

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГБЛОКА ПРИ ОПЕРАТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

М.Ю. Тучков

ORCID: 0000-0002-5752-7757 e-mail: TuchkovMU@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

Нововоронеж, Россия

П.В. Поваров

ORCID: 0000-0002-6370-545X e-mail: PovarovPV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

Нововоронеж, Россия

А.И. Тихонов

ORCID: 0000-0002-6402-2036 e-mail: TihonovAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

Нововоронеж, Россия

М.Н. Козловский

ORCID: 0000-0002-0065-9505 e-mail: Kozlovskiy_mn@sniip-atom.ru

ООО «Инновационная фирма СНИИП АТОМ»

Москва, Россия

В.П. Поваров

ORCID: 0000-0001-9092-9160 e-mail: povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

Нововоронеж, Россия

Исследуется проблематика использования математических моделей энергоблоков при оперативной эксплуатации современных атомных электрических станций (АЭС). Возможности новейших автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) позволяют с помощью датчиков вести контроль базовых показателей работы блока: нейтронного потока, расхода, температуры, давления. В переходных процессах, когда количество поступающих сигналов растет лавинообразно, вероятность неправильных действий или пропуск правильного управляющего действия могут стать причиной нарушения нормальной эксплуатации. Опасность также представляют медленно изменяющиеся параметры. Процесс, потенциально приводящий к нарушению эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации, может развиваться в течение длительного времени. Очевидно, для отслеживания этих негативных тенденций от оператора требуется проводить анализ архивных данных.

Естественным развитием систем верхнего блочного уровня энергоблока является создание подсистем АСУ ТП для формирования советующих решений, позволяющих снизить информационную нагрузку на оператора при анализе большого объема архивных и текущих данных. Одним из инструментов для решения этой задачи при оперативной эксплуатации энергоблока является использование математической модели энергоблока, интегрированной в состав АСУ ТП.

Ключевые слова: ВВЭР-1200, модель энергоблока, система информационной поддержки оператора, сигнализация, функции СИПО, валидация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тучков, М.Ю. Использование программной модели энергоблока при оперативной эксплуатации / М.Ю. Тучков, П.В. Поваров, А.И. Тихонов, М.Н. Козловский, В.П. Поваров // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 2. С. 58-68 DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_58

USE OF POWER UNIT SOFTWARE MODEL DURING OPERATION

M.Yu. Tuchkov

ORCID: **0000-0002-5752-7757** e-mail: **TuchkovMU@nvnpp1.rosenergoatom.ru**
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP
Novovoronezh, Russia

P.V. Povarov

ORCID: **0000-0002-6370-545X** e-mail: **PovarovPV@nvnpp1.rosenergoatom.ru**
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP
Novovoronezh, Russia

A.I. Tikhonov

ORCID: **0000-0002-6402-2036** e-mail: **TihonovAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru**
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP
Novovoronezh, Russia

M.N. Kozlovskiy

ORCID: **0000-0002-0065-9505** e-mail: **Kozlovskiy_mn@sniip-atom.ru**
JSC «SNIIP»
Moscow, Russia

V.P. Povarov

ORCID: **0000-0001-9092-9160** e-mail: **povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru**
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP
Novovoronezh, Russia

Abstract. Problems of power unit mathematical model use during operation of modern nuclear power plants (NPP) are researched. Capabilities of the latest automated process control systems (APCS) allow, with the help of sensors, to monitor the unit performance basic indicators: neutron flux, flow rate, temperature, pressure. In transients, when the number of incoming signals increases in an avalanche manner, the probability of incorrect actions or skipping of correct control action can cause disruption of normal operation. Slowly changing parameters are also dangerous. Process that potentially leads to a breach of operational limits and limits of safe operation can develop during long time. Obviously, to track these negative trends, the operator is required to analyze archived data.

Natural development of the power unit upper block level systems is the creation of APCS subsystems for the formation of advisory solutions that reduce the information load on the operator when analyzing a large volume of archival and current data. One of the tools for solving this problem during operation of the power unit is the use of power unit mathematical model integrated into APCS.

Key words: PWR-1200, power unit model, operator information support system, alarm system, ISOS-functions, validation.

