

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ВВЭР НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

С.А. Качур

*Севастопольский государственный университет
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33*



Цель исследования – разработка метода идентификации процесса кипения в каналах активной зоны ВВЭР и модели информационно-измерительной системы с использованием метода на основе сетей Петри для более эффективного управления теплообменом в активной зоне реактора при нештатных ситуациях.

При этом решаются две задачи: создание метода идентификации наиболее «горячих» точек распределения паросодержания в камере смешения, соответствующих наибольшим значениям объемного паросодержания; разработка модели управления информационно-измерительной системой в процессе этой идентификации как составляющей системы управления мощностью реактора.

Предложено производить идентификацию процесса кипения в активной зоне реактора по информации оптической информационно-измерительной системы, расположенной по периметру камеры смешения. Разработанный метод контроля паросодержания в камере смешения назван методом наиболее «горячих» точек для ядерного реактора. Метод основывается на решении систем линейных уравнений, описывающих различные схемы использования информации от оптических датчиков.

Разработаны схема адаптивной системы управления теплообменом ядерного реактора и соответствующая ей модель на основе метода наиболее «горячих» точек и расширения сетей Петри, позволяющая учитывать стохастический характер процесса теплообмена, что дает возможность повышения на порядок скорости реагирования и принятия решения в нештатных ситуациях.

Ключевые слова: ядерный реактор, теплообмен, паросодержание, идентификация, контроль, сети Петри.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие атомной энергетики неразрывно связано с прогрессом в области управления и дальнейшей автоматизации ядерных энергетических установок. Активные зоны реакторов крупных АЭС имеют сложные структуры с большим количеством тепловыделяющих сборок и регулирующих органов, работающих в напряженных условиях. Для решения задачи оптимизации энерговыделения в таких активных зонах и повышения экономичности работы АЭС потребовалась разработка специальных средств и устройств автоматики, обеспечивающих контроль и управление подобны-

© С.А. Качур, 2020

ми ядерными реакторами. Эти средства должны позволять выравнять энерговыделение по радиусу и высоте активной зоны, справляться с возникающими в больших реакторах нестабильностями при сохранении всех требований обеспечения ядерной безопасности, не допуская выключения АЭС, так как это связано со значительными экономическими потерями [1].

Стремление достичь высоких экономических показателей современных энергетических реакторов приводит к тому, что реакторы, как правило, работают на предельных тепловых нагрузках. Особенности динамики полей энерговыделения больших реакторов таковы, что даже при сохранении среднего потока по пространству активной зоны локальные «перекосы» мощности могут привести к тяжелым последствиям. Природа возмущений различна и может носить как внешний, так и внутренний характер [1].

Локальные возмущения теплофизического и гидродинамического характера обычно сопряжены со случайными перераспределениями потока теплоносителя и его пульсациями, максимальными отклонениями давления теплоносителя и температур топлива и теплоносителя от своих номинальных значений, что может послужить причиной возникновения незапланированного поверхностного или объемного кипения и, как следствие, кризиса теплообмена со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Вопросам, связанным с идентификацией, контролем и управлением процессом кипения в ВВЭР в нештатных ситуациях, опасностям кризиса теплообмена посвящено большое число монографий и статей [1 – 16]. Описание функционирования ядерной энергетической установки при локальных возмущениях как случайного процесса, основными показателями которого в режиме предельных тепловых нагрузок являются параметры поверхностного кипения, а именно, давление теплоносителя, температура теплоносителя в камере смешения, среднее объемное паросодержание [7], позволяет использовать в качестве основы адаптивной системы модели на базе стохастических сетей Петри (СП) [9].

Целью данного исследования является разработка метода идентификации процесса кипения в каналах активной зоны ВВЭР и модели информационно-измерительной системы с использованием сетей Петри для более эффективного управления теплообменом в активной зоне реактора при нештатных ситуациях. Решаются задачи

- создания метода идентификации наиболее «горячих» точек распределения паросодержания в камере смешения;
- разработки модели управления информационно-измерительной системой в процессе этой идентификации как составляющей системы управления мощностью реактора.

