

А.Л. Ляшенко, С.Л. Морева, В.Е. Трушников

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛАХ АТОМНОГО РЕАКТОРА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ

Рассмотрен мониторинг параметров реакторной установки на примере реактора, установленного на атомных станциях. Приоритетом ядерной промышленности является обеспечение безопасности и уделяется самое пристальное внимание ее совершенствованию. Огромная ответственность персонала атомных станций при работе с высокими технологиями, требует постоянно учитывать даже маловероятные риски возникновения аварии. Этому способствует непрерывный мониторинг состояния реакторной установки.

Ключевые слова: система управления, математическая модель, реактор, температурное поле, теплоноситель, безопасность.

Введение

Современная АЭС представляет собой совокупность различных элементов оборудования представляющих цепь сложных технологических связей, где происходят непрерывные процессы взаимосвязанных процессов преобразования, перераспределения и передачи различных видов энергии. Любое изменение технологического параметра, либо характеристики элемента оборудования в определенной степени влияет на параметры, характеристики и показатели работы всей системы. В процессе работы расходные и термодинамические параметры системы могут изменяться в пределах физических возможных и технически осуществимых изменений энергоносителей и конструкций, и находятся в пределах технически допустимых эксплуатационных состояний материалов оборудования. Это вызывает необходимость учитывать множество технических ограничений, проявляющихся в виде равенств и неравенств, являющимися необходимыми условиями нормальной эксплуатации системы. Современные атомные станции имеют высокий уровень надежности, что доказано наукой и временем.

Описание реактора

Станция включает в себя несколько реакторов и представляет собой спецкомплекс зданий, где размещается необходимое технологическое оборудование [1]. В главном корпусе находится реакторный зал. Тепло в активной зоне реактора отводится теплоносителем и используется для получения водяного пара, который вращает турбину электрогенератора.

Рассматриваемый реактор является гетерогенным канальным реактором с графитовым замедлителем и водяным кипящим теплоносителем. В качестве топлива используются уран-эрбиевые таблетки (диоксид урана UO_2 с добавкой оксида эрбия Er_2O_3). Реактор состоит из графитовой кладки замедлителя



Рис. 1. Конструкция канального энергетического реактора РБМК-1000

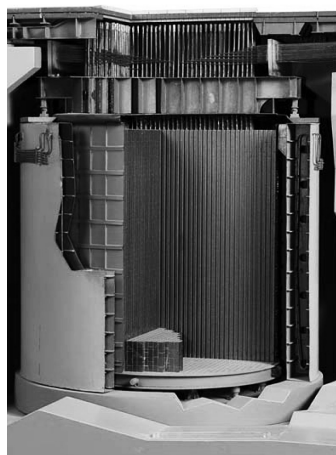


Рис. 2. Активная зона реактора

цилиндрической формы, которая размещается в бетонной шахте, через нее проходят специальные каналы системы управления и защиты, а также технологические каналы с ядерным топливом, охлаждаемые водой.

Реактор РБМК-1000 имеет две петли контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), расположенные симметрично относительно осевой плоскости реактора (рис. 1). Каждая петля включает два барабана-сепаратора и четыре циркуляционных насоса, прокачивающих воду через технологические каналы. Проходя через активную зону вода нагревается до температуры кипения. Основным элементом реактора является активная зона – это графитовая конструкция, где протекает управляемая ядерная реакция и куда загружается ядерное топливо.

Главная задача безопасности реактора РБМК – постоянное поддержание необходимого охлаждения активной зоны. Подача теплоносителя в топливные каналы реактора в целях отвода тепла от тепловыделяющих сборок и от графитовой кладки осуществляется при помощи контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ). В канальных реакторах существует возможность контроля и регулирования расхода теплоносителя по каждому технологическому каналу. Это позволяет иметь минимально необходимый расход теплоносителя через реактор и получать на выходе всех каналов примерно одинаковые теплотехнические параметры. Для каждого канала необходимый расход определяется его мощностью, которая зависит от выгорания топлива и от места нахождения канала в реакторе. Во время эксплуатации мощность и требуемый расход теплоносителя изменяются постепенно, а при перегрузке топлива – скачкообразно. Теплоноситель подается в активную зону снизу по нижним водяным коммуникациям (рис. 2).

Регулирование расхода теплоносителя происходит при помощи запорно-регулирующего клапана (ЗРК). Регулирование расхода в технологическом канале (ТК) выполняется вручную. Управление запорно-регулирующим клапаном – довольно сложная и очень ответственная операция. Зависимость открытия ЗРК от мощности представлена в табл. 1. Операцию регулировки расхода воды в ТК производит оператор реакторного отделения.

