

УДК 621.039:621.311

*О. В. Дервянко**Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса***О ВЫЯВЛЕНИИ СКРЫТЫХ ФАКТОРОВ, ТРЕБУЮЩИХ ПРЕВЕНТИВНОГО
СРАБАТЫВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДПИТКИ ВОДНЫХ СРЕД
ОБОРУДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

На основе мониторинга теплогидродинамических процессов по флуктуациям режимных параметров рассмотрены возможности оперативной диагностики негативных процессов в теплообменном оборудовании ядерных энергетических установок стационарной энергетики. Предложены технические решения обеспечения надежного теплоотвода с помощью превентивной аварийной подпитки технологических водных сред реакторных установок АЭС.

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, парогенераторы, аварийные события, теплогидравлические аномалии, оперативная диагностика, надежная подпитка водных сред, комбинированный турбопривод.

В настоящее время к важнейшим аспектам развития атомной энергетики относится повышение надежности как основных узлов АЭС, так и станции в целом. Эта концепция повышения надежности АЭС полностью укладывается в стратегию развития атомной энергетики до 2030 года [1]. Противоречие между стремлением к технико-экономической эффективности ядерных энергетических установок (ЯЭУ) современных АЭС и необходимостью обеспечения безопасности ядерной энергетики является серьезной научно-технической проблемой. Минимизация риска возникновения и развития неуправляемых аварийных процессов, связанных с эксплуатацией ядерных энергоблоков с водоохлаждаемыми реакторами (в том числе с ВВЭР-1000), относится к актуальным комплексным задачам современной энергетики. Мировой опыт эксплуатации объектов атомной энергетики убеждает в том, что внимание, уделяемое как теме теоретического анализа предаварийных и аварийных теплогидравлических процессов, так и вопросам практического оперативного управления этими процессами, не является избыточным.

Аварийные события на объектах атомной энергетики показали, что главным негативным фактором техногенного воздействия на экосистему со стороны энергоблоков АЭС в аварийных условиях становится разгерметизация оборудования контуров. Сразу следует пояснить, что первопричиной, способной привести к необратимой (аварийной) разгерметизации оборудования энергоблока, может стать относительно безопасное (предаварийное) нарушение теплоотвода в соответствующем оборудовании ЯЭУ, если такого рода событие не будет своевременно обнаружено и устранено. Подобные процессы могут сопровождаться возникновением теплогидравлической неустойчивости в элементах и системах ЯЭУ. Малые течи поначалу вполне возможно компенсировать дополнительной подачей в циркуляционный контур недостающего объема

теплоносителя и тем самым стабилизировать теплогидравлические процессы, обеспечив безаварийное управление энергоблоком, в том числе его безаварийный останов.

Если при помощи средств раннего диагностирования аномалий нежелательные скрытые предаварийные теплогидравлические процессы своевременно не будут обнаружены и купированы, они могут приобрести дальнейшую прогрессирующую динамику, привести к уже некомпенсируемым течам и усугублению неблагоприятных условий отдачи тепла реакторной установкой, а соответственно — к невозможности его передачи конечному потребителю. Подобные эффекты чреваты крупной аварией, связанной с разрушением ЯЭУ и способной спровоцировать весьма опасные экологические последствия.

Целью статьи является анализ возможности своевременной диагностики скрытых аномалий теплогидравлических процессов в ЯЭУ и изучение возможности использования дополнительных технических средств автоматической диагностики нарушения штатных гидравлических и тепловых режимов функционирования энергооборудования. Поставленная цель определила следующие задачи: разработку средств мониторинга и контроля предаварийных запасов теплогидравлической устойчивости потоков, а также исследование технических возможностей своевременной коррекции теплогидравлических процессов при помощи дополнительной оперативной подпитки технологического оборудования АЭС.

Аналитический обзор известных исследований и разработок, относящихся к данной проблеме, показывает, что даже малая потеря теплоносителя из основного технологического оборудования АЭС может стать причиной достаточно быстрого развития нежелательных теплогидравлических процессов [2]. Действительно, оборудование ядерных энергетических установок представляет собой сложный

комплекс элементов и систем, обеспечивающих технологически заданное циркуляционное движение теплоносителя через реактор для обеспечения отвода тепла, вырабатываемого в активной зоне реактора. Так как во втором контуре реализуется фазовый переход рабочего тела, то к циркуляции воды второго контура, поступающей в парогенераторы, также предъявляются требования, связанные с обеспечением надежного отвода энергии, полученной от первого контура. Нарушение устойчивости движения теплоносителя и нарушение циркуляции воды второго контура следует рассматривать как физические процессы, которые могут привести к существенному снижению теплоотвода от активной зоны ЯЭУ.

