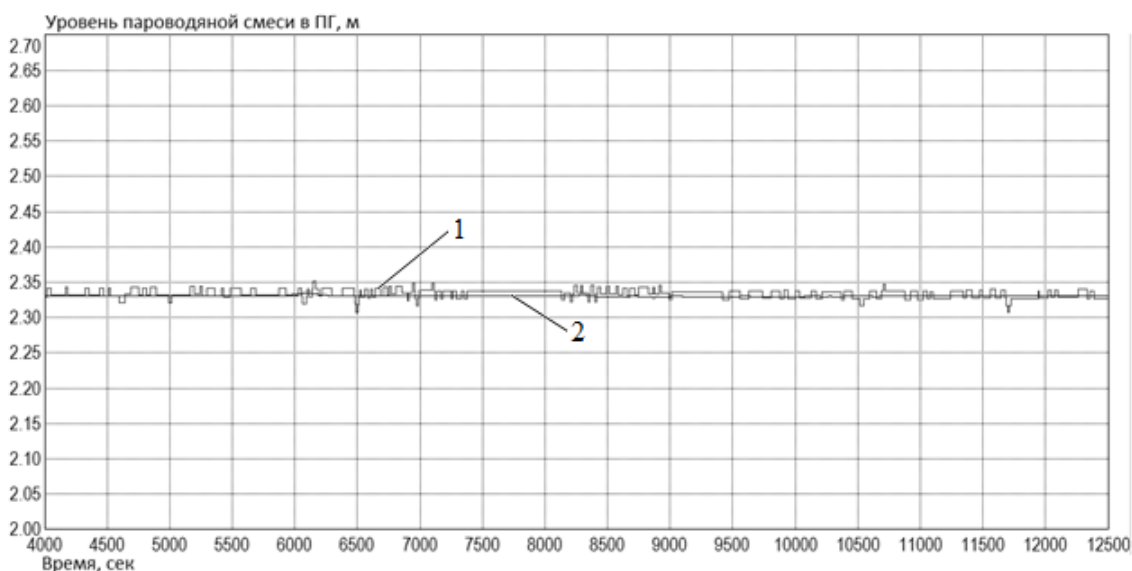


Рис. 9. Уровень пароводяной смеси в ПГ: 1 – тренд; 2 – модель

Анализируя полученные результаты, трудно заметить, что в промежуток времени 5000–7000 с некоторые параметры имеют значительное отклонение. Это связано с тем, что в модели не учтена первопричина возникновения переходного процесса – несанкционированное падение регулирующего стержня в активную зону реактора. Возмущающим воздействием для модели является изменение положения только регулирующей группы стержней.

Оценка меры адекватности разработанной математической и имитационной моделей определена по среднему квадратичному отклонению параметров, полученных посредством имитационной модели, от реальных параметров, полученных из архива АСУТП реального объекта.

Значения СКО (в процентах от номинального значения) для основных параметров представлены в табл. 2.

Таблица 2. СКО для основных параметров

Наименование параметра	СКО, %
Тепловая мощность реакторной установки	6,38
Температура теплоносителя на входе в ПГ	0,76
Температура теплоносителя на выходе из ПГ	0,32
Расход питательной воды в ПГ	6,59
Уровень пароводяной смеси в ПГ	0,21

В результате определено, что СКО по основным параметрам модели, выраженное в процентах от номинального значения, не превышает 7 %. Это говорит о достаточно высокой точности работы разработанной имитационной модели

первого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000.

Заключение

Результаты разработки математической и имитационной модели первого контура энергоблока АЭС могут быть использованы для создания полной математической модели энергоблока АЭС и решения задач функционального проектирования АСУТП, в том числе синтеза новых структур локальных систем автоматического управления.