Степень открытия ЗРК в топливных каналах

Номер мощностной группы	Границы группы, МВт	Степень открытия ЗРК, мм
1	< 1,450	4,0
2	1,450–1,694	5,0
3	1,694–1,906	6,0
4	1,906–2,097	7,4
5	2,097–2,272	9,0
6	> 2,272	12,5

Разработка математической модели

Мониторинг параметров реакторной установки связан с необходимостью анализа непрерывных физических процессов, протекающих в активной зоне. При анализе ядерных установок важная роль принадлежит расчету тепловыделяющей системы. Рассмотрим реактор атомной электростанции как систему с распределенными параметрами. Применим методы теории СРП для анализа процессов в активной зоне и синтеза систем управления этими процессами. Ее математической моделью является, выведенное на основе первого закона термодинамики, уравнение теплопроводности.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к графитовой кладке:

$$\frac{\partial T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{\Gamma} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a_{\Gamma} W_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma} V_{\Gamma}}.$$

где a_{Γ} – коэффициент температуропроводности графита; x, y, z – пространственные координаты; W_{Γ} – мощность, выделяемая при торможении нейтронов; λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности графита; V_{Γ} – объем графитовой кладки.

Уравнение теплопроводности при анализе тепловых процессов в технологических каналах, удобнее записывать в цилиндрических координатах.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к циркониевой трубе.

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_{\text{Ц}} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right]$$

где $a_{\text{Ц}}$ – коэффициент температуропроводности циркония.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к теплоносителю в канале:

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_{\Gamma} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right] - \vartheta(R, t) \cdot \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y},$$

где ϑ – скорость движения теплоносителя в канале; a_T – коэффициент температуропроводности теплоносителя.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к выбранной ячейке графитовой кладки в цилиндрических координатах.

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_T \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right] + \frac{a_T W_T}{\lambda_T V_T}.$$

В разработанной математической модели присутствуют уравнения, записанные в прямоугольной и цилиндрической системе координат. Для их стыковки были выделены зоны цилиндрической формы в графитовых блоках, они совпадают с границами сквозных отверстий в графитовых блоках. Для этих зон были составлены дополнительно дифференциальные уравнения теплопроводности.

Представленные дифференциальные уравнения отражают общий характер процесса. Чтобы получить математическую модель объекта, соответствующую конкретной задаче, необходимо задать условия однозначности. Полная математическая модель представлена в [2, 3].

При моделировании рассматривались тепловые процессы, протекающие в графитовой кладке, состоящей из графитовых блоков. В технологическом канале располагается тепловыделяющая сборка, которая омывается теплоносителем. Положения ЗРК будем рассматривать как функции входа, а контрольные точки во внутренних углах графитовых кладок как функции выхода.

Анализ объекта и синтез системы управления

Математическая модель объекта управления описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, не имеющих аналитического решения, но, используя дискретную модель объекта управления, определим реакцию объекта на выбранные пространственные моды входного воздействия.

Для проведения частотного анализа разложим входное воздействие $U(x, z, t)$ в ряд Фурье. Входное воздействие, учитывая граничные условия, может быть представлено в виде:

$$U(x, z, t) = L_3 + 0,1 \cdot L_s \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x_i) \cdot \sin(\bar{\Psi}_\gamma \cdot z_j),$$

где L_s – размер внутреннего диаметра трубы, L_3 – текущее положение заслонки.

Найдем реакцию объекта на каждую составляющую ряда. Эту реакцию будем искать в виде:

$$T_{\eta,\gamma}(x, y, z, t) = H_{\eta,\gamma}(y, t) \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x) \cdot \sin(\bar{\Psi}_\gamma \cdot z).$$

Область распределения входного воздействия по первой и по третьей пространственным модам, принятая при экспериментальных исследованиях, показана на рис. 3.

Для регулирования расхода теплоносителя и управления температурным полем активной зоны канального реактора предлагается использовать распределенный высокоточный регулятор (РВР). Проектирование распределенной системы управления позволит значительно повысить скорость реакции при

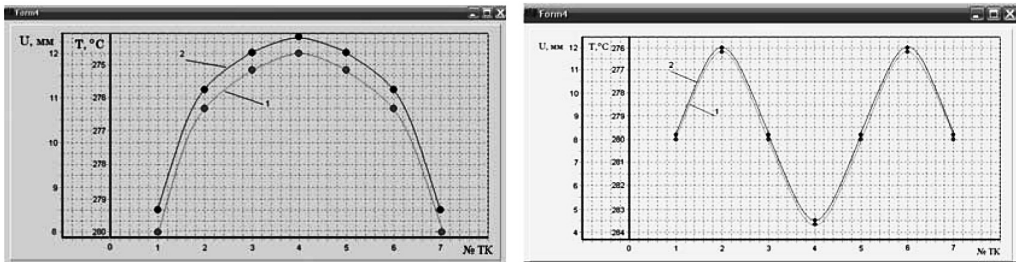


Рис. 3. Распределение входного и выходного воздействий: 1 – функция входа – положение ЗРК; 2 – функция выхода – температура в контрольной точке; № ТК – номер технологического канала; T – температура теплоносителя, °C; U – открытие запорно-регулирующего клапана, мм

возможных отклонениях параметров активной зоны реактора [4]. Структурная схема системы управления ЗРК с применением РВР представлена на рис. 4.