МЕТОД НАИБОЛЕЕ «ГОРЯЧИХ» ТОЧЕК (МНГТ) АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА

Структура метода во многом определяется возможностями информационно-измерительной системы (ИИС). ИИС включает в себя аппаратный комплекс (совокупность датчиков и вычислительную технику) и программный комплекс (программно реализованное устройство управления датчиками и программы обработки результатов измерений). Предполагается использование измерительной системы на основе оптических датчиков, в частности, волоконно-оптических датчиков (ВОП-датчиков) с сопряженными с ними источниками света. В настоящее время ведутся разработки подобных измерительных систем, в частности, возможные подходы к их созданию изложены в [10, 11].

Пусть используемые в методе k датчиков и соответственно k источников света

объединены в кольцевую волоконно-оптическую структуру, расположенную по периметру верхней шахты реактора, т.е. каждому датчику или источнику света соответствует определенный сектор этой кольцевой структуры. Разобьем активную зону реактора на l областей, каждая из которых включает в себя p зон, состоящих из n межзонных ячеек, охватывающих m каналов. Точность метода определяется размером ячейки. Направления измерения датчиков фиксируются под таким углом, чтобы на первом этапе можно было определить объемное паросодержание для всех центров областей, на втором – для центров выбранных зон, на третьем – для центров выбранных межзонных ячеек, на четвертом – два ортогональных профиля тепловыделения ячейки, позволяющих определить объемное парообразование каналов. Для определения информации в конкретных точках (центры ячеек) необходимо выполнение трех условий:

- совпадение местоположений центров областей и зон с ячейками;
- пересечение в точке не менее двух линий направления наблюдения;
- отсутствие других точек пересечения кроме указанных.

Измерения производятся в дискретные моменты времени. Устройство управления вырабатывает вектор управляющих сигналов активизации датчиков (подключения источников света), определяя схему измерения в текущий момент времени. Результатом компьютерной обработки информации по l -му активизированному датчику (направлению наблюдения) измерительной системы в текущий момент времени является объемное паросодержание z_l .

На основании знания z_l для выбранной схемы измерения можно определить НГТ, используя описание в виде системы алгебраических уравнений.

Пусть производится измерение l датчиками по l направлениям для определения объемного паросодержания в m точках объема камеры смешения. Определение значения параметра в точках можно произвести, решая систему линейных алгебраических уравнений вида

$$\begin{aligned} b_{11}\alpha_1 + b_{12}\alpha_2 + \dots + b_{1m}\alpha_m &= z_1, \\ b_{21}\alpha_1 + b_{22}\alpha_2 + \dots + b_{2m}\alpha_m &= z_2, \\ \dots & \\ b_{l1}\alpha_1 + b_{l2}\alpha_2 + \dots + b_{lm}\alpha_m &= z_l, \end{aligned} \tag{1}$$

где m – общее число рассматриваемых точек; b_{ji} – коэффициент, принимающий значение из множества $\{0;1\}$ (если $z_j = 0$ или $z_i = 0$, то $b_{ji} = 0$; иначе $b_{ji} = 1$); α_i – значение параметра объемного паросодержания в i -й точке; z_j – измерение, отражаемое j -м датчиком ($j = 1, \dots, l$) по выбранному направлению.

Процесс нахождения множества НГТ является итерационным, т.е. включающим в себя выбор с соответствующим приближением НГТ (точек с наибольшим значением рассматриваемого параметра по принятой градации) и локализацию поиска. Каждому этапу поиска соответствует своя схема расположения датчиков и своя система алгебраических уравнений.

Необходимо отметить, что рассматриваются только датчики, для которых измеренное по направлению паросодержание не равно нулю. Таким образом, из системы (1) удаляются уравнения с нулевым свободным членом $z_j = 0$, и все α_i из этих уравнений автоматически становятся равными нулю. Следовательно, размерность системы линейных уравнений не является постоянной и определяется количеством датчиков, дающих ненулевое значение объемного паросодержания.

Метод идентификации состояния активной зоны предполагает, что распределение объемного паросодержания α описывается нормальным законом со средним значением $\langle \alpha \rangle$ и дисперсией σ_α^2 . Это дает возможность определить допустимые ин-

тервалы для паросодержания.

Приведем формулы и выводы, необходимые для дальнейших расчетов.