Список литературы

1. **Стратегия** развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Иллюстрация основных положений. – М.: ФГУП «ЦНИИАтоминформ», 2001. – 64 с.
2. **Баклушин Р.П.** Эксплуатационные режимы АЭС. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – 532 с.
3. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3 кн. / под ред. Ю.С. Тверского; Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование. Кн. 3. Моделирование. – Иваново, 2013. – Кн. 1. – 260 с. – Кн. 2. – 436 с. – Кн. 3. – 176 с.
4. **Демченко В.А.** Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. – Одесса: Астропринт, 2001. – 308 с.
5. **Тверской Ю.С., Голубев А.В., Никоноров А.Н.** Полигон АСУТП электростанций – эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления // Теплоэнергетика. – 2011. – № 10. – С. 70–75.
6. **Жукавин А.П., Лебедев А.О.** Использование математических моделей энергоблока для тестирования алгоритмов систем управления АЭС «Куданкулам» // Теплоэнергетика. – 2011. – № 5. – С. 37–40.
7. **Лаврентичев Д.В., Тверской Ю.С.** Технология разработки и оценка меры адекватности всережимной динамической математической модели первого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 // Автоматизация в промышленности. – 2015. – № 11. – С. 30–33.
8. **Теория** моделей в процессах управления. Информационный и термодинамический аспекты // Б.Н. Петров, Г.М. Уланов, И.И. Гольденблат, С.В. Ульянов. – М.: Наука, 1978. – 223 с.
9. **Опыт** разработки технических средств обучения на базе платформы ЭНИКАД для персонала атомных и тепловых станций / В.А. Чернаков, С.А. Королев, С.Б. Выговский и др.; Экспериментальное научно-исследовательское и конструкторское объединение «Тренажерные системы обучения». – М., 2009. – 25 с.
10. **Демченко В.А., Беглов К.В.** Моделирование технологического участка парогенератор-турбина энергоблока с ВВЭР-1000 по влажности пара // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2003. – № 2. – С. 66–68.
11. **Аникевич К.П., Зацаринная Т.Г.** Математическое моделирование физических процессов в парогенераторе АЭС с ВВЭР-1000 // Сборник научных трудов Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности. – Севастополь: СТУЭИП, 2008. – Вып. 1. – С. 9–19.
12. **Математическая** модель системы питания парогенератора энергоблока АЭС / Л.А. Денисова, Ю.В. Нестеров, Е.М. Раскин, В.П. Сеницын // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 7. – С. 3–7.
13. **Кавун О.Ю., Ходаковский В.В.** Моделирование динамики энергоблока АЭС на многопроцессорных ЭВМ // Теплоэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 29–33.
14. **Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Концептуальные и методические основы квалитетрии моделей и полимодельных комплексов // Труды СПИИРАН. Вып. 2, т. 1. – СПб.: СПИИРАН, 2004. – С. 10–35.

15. **Рыков В.В., Ивницкий В.А., Морозов Е.В.** О работах Н.П. Бусленко в области имитационного моделирования // Информационные процессы. – 2005. – № 3, Т. 5. – С. 177–186.

16. **Дьяконов В.П.** MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Сер. «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

17. **Жукавин А.П., Крошилин А.Е., Фукс Р.Л.** Разработка и особенности верификации тренажерных моделей АЭС // Теплоэнергетика. – 2010. – № 5. – С. 34–38.

18. **Тверской Ю.С.** Локальные системы управления / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 128 с.