Передаточная функция распределенного высокоточного регулятора имеет вид [5]:

$$W(x, y, p) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + E_2 \cdot \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot p$$

где E_1, E_2, E_3 – коэффициенты усиления;

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – лапласиан; n_1, n_2, n_3 – весовые коэффициенты.

В качестве исполнительного механизма (ИМ) предлагается использовать шаговый двигатель. Его главное преимущество – точность. При подаче потенциалов на обмотки шаговый двигатель совершает дискретное вращение строго на определенный угол. Не менее важное преимущество: при изменении направления вращения на противоположное, скорость вращения достигается почти мгновенно. Шаговые двигатели широко используются в приложениях, требующих высокой точности позиционирования.

Заключение

При таком принципе управления расходом теплоносителя автоматизируется регулировка ЗРК, оперативный персонал осуществляет только контроль технологических параметров активной зоны. Регулирование расхода теплоносителя по каждому каналу позволит на выходе всех каналов получать одинаковые теплотехнические параметры и, соответственно, иметь минимально необходимый расход теплоносителя через реактор.

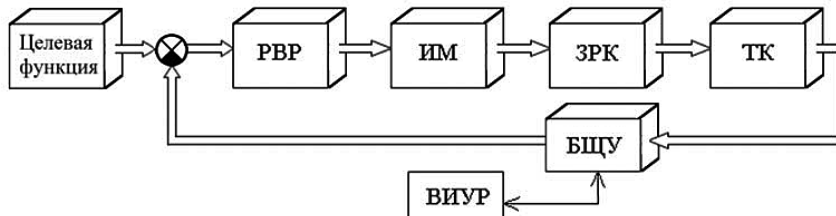


Рис. 4. Структурная схема предложенного управления ЗРК: ВИУР – ведущий инженер управления реактором; БЩУ – блочный шит управления

По результатам численного моделирования, можно сделать вывод, что система осуществляет регулирование температурного поля с высокой точностью и в полном соответствии с поставленными требованиями. Применение РВР для управления параметрами рассматриваемого объекта позволяет проектировать системы управления сложными тепловыми процессами активной зоны реактора канального типа, обеспечивая при этом безопасность эксплуатации АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / Под общ. ред. Ю.М. Черкашова. – М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. – 632 с.
2. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Математическое моделирование тепловых процессов в активной зоне реактора // Научное обозрение. – 2012. – № 2. – С. 182–188.
3. Морева С.Л. Разработка методики моделирования тепловых процессов в активной зоне реакторных установок на примере реактора РБМК-1000 / Труды X Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление». Т. 4. – Казань: Изд-во КГТУ, 2012. – С. 184–190.
4. Морева С.Л. Синтез распределенного регулятора для системы управления температурным полем активной зоны реактора / Материалы Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». – Пятигорск: СКФУ (филиал) в г. Пятигорске, 2013. – С. 233–240. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ляшенко А.Л. – кандидат технических наук, доцент, e-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru,
Морева С.Л. – кандидат технических наук, доцент, e-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru,
Трушников Вячеслав Евстафьевич – доктор технических наук, профессор,
e-mail: tvye@yandex.ru,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

UDC 519.7180

DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM COOLANT FLOW TECHNOLOGY CHANNELS NUCLEAR REACTOR IN ORDER TO INCREASE HYDROSITE SECURITY

Lyashenko A.L., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru,
Moreva S.L., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru,
Trushnikov V.E., Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: tvye@yandex.ru,
National Mineral Resource University «University of Mines», 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Consider monitoring the parameters of the reactor plant as an example of the reactor installed at nuclear power plants. The priority of the nuclear industry is to ensure the safety and the utmost attention paid to its improvement. Huge responsibility NPP personnel when working with high technology, requires constant regard even improbable risks of an accident. This is facilitated by continuous monitoring of the state of the reactor plant.

Key words: control system, mathematical model of the reactor, temperature field, heat transfer, security.

REFERENCES

1. Abramov M.A., Avdeev V.I., Adamov E.O. *Kanal'nyi yadernyi energeticheskii reaktor RBMK*. Pod red. Yu.M. Cherkashova. (Pressure-tube nuclear-power reactor RBMK. Cherkashov Yu.M. (Ed.)), Moscow, GUP NIKIET, 2006, 632 p.
2. Moreva S.L., Lyashenko A.L. *Nauchnoe obozrenie*. 2012, no 2, pp. 182–188.
3. Moreva S.L. *Trudy X Mezhdunarodnoi Chetaevskoi konferentsii «Analiticheskaya mekhanika, ustoychivost' i upravlenie»*. T. 4 (Proceedings of X Chetaev's International Conference on Analytical Mechanics, Stability and Control, vol. 4), Kazan', Izd-vo KGTU, 2012, pp. 184–190.
4. Moreva S.L. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Sistemnyi sintez i prikladnaya sinergetika»* (Proceedings of International Conference on System Analysis and Applied Synergetics), Pyatigorsk: SKFU (filial) v g. Pyatigorske, 2013, pp. 233–240.