1. Вероятность избежать резонансного захвата

$$p = \exp\{-1/(Ap)\}, \quad (2)$$

где A – константа, зависящая от состава топлива и его распределения в решетке; p – плотность воды. Учитывая, что $p = \rho_0(1 - \alpha)$, ρ_0 – начальная плотность воды, α – объемное паросодержание, получим из (2) соотношение

$$p = \exp\{-1/(A\rho_0(1 - \alpha))\}. \quad (3)$$

2. Среднее значение объемного паросодержания

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \alpha_i, \quad (4)$$

где k – количество точек измерения объемного паросодержания α_i .

3. Произведем вывод формул расчета σ_{α^2} на основе уравнения изменения реактивности $dk_{эфф}/k_{эфф}$ с учетом изменения паросодержания

$$\frac{dk_{эфф}}{k_{эфф}} = \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{dp}{p} + \frac{df}{f} - \frac{M^2 B^2}{1 + M^2 B^2} \left(\frac{dM^2}{M^2} + \frac{dB^2}{B^2} \right), \quad (5)$$

где ε – коэффициент размножения на быстрых нейтронах; p – вероятность избежать резонансного захвата; f – коэффициент теплового использования; M^2 – площадь миграции; B^2 – геометрический параметр.

Для получения коэффициента паровой реактивности $(dk_{эфф}/k_{эфф})/\alpha$ производная берется по паросодержанию α . При использовании двухгруппового приближения последний член в правой части уравнения (5) примет вид

$$-\left[\frac{L^2 B^2}{1 + L^2 B^2} \frac{dL^2}{L^2} + \frac{L_j^2 B^2}{1 + L_j^2 B^2} \frac{dL_j^2}{L_j^2} + \left(\frac{L^2 B^2}{1 + L^2 B^2} + \frac{L_j^2 B^2}{1 + L_j^2 B^2} \right) \frac{dB^2}{B^2} \right],$$

где L^2 – квадрат длины диффузии тепловых нейтронов; L_j^2 – квадрат длины замедлителя.

Вклад второго и третьего членов правой части уравнения (5) приближенно можно описать выражениями

$$\frac{(dp/p)}{d\alpha} = \frac{\ln p}{1 - \alpha}, \quad (6)$$

$$\frac{(df/f)}{d\alpha} = \frac{f_{H_2O}}{1 - \alpha}, \quad (7)$$

где f_{H_2O} – доля поглощения тепловых нейтронов в воде.

При соответствующем выборе в активной зоне водоуранового соотношения между количеством воды и урана можно почти полностью скомпенсировать влияние этих двух факторов – p и f . Формулы (3) – (7) описывают процесс парообразования кипящего реактора. Для водо-водяного реактора, если учесть ограничение на параметр α ($\alpha < \alpha^{доп} \ll 1$, где $\alpha^{доп}$ – допустимое значение объемного парообразования), можно принять $d\alpha = \alpha^{доп} - \alpha$.

В случае гипотетической аварии, связанной с выгоранием твэлов, для водо-водяных реакторов состояние равновесия p и f нарушается в связи с присутствием локального поверхностного или объемного кипения при средней температуре теплоносителя значительно более низкой, чем температура кипения, т.е. уменьшение реактивности за счет влияния p не компенсирует ее рост при увеличении f . Процесс

считается управляемым по параметру, если разброс значений параметра не превышает $\pm 3\sigma$, в предположении, что процесс описывается нормальным законом распределения. Поэтому при разбросе значений объемного паросодержания меньше $\pm 3\sigma$ возможно предотвращение нежелательного развития процесса кипения.

Таким образом, выберем в качестве наиболее значимых факторов, влияющих на паровую реактивность, p и f . Для грубых расчетов σ_{α}^2 , используя (6) и (7), приведем следующее соотношение:

$$\ln p(\langle\alpha\rangle) \cdot (\alpha^{\text{доп}} - (\langle\alpha\rangle + 3\sigma_{\alpha})) = -f_{\text{H}_2\text{O}} (\alpha^{\text{доп}} - \langle\alpha\rangle). \quad (8)$$

Произведя преобразования (8), получим

$$\sigma_{\alpha} = [(\alpha^{\text{доп}} - \langle\alpha\rangle)/3] \cdot [1 + f_{\text{H}_2\text{O}} / \ln p(\langle\alpha\rangle)]. \quad (9)$$

Перечислим этапы метода.