References

1. *Strategiya razvitiya atomnoy energetiki Rossii v pervoy polovine XXI veka. Illyustratsiya osnovnykh polozheniy* [Strategy of nuclear energy development in Russia in the first half of the XXI century. Illustration of the main provisions]. Moscow, FGUP «TSNIIatominform», 2001. 62 p.
2. Baklushin, R.P. *Ekspluatatsionnye rezhimy AES* [NPP operational modes]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2012. 532 p.
3. Tverskoy, Yu.S. *Teoriya i tekhnologiya sistem upravleniya. Mnogofunktsional'nye ASUTP teplovykh elektrostantsiy. V 3 kn. Kn. 1. Problemy i zadachi. Kn. 2. Proektirovanie. Kn. 3. Modelirovanie* [Theory and technology of management systems. Multifunction APCS of thermal power plants. In 3 books. Book 1. Problems and tasks. Book 2. Designing. Book 3. Modeling]. Ivanovo, 2013. Book 1. 260 p. Book 2. 436 p. Book 3. 176 p.
4. Demchenko, V.A. *Avtomatizatsiya i modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov AES i TES* [Automation and modeling of technological processes of NPP and thermal power plants]. Odessa: Astroprint, 2001. 308 p.
5. Tverskoy, Yu.S., Golubev, A.V., Nikonorov, A.N. *Poligon ASUTP elektrostantsiy – effektivnoe sredstvo podgotovki spetsialistov i testirovaniya slozhnykh sistem upravleniya* [Proving ground of power plant APCS is an effective means of training specialists and testing complex control systems]. *Teploenergetika*, 2011, no. 10, pp. 70–75.
6. Zhukavin, A.P., Lebedev, A.O. *Ispol'zovanie matematicheskikh modeley energobloka dlya testirovaniya algoritmov sistem upravleniya AES «Kudankulam»* [Using power unit mathematical models for testing control systems algorithms of the NPP «Kudankulam»]. *Teploenergetika*, 2011, no. 5, pp. 37–40.
7. Lavrentichev, D.V., Tverskoy, Yu.S. *Tekhnologiya razrabotki i otsenka mery adekvatnosti vserezhimnoy dinamicheskoy matematicheskoy modeli pervogo kontura energobloka AES s reaktorom tipa VVER-1000* [Technology of development and adequacy assessment of the all-mode dynamic mathematical model of the NPP power unit primary circuit with a PWR-1000 reactor]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2015, no. 11, pp. 30–33.
8. Petrov, B.N., Ulanov, G.M., Gol'denblat, I.I., Ul'yanov, S.V. *Teoriya modeley v protsessakh upravleniya. Informatsionnyy i termodinamicheskyy aspekt* [Models theory in management processes. Informational and thermodynamic aspects]. Moscow: Nauka, 1978. 223 p.
9. Chernakov, V.A., Korolev, S.A., Vygovskiy, S.B., Krayushkin, Yu.V. *Opyt razrabotki tekhnicheskikh sredstv obucheniya na baze platformy ENIKAD dlya personala atomnykh i teplovykh stantsiy* [Experience of developing ENICAD-based technical training aids for personnel of nuclear and thermal stations]. Moscow: Eksperimental'noe nauchno-issledovatel'skoe i konstruktorskoye ob'edinenie «Trenazhernye sistemy obucheniya», 2009. 25 p.
10. Demchenko, V.A., Beglov, K.V. *Modelirovanie tekhnologicheskogo uchastka parogenerator-turbina energobloka s VVER-1000 po vlazhnosti para* [Steam humidity simulation of technological plot «steam generator-turbine» of the power unit with PWR-1000]. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Odessa Polytechnic University]. Odessa, 2003, no. 2, pp. 66–68.
11. Anikevich, K.P., Zatsarinnyaya, T.G. *Matematicheskoye modelirovanie fizicheskikh protsessov v parogeneratorе AES s VVER-1000* [Mathematical modeling of physical processes in the steam generator of NPP with PWR-1000]. *Sbornik nauchnykh*

trudov Sevastopol'skogo natsional'nogo universiteta yadernoy energii i promyshlennosti [Collection of works of the Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry]. Sevastopol', 2008, issue 1, pp. 9–19.

12. Denisova, L.A., Nesterov, Yu.V., Raskin, E.M., Sinitin, V.P. Matematicheskaya model' sistemy pitaniya parogeneratora energobloka AES [A mathematical model of the power supply system of the NPP power unit steam generator]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2010, no. 7, pp. 3–7.

13. Kavun, O.Yu., Khodakovskiy, V.V. Modelirovanie dinamiki energobloka AES na mnogoprotsessornykh EVM [Modeling of NPP dynamics on multiprocessor computers]. *Teploenergetika*, 2005, no. 1, pp. 29–33.

14. Sokolov, B.V., Yusupov, R.M. Kontseptual'nye i metodicheskie osnovy kvalimetrii modeley i polimodel'nykh kompleksov [Conceptual and technical basics of models and multiple-model complexes qualimetry]. *Trudy SPIIRAN Vyp. 2, t. 1*

[SPIIRAS Proceedings. Issue 2, vol. 1]. Saint-Petersburg, SPIIRAN, 2004, pp. 10–35.

15. Rykov, V.V., Ivnitkiy, V.A., Morozov, E.V. O rabotakh N.P. Buslenko v oblasti imitatsionnogo modelirovaniya [On N.P. Buslenko's works in the field of simulation]. *Informatsionnye protsessy*, 2005, no. 3, vol. 5, pp. 177–186.

16. D'yakov, V.P. *MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii* [MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 in mathematics and modeling]. Moscow: SOLON-Press, 2005. 576 p.

17. Zhukavin, A.P., Kroshilin, A.E., Fuks, R.L. Razrabotka i osobennosti verifikatsii trenazhernykh modeley AES [Design and verification of NPP simulator models]. *Teploenergetika*, 2010, no. 5, pp. 34–38.

18. Tverskoy, Yu.S. *Lokal'nye sistemy upravleniya* [Local control systems]. Ivanovo, 2011. 128 p.

Тверской Юрий Семенович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры систем управления,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. А, ауд. 220,
телефон (4932)26-97-58,
e-mail: tverskoy@su.ispu.ru

Лаверентичев Дмитрий Владимирович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры систем управления,
телефон (4932)26-97-58,
e-mail: dlav43@bk.ru