

УДК 001.891.573

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС**ГИЗОВ В.О.<sup>1</sup>, МАЛЫШЕВ В.В.<sup>2</sup>, ПАРФЕНЧИКОВ И.С.<sup>2</sup><sup>1</sup>НИ ТПУ*(Томск, Российская Федерация)*<sup>2</sup>АО «Атомтехэнерго»*(Московский филиал ЦАТЭ, Российская Федерация)*

**Аннотация.** Разработана математическая модель энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР для последующего синтеза систем управления основных агрегатов атомной станции при эксплуатации в маневренном режиме. Представленное аналитическое описание отражает процесс взаимного функционирования реактора, парогенератора и турбогенераторной установки с турбиной К-1200-6,9/50.

**Ключевые слова:** маневренный режим, математическое моделирование, ВВЭР, кинетика ядерного реактора, парогенератор, теплообменный аппарат, турбогенераторная установка, турбина К-1200-6,9/50.

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A NPP POWER UNIT**VYACHESLAV.O. GIZOV<sup>1</sup>, VIKTOR.V. MALYSHEV<sup>2</sup>, ILIYA.S. PARFENCHIKOV<sup>2</sup><sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University*(Tomsk, Russian Federation)*<sup>2</sup>TSentratomtekhenego*(Moscow, Russian Federation)*

**Abstract.** A mathematical model of an NPP power unit with a pressurized water reactor has been developed for the subsequent synthesis of control systems for the main units of a nuclear power plant during operation in a maneuverable mode. The presented analytical description represents the process of mutual functioning of the reactor, steam generator and turbine generator unit with a K 1200-6,9/50 turbine.

**Keywords:** maneuverability, mathematical modeling, PWR, nuclear reactor kinetics, steam generator, heat exchanger, turbine generator, turbine K 1200-6,9/50.

Маневренный режим эксплуатации АЭС, при котором происходит изменение электрической нагрузки, предполагает иной подход к построению систем управления оборудованием атомной станции. Для исследования вопроса обеспечения маневренности реакторной установки с учетом эффекта температурного саморегулирования необходимо анализировать динамику явлений, протекающих непосредственно в ядерном реакторе, в совокупности с поведением основных агрегатов энергоблока, учитывая взаимосвязанные процессы изменения вращающего момента турбины и теплотехнических параметров второго контура.

Основными агрегатами энергоблока атомной станции с реактором типа ВВЭР являются: ядерный реактор, парогенератор и турбогенераторная установка. Разработка математической модели энергоблока, описывающей динамику взаимодействия данных агрегатов, является актуальной задачей для последующей разработки систем управления оборудованием энергоблока в маневренных режимах

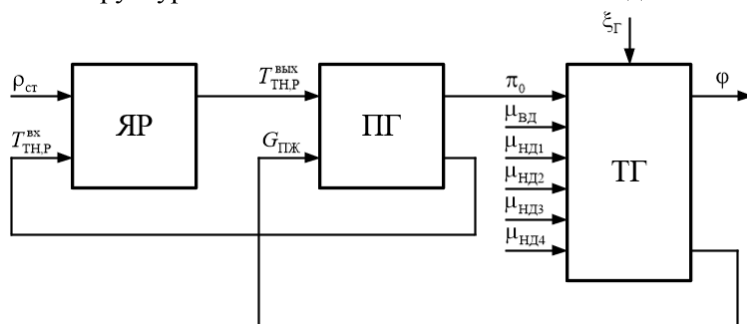
Для анализа нестационарных процессов, протекающих в активной зоне реактора, таких как эффект реактивности, обусловленный перемещением управляющих стержней СУЗ, температурный эффект реактивности и вызываемое им изменение мощности при изменении температуры теплоносителя на входе в реактор, а также тепловые процессы в топливе и теплоносителе, в учебной и исследовательской деятельности активно используются уравнения точечной кинетики ядерного реактора совместно с дифференциальными уравнениями тепловых процессов внутри установки [1, 2, 3].