FOR CITATION: M.Yu. Tuchkov, P.V. Povarov, A.I. Tikhonov, M.N. Kozlovskiy, V.P. Povarov. Use of power unit software model during operation. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 58-68.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_58

Введение

В комментариях к НП-001-15 (РБ-152-18) [1] указано, что требование п.3.4.5.1 ставит перед разработчиком проекта атомных станций (АС) задачу отыскания такого способа обобщения информации о текущем состоянии безопасности АС, который позволил бы оператору по минимальному числу обобщенных параметров быстро оценить обстановку на блоке АС и принять решение. Обобщенная информация о текущем состоянии реакторной установки (РУ) и блока АС в целом также может быть получена в результате вычислений, реализуемых си-

ствием информационной поддержки оператора. Хорошей практикой является учет возможности диагностики состояния АС посредством системы информационной поддержки оператора при разработке руководств по управлению запроектными (в том числе? тяжелыми) авариями [2]. Основой функционирования системы информационной поддержки оператора (СИПО) в части принятия решений в задачах управления технологическим процессом является модель энергоблока, позволяющая проводить моделирование различных режимов эксплуатации.

ООО «ИФ СНИИП АТОМ» разработан макет СИПО энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС, в составе которого реализована, в том числе, программная модель (ПМ) энергоблока, включающая в себя:

- распределенную динамическую модель нейтронно-физических и тепло-гидравлических процессов в активной зоне;
- одномерную двухфазную модель тепло-гидродинамических процессов в основном оборудовании первого и второго контуров;
- модель основных регуляторов, защит и блокировок, реализованных в системах безопасности и управления реактором;
- модель электрогенератора и основных систем собственных нужд энергоблока.

Характерной особенностью расчета реакторных установок является взаимное влияние нейтронно-физических и теплофизических процессов в активной зоне. Это приводит к необходимости проведения сопряженных расчетов, когда результаты нейтронно-физического расчета становятся выходными параметрами для теплофизического расчета и наоборот. В дополнение к этому, различные регулирующие воздействия со стороны АСУ ТП оказывают влияние как на нейтронно-физические, так и на теплофизические процессы. В результате процедура осуществления расчета развития физических процессов энергоблока выглядит как последовательный циклический вызов всех трех расчетных компонентов математической модели (рис. 1). По окончании цикла расчетов производится возврат в начало цикла и запуск следующего цикла. Характерная величина глубины расчета по времени за один цикл составляет 0,1 с. Для инициализации начального состояния модели используются пакеты данных, формируемые системой верхнего блочного уровня (СВБУ). В качестве инициализирующего может использоваться как последний поступивший от СВБУ пакет данных, так и один из пакетов, записанных в архив. Пакеты данных формируются в СВБУ и поступают в ПМ с периодичностью 1 раз в секунду и записываются в архив, поэтому запуск расчета с помощью ПМ может быть произведен с состояния энергоблока на произвольную дату и время с точностью до секунды, на которую имеются архивы эксплуатационных данных.

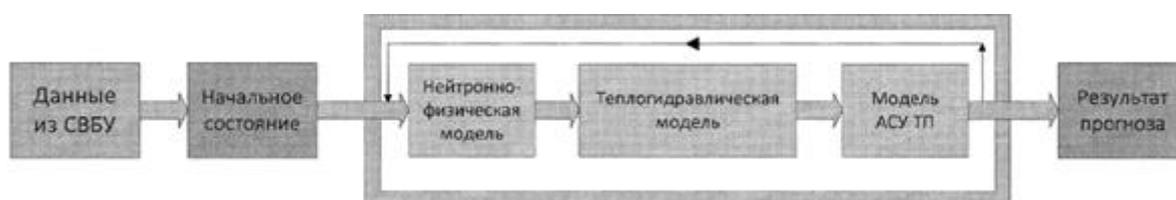


Рис. 1. Блок-схема основного расчетного цикла

Fig. 1. Block diagram of the main calculation cycle

Одним из преимуществ программной модели является ее быстродействие, позволяющее осуществлять расчет со скоростью на порядок, превышающей скорость протекания реального технологического процесса.

Нейтронно-физическая модель активной зоны

Модель энергоблока позволяет использовать на выбор одну из следующих моделей активной зоны реактора:

- точечная модель активной зоны, рассматривающая реактор в точечном приближении;
- распределенная нейтронно-физическая модель активной зоны.