Как показывает анализ известных в мировой практике аварийных инцидентов — на энергоблоке № 2 АЭС «Три-Майл-Айленд» (ТМІ-2, США, 1979), энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС (Украина, 1986), энергоблоке № 1 АЭС «Фукусима» (Япония, 2011) и некоторых менее значимых аварийных инцидентов, — причиной нарушения циркуляции водных тел ЯЭУ может быть как теплогидравлическая неустойчивость, проявляющаяся в виде колебаний расхода, давления, температуры и других режимных параметров, так и утечки, влекущие нехватку теплоносителя или рабочего тела [2—4]. Утечки циркулирующей рабочей среды при этом могут провоцировать колебательную теплогидравлическую неустойчивость (влияя косвенно) или приводить к кризису теплоотдачи (влияя непосредственно), что, так или иначе, создает предаварийные или аварийные эксплуатационные условия [5]. Управление динамикой этих процессов неизбежно должно быть связано как с применением эффективных метрологических средств оперативного контроля, так и со своевременной организуемой автоматической компенсацией утечек [6].

Исходя из изложенного, для решения поставленных задач было выдвинуто техническое предложение, состоящее в том, что в ходе эксплуатации энергоустановки по сигналу специализированного устройства мониторинга устойчивости теплогидравлических процессов в технологическом оборудовании ЯЭУ должен осуществляться запуск системы дополнительной надежной подпитки, обеспечивающей восстановление благоприятных условий теплообмена и нормализацию работы технологического оборудования систем, важных для безопасности. Использование такого рода специализированного устройства, в рамках выдвинутого предложения, требуется для раннего обнаружения динамических аномалий, связанных, например, с недопустимыми потерями водных сред. Согласованная работа такого устройства и системы дополнительной подпитки могла бы благоприятствовать переводу ЯЭУ в безопасное состояние.

Анализ возможности обнаружения и учета предаварийной теплогидродинамики в оборудовании ЯЭУ показывает, что эта задача связана с необходимостью выяснения условий движения потоков в протяженных трубопроводах, трубопроводах между большими гидравлическими емкостями, а также параллельно включенных каналах. Такого рода конструктивные элементы весьма характерны для оборудования ЯЭУ и иногда обладают скрытой динамикой, не имеющей явных признаков.

Возникающая неустойчивость обычно проявляется в виде опасных колебаний ряда режимных параметров, которые по условиям нормальной работы энергоустановок совершенно недопустимы. Такие процессы, оперативная информация о которых не всегда очевидна и доступна, развиваются следующим образом. После случайного незначительного уменьшения расхода жидкости происходит изменение плотности среды на определенном участке трубопровода и через время транспортного запаздывания наступает, соответственно, уменьшение расхода. Это приводит к уменьшению перепада давления на выходе из участка и к снижению давления в канале. В результате увеличивается перепад давления на входном участке и возрастает расход жидкости. Как следствие, из-за транспортного запаздывания наступает увеличение расхода, увеличение давления в канале и снова — снижение расхода. Так реализуется физическая обратная связь и наблюдается колебательный процесс, период которого определяется временем транспортного запаздывания потока.

Развитая теплогидравлическая неустойчивость может проявляться как в виде межканальных, так и в виде общесистемных колебаний (пульсаций) расхода. В первом случае неустойчивость характеризуется постоянством расхода в подводящей и отводящей магистралях, тогда как колебания расхода в отдельных каналах пучка (работающего в составе системы) происходят со сдвигом фаз. При этом колебания давления в отдельных каналах могут приводить к разрушению стенок.

Есть основания полагать, что мониторинг скрытой теплогидродинамики может быть обеспечен превентивно еще в ходе нормальной эксплуатации, в автоматическом режиме, применением методики определения запасов теплогидравлической устойчивости на основе измерения (по шумам режимных параметров) значений частотных передаточных функций, содержащих в неявном виде информацию о запасах устойчивости текущего физического процесса [7]. Действительно, теоретические основы выбора шумов режимных параметров, измерение и обработка которых позволяют опытным путем найти такую частотную функцию, по которой можно достоверно судить об устойчивости докризисной теплоотдачи, дают возможность связать

характеристическую функцию математической модели с частотной передаточной функцией. Важно, что такого рода частотная функция должна быть однозначно связана с характеристической функцией процесса, представляющего собой наступление кризиса. Алгоритм определения этой функции заключаются в следующем.