Парогенератор является промежуточным звеном между водо-водяным ядерным реактором и турбогенераторной установкой и связывает между собой оборудование первого и второго контуров. В связи с этим, моделирование данной установки необходимо при исследовании взаимного функционирования агрегатов энергоблока в различных режимах. Зачастую парогенератор представлен в виде объекта термодинамических и теплофизических

расчетов, как в работе [4], или с точки зрения разработки моделей для рассмотрения процессов сепарации пара в паровом объеме [5], однако они неприменимы для решения поставленной задачи. Динамика паропроизводящей установки описывается сложной системой дифференциальных уравнений, представленной в работе [6], использование которой значительно усложнит процесс математического моделирования. Для сохранения адекватной сложности разрабатываемой модели, парогенератор может быть представлен в виде простейшего теплообменного аппарата, уравнения теплофизических процессов которого приведены в источнике [5].

При математическом моделировании турбогенераторной установки в рамках данной работы необходимо рассматривать паровую турбину как объект автоматического управления. Уравнения динамики паровых турбин активно используются при моделировании и исследовании систем регулирования данного объекта. Рабочим телом турбины является сжимаемая среда (водяной пар), в связи с чем изменение расхода по сечениям проточной части не следуют мгновенно за изменениями расхода через управляющие клапаны. Однако представление турбоагрегата в виде системы с распределенными параметрами значительно усложнит процесс моделирования, в связи с чем необходимо использовать определенную степень дискретизации, что применено в работах [7, 8, 9]. Методика составления аналитического описания, представленного в данных источниках, более подробно описана Калашниковым А.А. [10] и использована в данной работе.

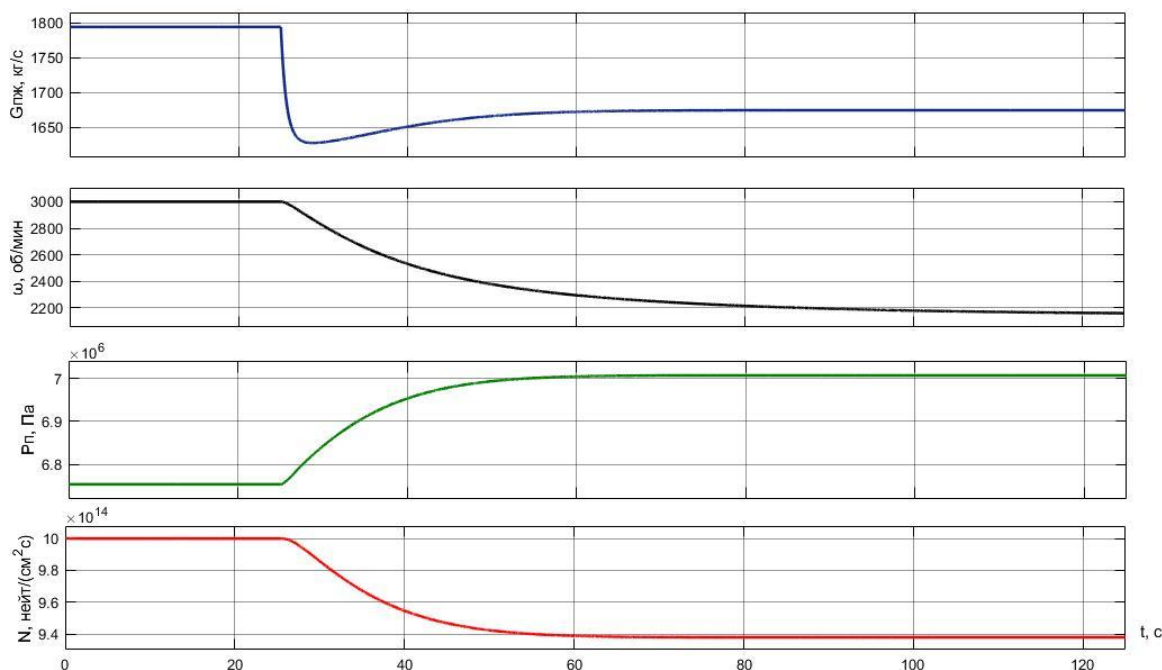
Таким образом, с использованием методик, описанных в источниках [3, 11], разработано математическое описание основных агрегатов, образующих энергетический блок. На рис. 1 представлена структура составленной математической модели.