Точечное приближение позволяет рассчитывать изменение мощности реактора без учета пространственного распределения делящихся материалов, шлаков и отравителей в активной зоне, а также расположения отдельных органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). Точечная модель нейтронной кинетики используется для моделирования таких переходных режимов энергоблока, при которых пространственное распределение нейтронного поля реактора не успевает заметно измениться. Неравномерность нейтронного поля, а, следовательно, и поля энерговыделения по активной зоне не оказывает существенного влияния на протекающие процессы. Полагаем, что за время протекания переходных процессов не изменяются концентрация борной кислоты и отравление реактора ксеноном и самарием. Модель кинетики реактора при представлении спектра запаздывающих нейтронов шестью группами имеет вид:

$$M_k: \begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{1}{\ell} \rho n - \frac{1}{\ell} \beta n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_i}{dt} = \frac{1}{\ell} \beta_i n - \lambda_i C_i \\ \rho = \alpha_T (\theta_c - \theta_{c0}) + \alpha_r (\theta_r - \theta_{r0}) + \alpha_p \mu_p \end{cases} \quad (1)$$

где:

$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$;

n – нейтронный поток;

ℓ – среднее эффективное время жизни запаздывающих нейтронов в реакторе;

C_i – концентрация источников нейтронов i -й группы;

β_i – постоянная распада источников запаздывающих нейтронов;

λ_i – постоянная распада ядра-излучателя i -группы;

β – общая доля запаздывающих нейтронов относительно полного числа мгновенных нейтронов;

ρ – реактивность реактора, которая изменяется вследствие изменения температуры топлива и теплоносителя, положения регулирующих стержней и считается аддитивно зависящей от этих факторов;

α_T, α_r – температурные коэффициенты реактивности теплоносителя и ядерного топлива (UO_2);

θ_r, θ_c – температура ядерного топлива (UO_2) и средняя температура теплоносителя;

α_p – коэффициент эффективности регулирующих стержней;

μ_p – относительное перемещение этих стержней.

Точечная модель кинетики реактора достаточно правильно описывает динамику интегральных характеристик реактора. Распределенная нейтронно-физическая модель активной зоны реализована на базе программного комплекса SVS-kr, который включает в себя комплексы программ SVL и SVC. Программный комплекс SVL предназначен для подготовки нейтронно-физических констант. Программный комплекс SVC используется для трехмерного нейтронно-физического расчета активных зон. Вышеперечисленные программные комплексы аттестованы Ростехнадзором (аттестационные паспорта № 247, № 248, № 249). Заявленная точность программных комплексов по различным параметрам приводится в аттестационных паспортах. Дискретизация активной зоны для трехмерного нейтронно-физического расчета производится покассетно. Каждая тепловыделяющая сборка (ТВС) разбивается на 16 участков по высоте. Поскольку активная зона содержит 163 ТВС, расчетная модель активной зоны состоит из 2608 расчетных призм.

Теплогидравлическая модель

Теплогидравлическая модель реализована на базе расчетного кода собственной разработки. В расчетном коде реализована одномерная двухфазная теплофизическая модель, охватывающая основные процессы, протекающие в системах энергоблока. Система главных уравнений, описывающих процессы тепломассопереноса в первом и втором контурах энергоблока, может быть записана следующим образом.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \alpha \rho_f}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho_f \mathbf{v}_f) - \Gamma \quad (2)$$

$$\frac{\partial (1-\alpha) \rho_g}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho_g \mathbf{v}_g) + \Gamma \quad (3)$$

Уравнение сохранения импульса (уравнение Навье-Стокса):

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{v}_f}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho_f \mathbf{v}_f \otimes \mathbf{v}_f) + \mathbf{D}_f - \nabla p - \rho_f \mathbf{g} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_g \mathbf{v}_g}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho_g \mathbf{v}_g \otimes \mathbf{v}_g) + \mathbf{D}_g - \nabla p \quad (5)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho_f \frac{\partial h_f}{\partial t} = -(\rho_f \mathbf{v}_f \nabla h_f) + Z_{Tf} + \alpha \frac{\partial p}{\partial t} - Z_{\Gamma f} \quad (6)$$

$$\rho_g (1-\alpha) \frac{\partial h_g}{\partial t} = -(\rho_g \mathbf{v}_g \nabla h_g) + Z_{Tg} + (1-\alpha) \frac{\partial p}{\partial t} + Z_{\Gamma g} \quad (7)$$