1. Номер шага итерации $I = 1$, определяем начальную схему измерений и множество $M = \emptyset$ ее точек.

2. Определяем объемное паросодержание на I -м шаге итераций, решая систему линейных алгебраических уравнений вида (1).

3. Находим множество M НГТ, для которых объемное паросодержание α_j не попадает в диапазон $\langle\alpha\rangle \pm 3\sigma_{\alpha}$ (значение $\langle\alpha\rangle$ рассчитывается по формуле (4), а σ_{α} – по формуле (9)).

4. Для всего множества НГТ сопоставляем единичные вероятности pp_j выхода из-под контроля процесса парообразования. Для каждой j -й точки множества по функции плотности распределения параметра $\langle\alpha\rangle$ находим вероятность p_j появления значения α_j , определяем $pp_j = 1 - p_j$. Вероятностям pp сопоставляется цветовой аналог от красного до фиолетового по степени уменьшения опасности.

5. Если $((I < 3) \& (M \neq \emptyset))$, то значение I увеличиваем на единицу ($I \leftarrow I + 1$), определяем множество схем измерений (количество схем не должно превышать мощность множества M , каждая схема задает множество T точек измерения) и переходим к пункту 2.

6. Для каждой НГТ из множества M определяются координаты НГТ-каналов.

7. Рассчитанные величины и координаты отражаются на картограмме активной зоны реактора.

В настоящее время для существующих СВРК ВВЭР подобных измерительно-информационных оптических систем не существует, ведется их разработка.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕПЛООБМЕНА НА ОСНОВЕ МНГТ И СЕТЕЙ ПЕТРИ

Обобщенная схема адаптивной системы управления теплообменом водо-водяного реактора (АСУ ТР) приведена на рис. 1. Объектами управления являются система компенсации избыточной реактивности (КС), система измерительной аппаратуры типа ВОП-датчиков и ядерный реактор. Устройство управления (УУ) состоит из блока МНГТ и блока управления системой ВОП-датчиков (БУ ВОПД). Блок МНГТ выдает КС и оператору вектор UX -координат наиболее «горячих» точек, картограмму объемного парообразования (вектор состояния реактора SA), рекомендации. БУ ВОПД формирует вектор управляющего воздействия $U\theta$ для системы ВОП-датчиков.

Для описания дискретных процессов случайной структуры в условиях неопределенности математическим аппаратом СП используется расширение, предложенное в [9]. Указанное расширение включает в себя

- обобщение стохастических и функциональных СП, т.е. объединение подмножеств атрибутов;
- внесение дополнительных атрибутов;

– использование сдерживающей событийной гипердуги.

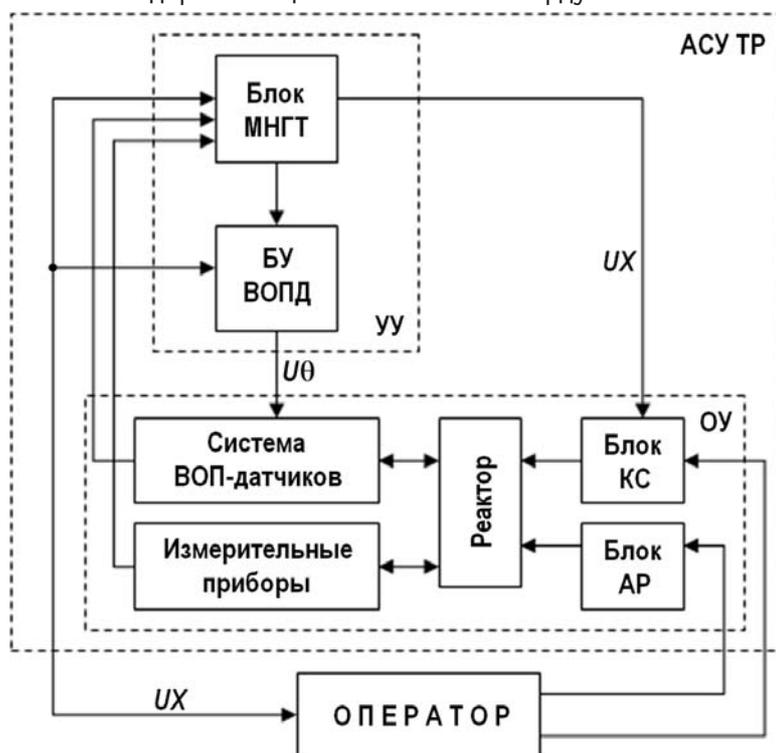


Рис. 1. Обобщенная схема адаптивной системы управления процессом теплообмена водо-водяного реактора

Во избежание побочного эффекта расширения введены следующие структурные ограничения:

- каждая позиция является выходом только одного перехода;
- кратность любой позиции равна 0 или 1.