**Рис. 4.** Структура математической модели энергоблока АЭС: ЯР – система уравнений кинетики ядерного реактора; ПГ – система уравнений динамики парогенератора; ТГ – система уравнений турбогенераторной установки;  $\rho_{ст}$  – реактивность, вносимая стержнями СУЗ;  $T_{ТН,Р}^{вх}$ ,  $T_{ТН,Р}^{вых}$  – температура теплоносителя на входе и выходе из реактора соответственно;  $G_{ПЖ}$  – массовый расход парожидкостной смеси (среды второго контура);  $\pi_0$  – давление свежего пара относительно номинального значения;  $\mu_{вд}$ ,  $\mu_{нд}$  – относительные степени открытия регулирующих клапанов высокого и низкого давления соответственно;  $\xi_G$  – момент сопротивления генератора относительно номинального значения;  $\varphi$  – частота вращения ротора турбины относительно номинального значения

Входными управляющими воздействиями на модель энергоблока являются: реактивность, вносимая стержнями СУЗ, степени открытия регулирующих клапанов высокого и низкого давления паровой турбины; входное возмущающее воздействие – изменение относительного момента сопротивления генератора, вызванное изменением подключенной к его клеммам электрической нагрузки; выходная координата – относительная частота вращения ротора турбины.

Представленная модель учитывает взаимное влияние основных агрегатов АЭС на их работу за счет представленных на рис. 1 петель обратной связи по массовому расходу парожидкостной смеси и температуре теплоносителя на входе в ядерный реактор. На рис. 2 представлены полученные с использованием модели переходные процессы при закрытии клапанов высокого и низкого давления на 10 % в момент времени 25 с.



**Рис. 5.** Переходные процессы: массового расхода среды второго контура (синий), частоты вращения ротора турбины (черный), давления пара на турбину (зеленый), плотности потока нейтронов (красный)

Разработанная математическая модель описывает основные каналы управления энергетического блока АЭС и учитывает взаимное влияние нейтронной мощности реактора и теплофизических параметров первого и второго контуров при различных режимах работы и уровнях мощности энергоблока.

### Список литературы

1. Никулина Е.Н., Северин В.П., Лукинова Д.А. Моделирование переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 с учетом борного регулирования. [Электронный ресурс]. – электрон. справ. – URL: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/34297/1/vestnik\\_KhPI\\_2017\\_51\\_Nikulina\\_Modelirovanie.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/34297/1/vestnik_KhPI_2017_51_Nikulina_Modelirovanie.pdf), (дата обращения: 17.02.2021).
2. Вольман М.А. Моделирование переходных процессов в реакторе ВВЭР-1000 для предварительной подготовки оперативного персонала. – Проблемы энергетики, 2016, вып. 9-10, С. 112–118.
3. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС: Учебное пособие – Одеса: Астропринт, 2001. – 305 с.
4. Ефимов А.В., Каверцев В.Л., Потанина Т.В., Гаркуша Т.А., Есипенко Т.А. Математическая модель горизонтального парогенератора типа ПГВ-1000 энергоблока АЭС с ВВЭР. [Электронный ресурс]. – электрон. справ. – URL: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/8885/1/vestnik\\_HPI\\_2014\\_13\\_Yefimov\\_Matematicheskaya.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/8885/1/vestnik_HPI_2014_13_Yefimov_Matematicheskaya.pdf), (дата обращения: 17.02.2021).
5. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Мечтаева М.Н. Разработка модели процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М. – Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2020, вып. 3, С. 5–15.
6. Кравцов Д.Н., Стопакевич А.А. Разработка и исследование модели парогенератора ПГВ-1000. – Холодильная техника и технология, 2013, т. 49, вып. 5, С. 45–48.
7. Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егупов Н.Д., Корнюшин П.Ю. Исследование и расчет параметров элементов системы регулирования частоты вращения ротора турбины с учетом параметрической неопределенности математической модели. – Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия естественные науки, 2014, вып. 1(52), С. 78–93.

8. Мельников Д.В. Проекционно-матричный метод синтеза контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины. – Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия машиностроение, 2013, вып. 4(93), С. 43–53.
9. Зацаринная Т.Г., Чуклин А.А., Аникевич К.П. Повышение надежности противоразгонной защиты паровой турбины К-1000-60/1500-2. – Энергетические установки и технологии, 2017, т. 3, вып. 1, С. 12–19.
10. Калашников А.А. Динамика регулирования турбин. Москва, Энергоатом-издат, 1999, 328 с.