Уравнения состояния (замыкающие соотношения):

$$\begin{aligned} \rho &= f_1(p, h) \\ \frac{\partial \rho}{\partial p} &= f_2(p, h) \\ \frac{\partial \rho}{\partial h} &= f_3(p, h) \\ T &= f_4(p, h) \\ \mu &= f_5(T) \end{aligned} \quad (8)$$

где:

v – скорость; ρ – плотность;

α – объемная доля воды;

Γ – межфазный перенос массы;

P – давление; h – энтальпия;

λ – теплопроводность;

μ – коэффициент динамической вязкости;

T – температура;

D – диссипативный член;

Z_T – член учитывающий теплообмен через стенку и межфазный теплообмен;

Z_{Γ} – член учитывающий перенос тепла при изменении фазового состояния;

g – ускорение свободного падения;

f, g – индексы для жидкой и паровой фазы, соответственно.

В дополнение к вышеприведенным уравнениям записывается уравнение переноса нерастворимых примесей для моделирования транспорта борного поглотителя в первом контуре реакторной установки. Совместное решение системы уравнений (2)-(8) позволяет получить набор значений теплофизических величин (давление, энтальпия, температура, плотность для каждого объема расчетной схемы), а также значения массовых скоростей для каждой гидравлической связи расчетной схемы. В силу того, что решаемые уравнения нестационарны, получаемое решение является набором состояний рассматриваемой системы для раз-

личных срезов по времени на произвольную глубину прогнозирования вперед от некоторого заданного начального состояния.

Система уравнений (2)-(8) после дискретизации решается с помощью численных методов. Дискретизация подразумевает разбиение элементов расчетной схемы на отдельные расчетные узлы и связи. Теплогидравлическая модель энергоблока создается из набора расчетных схем, которые представляют собой наборы взаимосвязанных элементов оборудования. Расчетные схемы могут включать:

- трубы и камеры смешения;
- баки с уровнем раздела фаз;
- гидравлические связи между отдельными элементами;
- трубчатки теплообменных аппаратов;
- запорно-отсечную и регулируемую арматуру, обратные клапаны;
- насосы;
- электронагреватели;
- турбинные ступени.

На рис. 2-4 представлены расчетные схемы первого контура, системы продувки-подпитки и второго контура соответственно.

Модель АСУ ТП

Модель АСУ ТП реализована на базе отдельного программного модуля, обобщающего логику работы модельных схем контроля и управления. Комплект расчетных схем для модели АСУ ТП формируется с помощью редактора схем, который является составной частью программной среды «КРУИЗ». Наборы совместно скомпилированных схем воспроизводят алгоритмы работы основных регуляторов энергоблока, а также защит и блокировок. Расчетные схемы формируются на основе GET-схем типовых программно-технических средств (ТПТС), а также технического проекта АСУ ТП энергоблока и документации генерального конструктора РУ, поэтому модель АСУ ТП в целом повторяет логику, заложенную в АСУ ТП энергоблока. Общее количество расчетных схем системы управления составляет примерно 1000 единиц. Важно отметить, что алгоритмы работы регуляторов блока, ТЗБ, защиты в программную модель блока верифицированы по результатам пусконаладочных работ (ПНР).

Важно оптимизировать степень детализации расчетной схемы модели блока, для адекватного моделирования характерных переходных процессов. Валидация ПМ была проведена на базе архивных данных, полученных на этапе опытно-промышленной эксплуатации при проведении ПНР энергоблока. ПМ за счет своей высокой адекватности позволяет значительно «приблизиться» к реальному объекту, что обеспечивает отличие между результатами виртуальных и натуральных испытаний в пределах $\pm 5\%$.

В ПМ энергоблока разработаны модели основных исполнительных механизмов, включая электродвигатели и приводы задвижек.

К основным параметрам регулирования энергоблока относятся:

- мощность реактора;
- давление пара во втором контуре;
- давление в первом контуре;
- уровень в компенсаторе давления;
- уровень в парогенераторе;
- скорость разогрева-расхолаживания первого контура и компенсатора давления.