Для рассматриваемого объекта (соединения стохастических систем) примем следующую интерпретацию элементов СП:

- *переход* – элемент системы (стохастической подсистемы), например, блок, ВОП-датчик, область рабочей зоны, включающая в себя ТВС и т.д.;
- *позиция* – набор выходов элемента системы;
- *маркер* – признак наличия вектора сигналов на выходе элемента;
- *дуга* – канал передачи сигналов.

Срабатывание перехода означает включение элемента в текущую структуру.

Вероятность срабатывания перехода будем рассматривать как вероятность передачи из множества входных позиций данного перехода хотя бы одного маркера и выполнение множества ограничений (условий), сопоставленных этому переходу.

Введение сдерживающей событийной гипердуги позволяет (в отличие от обычной сдерживающей дуги, осуществляющей проверку на нуль) выполнять проверку на максимум. Потребность в таком расширении обусловлена наличием наборов взаимоисключающих событий. Для рассматриваемого объекта событиями являются передачи сигналов различным элементам системы. Сдерживающая событийная гипердуга охватывает обычные дуги, по которым исключена одновременная передача маркера (вектора сигналов).

Модель АСУ ТР на основе расширения стохастических СП представлена на рис. 2 в виде графа взаимосвязанных множеств переходов (Т), позиций (Р), дуг и гипер-

дуг (A, B). Дугам, охваченным гипердугами B1, B2, ... Bk, сопоставлены вероятности, полученные по формуле

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta\alpha_i/\alpha_i > b; \\ z \cdot \Delta\alpha_i/\alpha_i, & \text{если } 0 < \Delta\alpha_i/\alpha_i \leq b; \\ 0, & \text{если } \alpha_i = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где p_i — вероятность появления кипения в i -й ячейке; α_i — объемное паросодержание в i -й ячейке; $\Delta\alpha_i$ — изменение α_i за интервал времени Δt (шаг моделирования); z — заданный коэффициент; b — заданный предел.