NOV6_1k

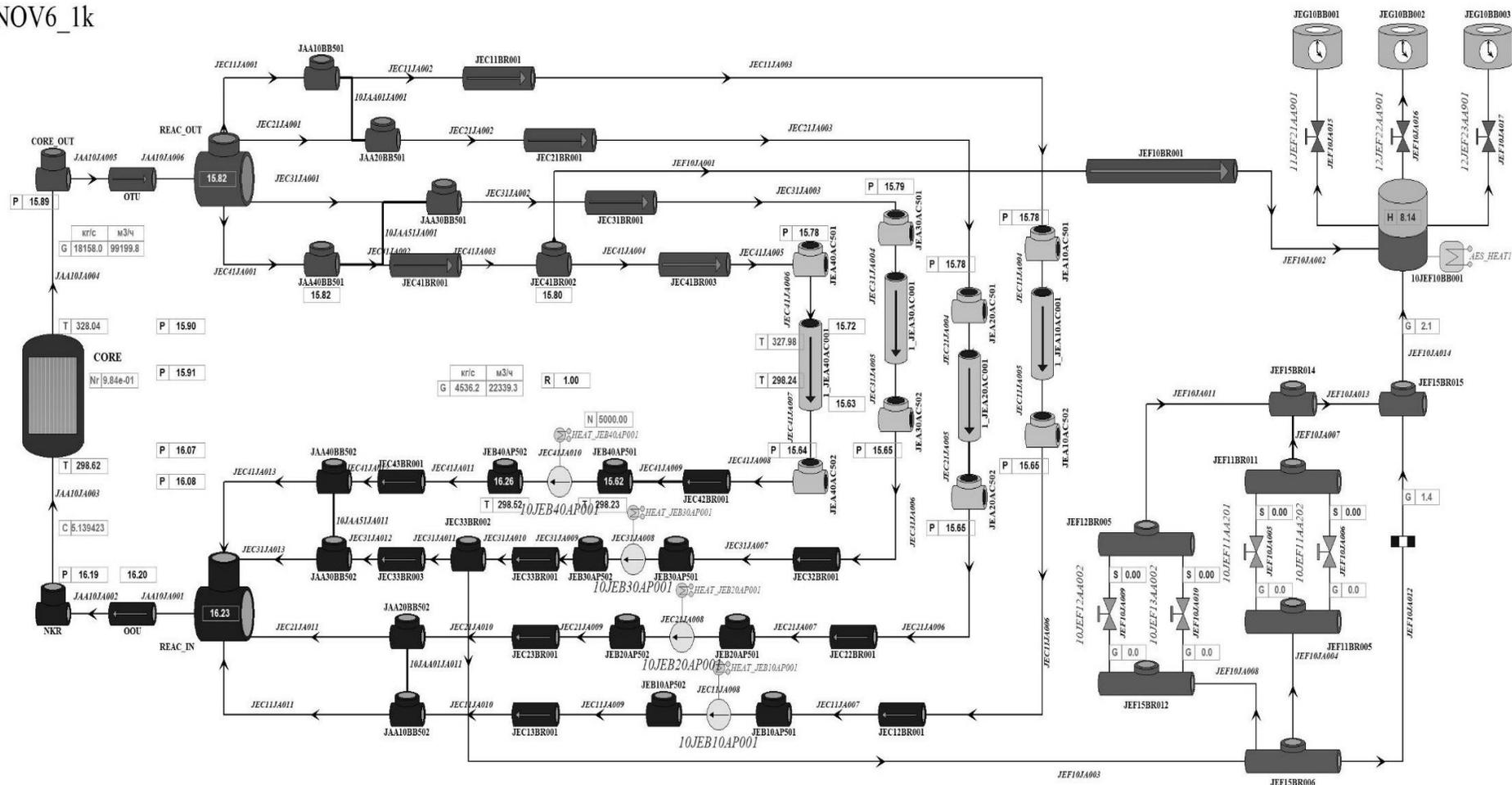


Рис. 2. Расчетная схема первого контура

Fig. 2. Design scheme of first circuit

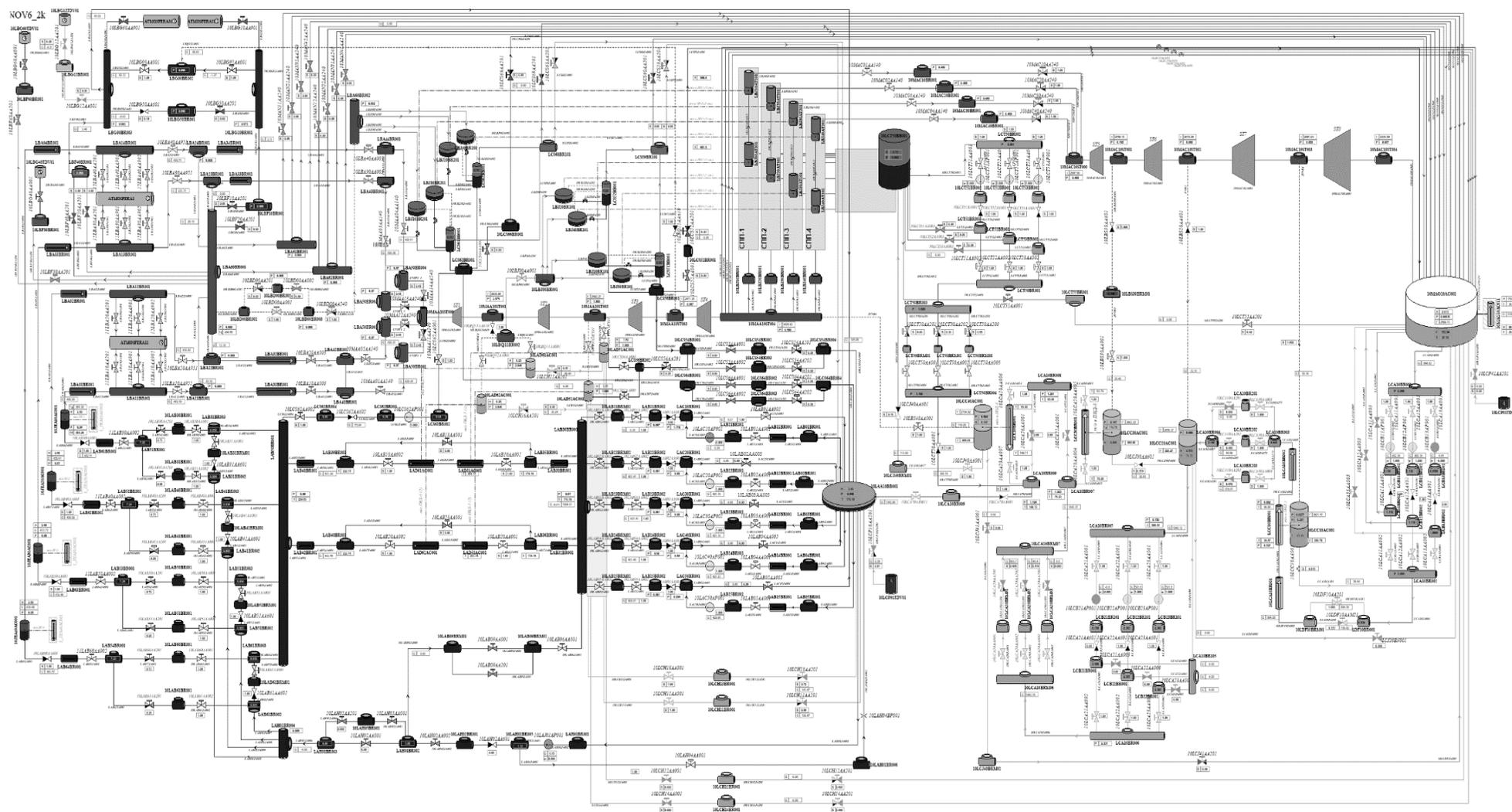


Рис. 4. Расчетная схема второго контура

Fig. 4. Design scheme of second circuit

Системы регулирования управляют мощностью реактора и турбины таким образом, чтобы при желаемом уровне мощности первый и второй контуры работали в энергетическом и материальном балансе. Особенностью моделирования регуляторов (и модели АСУ ТП в целом) является то, что отдельные параметры не только уточняются в процессе пусконаладочных работ, но и претерпевают изменения. В таком случае модель узла регулирования проходит через серию последовательных этапов:

- создание прототипа модели регулятора;
- разработка алгоритмов управления согласно проектной документации;
- тестирование и настройка параметров модельного регулятора по эксплуатационным данным;
- корректировка модели регулятора при изменении его параметров на энергоблоке в процессе пусконаладочных работ.