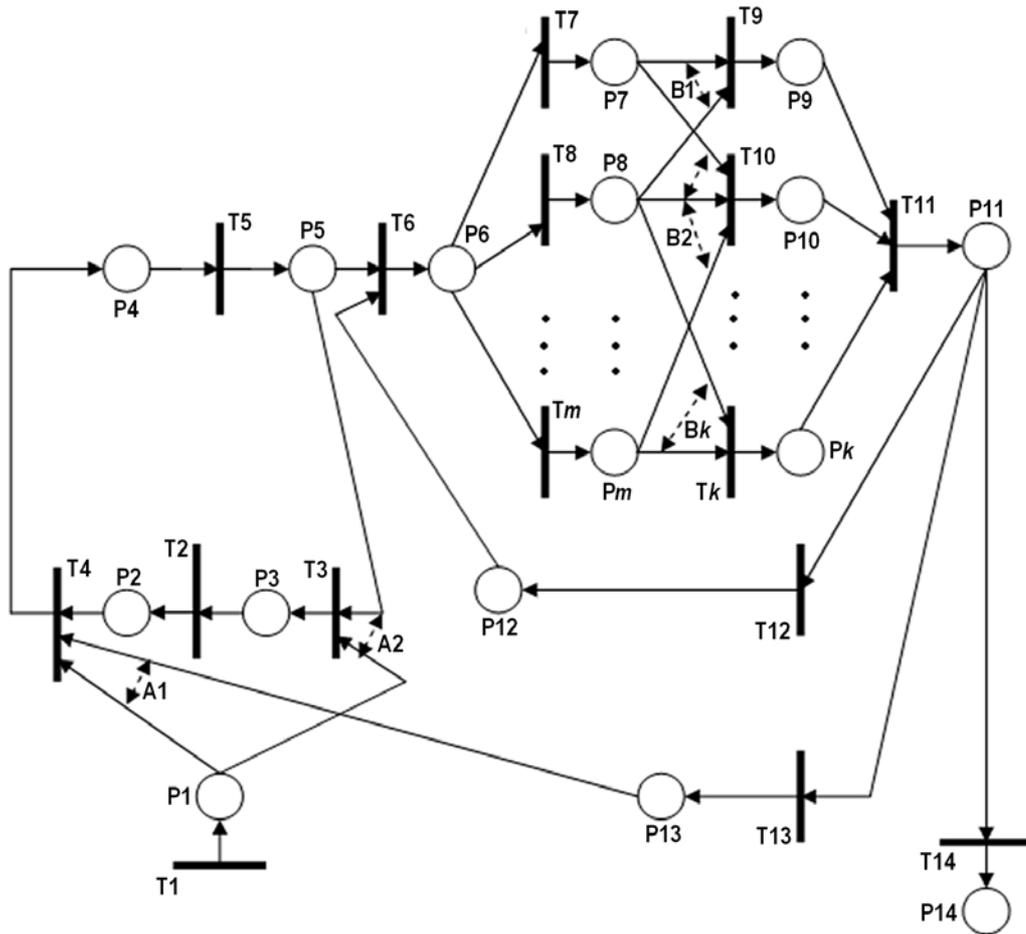


Рис. 2. Модель АСУ ТР на основе расширения СП

Дугам, охваченным гипердугами A1, A2, сопоставлены вероятности из множества $\{0;1\}$. В случае нахождения маркера в позиции P1 наибольшая вероятность сопоставляется дугам, исходящим из позиции P1, в противном случае из позиций P5 и P13. Всем остальным дугам по умолчанию сопоставляется вероятность, равная 1. Описание переходов предложенной модели дано в табл. 1.

При моделировании рассматривается не вся СП, связанная со считыванием информации с датчиков, а лишь небольшая ее часть, что позволяет значительно повысить скорость получения результата. Фрагментарное использование СП в процессе моделирования является одним из основных достоинств этого математического аппарата в сравнении с нейронными сетями. Сети Петри за счет снижения размер-

ности моделируемой сети дают при решении сложных задач идентификации быстрое действие на порядок более высокое, чем нейронные сети [17].

Таблица 1

Описание переходов модели на основе СП

Тип перехода	Условие, сопоставленное переходу	Выполняемые функции
T1	–	ОПЕРАТОР, начальная установка
T2	–	РЕАКТОР
T3	–	АР, АС
T4	–	ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА (ТП, ТС, ДПЗ, ВОПД)
T5	–	Блок МНГТ, расчет вероятностей кризиса
T6	Наличие ненулевых вероятностей	Коррекция вероятностей с учетом предыдущих циклов управления
T7 – Tm	–	Область и (или) ячейка активной зоны: определение вектора управления ВОП-датчиками, которые необходимы для измерения в данной ячейке
T9 – Tk	–	ВОП-датчик: выбор ячеек для измерения
T11	–	Формирование управляющего воздействия для системы ВОП-датчиков
T12	Рассмотрены не все ячейки	Формирование весовых коэффициентов
T13	Рассмотрены все ячейки либо области	–
T14	«ВЫХОД»	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено производить идентификацию процесса кипения в активной зоне реактора на основе информации оптической ИИС, расположенной по периметру камеры смешения, что позволит оперативно получать данные о возможных нарушениях теплообмена в каналах активной зоны реактора и повысить на порядок быстродействие системы внутриреакторного контроля.

Разработаны схема адаптивной системы управления тепловой мощностью ядерного реактора и соответствующая ей модель на основе МНГТ и расширения СП, позволяющая учитывать стохастический характер процесса теплообмена, что дает возможность повысить на порядок скорость реагирования, принятия решения в нештатных ситуациях.

Предлагаемая адаптивная система управления измерительной оптической системой позволяет за счет самообучения, т.е. формирования в процессе функционирования вероятностных характеристик состояния активной зоны, не производя сканирования всех технологических каналов, выдавать информацию с приблизительно двухсекундной задержкой.