Функции СИПО

Спектр задач, решаемый с помощью ПМ, весьма разнообразен. В системе информационной поддержки оператора (СИПО) осуществляется мониторинг основного оборудования энергоблока. Функция предназначена для раннего выявления нарушений в работе основного оборудования энергоблока и систем контроля путем решения следующих задач:

- моделирование в реальном времени основного технологического процесса энергоблока (включая нейтронно-физический расчет активной зоны; теплогидравлический расчет первого и второго контуров, моделирование работы автоматики АСУ ТП);
- контроль достоверности показаний датчиков систем нормальной эксплуатации (СНЭ) и систем безопасности (СБ), в том числе, путем анализа взаимного соответствия показаний датчиков и расчетных величин;
- контроль состояния основного оборудования (положение арматуры, включение насосов, уровни в баках и т.д.) с выводом обобщенной и детализированной информации;
- суммирование текущего ресурса насосов, количества циклов открытия-закрытия арматуры, срабатываний предохранительных клапанов (если есть датчики);
- формирование архива для выявления медленно изменяющихся изменений характеристик оборудования (производительности, изменение эффективности теплообменников и т.д.)

Взаимное сравнение показаний замеров, получаемых из системы верхнего блочного уровня (СВБУ) и расчетных величин позволяют выявить деградацию средств измерений (при расхождении значений расчетной величины с измеряемой). Контроль автоматического управления (сравнение работы блочной АСУ ТП с моделью алгоритмов) позволяет выявить неработоспособные модули и недостоверность показаний концевых выключателей.

Еще одной функцией СИПО, основанной на быстродействии модели, является автоматическое прогнозирование параметров состояния основного оборудования энергоблока с выдачей предупредительной сигнализации о прогнозируемом выходе контролируемых параметров за эксплуатационные пределы в предположении отсутствия управляющих действий оператора в интервале времени, на который рассчитывается прогноз, начиная с текущего состояния. Таким образом, будущие события могут быть предсказаны с высокой точностью. А своевременное уведомление оператора о возможном выходе параметра за установленные пределы позволяет исключить нарушение нормальной эксплуатации. Прогнозирование развития технологического процесса также может быть запросным. В СИПО возможно моделирование последовательности событий и, после анализа результатов расчета, выбора наиболее оптимальная стратегия управления энергоблоком, функция СИПО «Рекомендации по управлению технологическим процессом» при этом будет осуществлять контроль правильности выбранной последовательности шагов.

Заключение

Прогнозирование состояния энергоблока в режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации возможно с помощью программной модели энергоблока, подстраиваемой по эксплуатационным данным и включающей в себя нейтронно-физический расчет активной зоны реактора, теплогидравлический расчет первого и второго контуров и модель автоматики, управляющей основным технологическим оборудованием энергоблока.

Использование ПМ в широком диапазоне задач позволяют автоматизировать часть функций, возложенных на оператора. В настоящее время не идет речь о полной замене оператора подобными компьютерными системами. Последнее слово в принятии решения остается за человеком. Сейчас СИПО является инструментом по снижению информационной нагрузки операторов. Однако в дальнейшем, с увеличением контролируемых параметров, подобные системы станут необходимостью [3], а часть управляющих воздействий им можно будет делегировать.

Библиографический список

1. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Комментарии к федеральным нормам и правилам «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП 001 15). РБ-152-18, М.: Ростехнадзор, 2018.
2. **Стацура, Д.Б.** Использование программной модели блока при совершенствовании проектных решений и оптимизации управления технологическим процессом [Текст] / Д.Б. Стацура., М.Ю. Тучков, П.В. Поваров, А.И. Тихонов, С.П. Падун, А.П. Воробьев, М.М. Майорова // Известия вузов. Ядерная энергетика. №4. 2020. С37-49.
3. **Гусев, И.Н.** О проблеме интеллектуальной поддержки операторов для современных автоматизированных систем управления технологическим процессом энергоблоков с ВВЭР [Текст] / И.Н. Гусев, В.П. Поваров, М.Ю. Тучков, А.С. Кужиль, М.М. Майорова, С.П. Падун // Ядерная и радиационная безопасность. № S1. 2019. С. 46-54.

*Дата поступления
в редакцию: 30.03.2022*