Определена перспективность использования аппарата СП при решении задач автоматизации контроля и управления ядерными энергетическими установками.

Литература

1. Качур С.А. Управление энергораспределением ядерного реактора на основе сетей Петри. // Энергетические установки и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 14-20.
2. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике – М.: ИздАТ, 2010. – 771 с.
3. Шаравский И.Г., Домашнев Е.Д., Архипов А.П. Метод верификации начала вскипания

теплоносителя в каналах ядерного реактора. // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23. – № 4-5. – С. 114-121.

4. *Шараевский И.Г.* Распознавание режимов течения двухфазного потока в каналах ядерного реактора по шумам технологических параметров. // Промышленная теплотехника. – 2000. – Т. 22. – № 1. – С. 53-59.

5. *Ковецкая М.М.* Кризис теплообмена в пучках стержней с закруткой потока. // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31. – № 5. – С. 50-55.

6. *Качур С.А.* Диагностика кризисного состояния реактора ВВЭР на основе модели запаривания канала. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 41-50. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.04>.

7. *Качур С.А.* Прогнозирование режимов кипения в парогенерирующем канале на основе спектрального анализа акустических шумов. // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 24-29.

8. *Гусев С.С.* Безопасное управление атомными электростанциями. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2017. – № 12. – С. 42-45.

9. *Качур С.А.* Модель стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри. // Проблемы управления и информатики. – 2002. – № 1. – С. 93-98.

10. *Корнеева Т.В.* Волоконно-оптические датчики: разработка, применение. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 7. – С. 25-41.

11. *Веснин В.Л., Черторийский А.А., Экке В.* Контрольно-измерительные системы на основе волоконно-оптических брэгговских датчиков. // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50. – № 6. – С. 751-758.

12. *Суслов В.А.* Режимы течения кипящего двухфазного потока в трубах. // Тепловые процессы в технике. – 2012. – Т. 4. – № 12. – С. 539-543.

13. *Долинский А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М.* Методология распознавания и верификации кризисов теплоотдачи в стержневых сборках. // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27. – № 6. – С. 66-80.

14. *Попов И.А., Домашев Е.Д., Сычев Е.Н., Журавлев А.А.* Экспериментальная установка и автоматизированная система сбора и обработки информации для моделирования аварийных теплогидравлических процессов. // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29. – № 2. – С. 62-68.

15. *Леонтьев А.И., Олимпиев В.В.* Влияние интенсификации теплообмена на тепло гидравлические свойства каналов. // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45. – № 6. – С. 925-953. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X07060168>.

16. *Кириллов П.Л.* Новое о методах интенсификации теплообмена поверхности с кипящей водой. // Атомная техника за рубежом. – 2005. – № 10. – С. 3-7.

17. *Качур С.А., Богма А.С.* Модификация автоматических систем регулирования на основе статистических и нейросетевых методов. // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4. № 1. – С. 50-55.

Поступила в редакцию 02.09.2019 г.

Автор

Качур Светлана Александровна, профессор, доктор тех. наук
E-mail: kachur_62@mail.ru

UDC 621.039.56

HEAT EXCHANGE CONTROL IN THE VVER CORE USING PETRI NETS

Kachur S.A.

Sevastopol State University
33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053 Russia

ABSTRACT

The aim of the study is to develop a method for identifying the boiling process in the channels of the VVER core and a model of the information-measuring system to be used on the basis of Petri nets for more efficient heat exchange control in the reactor core during emergencies.

In this case, two tasks are solved: (1) the creation of a method for identifying the «hottest» steam distribution spots in the mixing chamber; and (2) the development of a model for controlling the information-measuring system in the process of this identification, as a component of the reactor power control system.

It is proposed to identify the boiling process in the reactor core according to the information of the optical information-measuring system located along the perimeter of the mixing chamber. The developed method for controlling the steam void in the mixing chamber is called the method of the «hottest» spots for a nuclear reactor. This method is based on solving systems of linear equations that describe various schemes for using information from optical sensors.

A scheme of an adaptive heat transfer control system of a nuclear reactor and a model based on the method of the «hottest» spots and expansion of Petri nets have been developed, taking into account the stochastic nature of the heat exchange process, which makes it possible to increase by an order of magnitude the rate of response and decision-making during emergencies.

Key words: nuclear reactor, heat exchange, steam void, identification, control, Petri nets.

REFERENCES

1. Kachur S.A. Control of Nuclear Reactor Power Distribution Based on Petri Nets. *Energeticheskie Ustanovki i Tekhnologii*, 2019, v. 5, no. 1, pp. 14-20 (in Russian).
2. Kirillov P.L. *Reference Book upon Heat-Hydraulic Accounts in Nuclear Power Industry*. Moscow. Izdat Publ., 2010, 771 p. (in Russian).
3. Sharoevskij I.G., Domashev E.D., Arhipova A.P. Verification Method for Beginning Boiling up of Coolant in the Channels of Nuclear Reactor. *Promyshlennaya Teplotehnika*, 2001, v. 23, no. 4-5, pp. 114-121 (in Russian).
4. Sharoevskij I.G. Recognition of the Modes of Flow of Diphasic Stream in the Channels of Nuclear Reactor on Noises of Technological Parameters. *Promyshlennaya Teplotehnika*, 2000, v. 22, no 1, pp. 53-59 (in Russian).
5. Kovehkaya M.M. Crisis of Heat Exchange in the Bunches of Bars with Twirling of Stream. *Promyshlennaya Teplotehnika*, 2009, v. 31, no. 5, pp. 50-55 (in Russian).
6. Kachur S.A. Diagnostics of the Crisis State of VVER Reactor Based on the Channel Steaming Model. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2019, no. 1, pp. 41-50. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.04> (in Russian).
7. Kachur S.A. Prediction of Boiling Modes in a Steam Generating Channel Based on Spectral Analysis of Acoustic Noise. *Energeticheskie Ustanovki i Tekhnologii*, 2018, v. 4, no. 3, pp. 24-29 (in Russian).
8. Gusev S.S. Safe control nuclear power plants. *Elektrooborudovanie: Eksploatatsiya i*

Remont, 2017, no. 12, pp. 42-45 (in Russian).

9. Kachur S.A. Model of Stochastic Systems and Their Combination on the Basis of Petry Nets. *Problemy Upravleniya i Informatiki*, 2002, no. 1, pp. 93-98 (in Russian).

10. Korneeva T.V. Fiber-Optic Sensors: development, application. *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2016, no. 7, pp. 25-41 (in Russian).

11. Vesnin V.L., Chetorijskij A.A., Ekke V. Test and Measurement Systems Based on Fiber-Optic Bragg' Sensors. *Radiotekhnika i Elektronika*, 2005, v. 50, no. 6, pp. 751-758 (in Russian).

12. Suslov V.A. Flow Modes of Two-Phase Fluidized Flow in Pipes. *Teplovyje Processy v Tekhnike*, 2012, v. 4, no. 12, pp. 539-543 (in Russian).

13. Dolinskij A.A., Sharaevskij I.G., Fialko N.M. Methodology for Recognition and Verification of Crisis of Heat Transfer in Rod Assemblies. *Promyshlennaya Teplotekhnika*, 2005, v. 27, no. 6, pp. 66-80 (in Russian).

14. Popov I.A., Domashev E.D., Sychev E.N., Zhuravlev A.A. Experimental Setup and Automated System of Data Collection and Processing for Simulation of Emergency Thermal-Hydraulic Processes. *Promyshlennaya Teplotekhnika*, 2007, v. 29, no. 2, pp. 62-68 (in Russian).

15. Leontiev A.I., Olimp'ev V.V. The Influence of Intensification of Heat Transfer on the Thermohydraulic Properties of Channels. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 2007, v. 45, no. 6, pp. 925-953. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X07060168> (in Russian).

16. Kirillov P.L. New Methods of Intensification of Surface Heat Exchange with Boiling Water. *Atomnaya Tekhnika za Rubezhom*, 2005, no. 10, pp. 3-7 (in Russian).

17. Kachur S.A., Bogma A.C. Modification of Automatic Control Systems Based on Statistical and Neural Network Methods. *Energeticheskie Ustanovki i Tekhnologii*, 2018, v. 4, no. 1, pp. 50-55 (in Russian).

Author

Kachur Svetlana Aleksandrovna, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: kachur_62@mail.ru