Исходя из уравнения сохранения энергии, уравнения неразрывности и уравнения сохранения количества движения, после линеаризации уравнений (при постоянной мощности внутренних источников в теплоотдающей поверхности), можно получить соотношение, связывающее преобразованные по Лапласу флуктуации температуры стенки $\delta\tilde{T}_{CT}$ и температуры среды T с преобразованными по Лапласу флуктуациями теплового потока $\delta\tilde{q}$ и осредненным значением теплового потока q :

$$\frac{\delta\tilde{T}_{CT}}{T_{CT} - T} = -\chi(s) \frac{\delta\tilde{q}}{q}.$$

В этом соотношении $\chi(s)$ определяется формой тепловыделяющей поверхности (зависит от радиуса кривизны поверхности трубчатых каналов, теплопроводности, коэффициента теплоотдачи) и выражается при помощи функций Бесселя первого рода (нулевого и первого порядков). Пользуясь полученным соотношением, можно определить левую часть характеристического уравнения краевой задачи для греющей стенки, омываемой теплоносителем (рабочим телом), и записать выражение для передаточной функции рассматриваемого процесса в виде

$$P_{qT}(s) = \frac{\delta\tilde{q}}{\delta\tilde{T}_{CT}}.$$

Правая часть этого выражения, представляющая собой отношение изображений по Лапласу возмущений двух режимных параметров, является частотной ($s=j\omega$) передаточной функцией связи параметров «температура стенки — тепловой поток». Она позволяет представить рассматриваемую физическую систему как объект, на входе которого действует возмущение температуры обогревающей поверхности, а на выходе — реакция в виде возмущения теплового потока. Следовательно, в качестве основных шумов режимных параметров, динамическая связь которых является информативной для диагностики показателей устойчивости в системе «греющая стенка — обогреваемая среда», нужно использовать шум теплового потока и шум температуры стенки канала.

Таким образом, в силу изложенного, передаточная функция «температура стенки — тепловой поток» может быть использована (учитывая ее

однозначную связь с характеристической функцией) для определения годографа Найквиста или аналогичной графической интерпретации годографа, чтобы судить по его расположению на комплексной плоскости о запасе устойчивости процесса теплоотдачи.

Аналогично может быть получена частотная передаточная функция $Q(j\omega)$, соответствующая физическому влиянию флуктуаций расхода теплоносителя, поступающего в зону теплообмена, на флуктуации расхода жидкости на выходе системы. Эта функция отражает теплогидродинамику всех процессов на пути движения потока без обратных связей:

$$Q(j\omega) = \frac{\delta\tilde{G}_0}{\delta\tilde{G}_{II}},$$

где G_0 и G_{II} — расход жидкости на выходе системы теплообмена и расход жидкости, поступающей в зону теплообмена, соответственно.

Для участка с обогревом и последующего за ним участка передаточная функция, обстоятельно рассмотренная в [8], в упрощенном варианте, применительно к рассматриваемой задаче имеет вид

$$T(s) = \frac{\delta\tilde{G}_0}{\delta\tilde{G}_0 - \delta\tilde{G}_{II}}.$$

Приняв во внимание эти результаты, можно получить и общее выражение, определяющее искомую передаточную функцию для анализа общесистемной устойчивости с учетом аддитивных влияний возмущений температуры, что может быть использовано для разработки средств измерений и обработки шумов режимных параметров с целью мониторинга запасов устойчивости потока в системе обогрева.

Для определения порядка и методики измерений и преобразований шумов режимных параметров, позволяющих в конечном счете получить практически важную информацию о запасах теплогидравлической устойчивости системы, может использоваться соотношение для частотной передаточной функции, определяемой на основе спектрального анализа шумов. Так, если регистрируемые малоамплитудные сигналы стохастической природы относятся к таким параметрам, как расход G , перепад давления ΔP , температура T , то

$$P_{\Delta PG}(j\omega) = \frac{S_{\Delta PG}(j\omega)S_T(\omega) - S_{TG}(j\omega)S_{\Delta PG}(j\omega)}{S_G(j\omega)S_T(\omega) - S_{TG}(j\omega)S_{GT}(j\omega)}.$$

Реализации шумов режимных параметров, по которым определяются числовые значения указанных спектральных характеристик (в общем случае S_{xx}), получают регистрацией электрических сигналов с выхода соответствующих датчиков.

Получаемая в ходе мониторинга информация о величинах $P_{\Delta PG}$ и по ним — о запасах устойчивости (на основе частотных критериев теории устойчивости) используется для формирования командных (управляющих) сигналов, вызывающих срабатывание соответствующих исполнительных механизмов, обеспечивающих реализацию превентивных мер по недопущению развития аварийных процессов. Важным обстоятельством является то, что к срабатыванию исполнительных механизмов в условиях функционирования ЯЭУ (особенно в предаварийных и аварийных режимах) предъявляются весьма жесткие требования в части быстродействия и высокой надежности их включения, что может быть обеспечено средствами автоматизации и эффективными конструктивными решениями.

Структурная схема автоматической системы запуска исполнительных механизмов, обеспечивающих предаварийную или аварийную подпитку оборудования ЯЭУ [9], представлена на рис. 1.

Сигналом к автоматическому открытию клапана паропровода для пуска турбонасоса подпитки будет служить в такой системе совпадение текущих запасов стабильности теплообмена с заданными опорными значениями. Упрощенным вариантом мониторинга может быть простое сравнение осредненных значений режимных параметров с их аварийными уставками, но в таком случае срабатывание

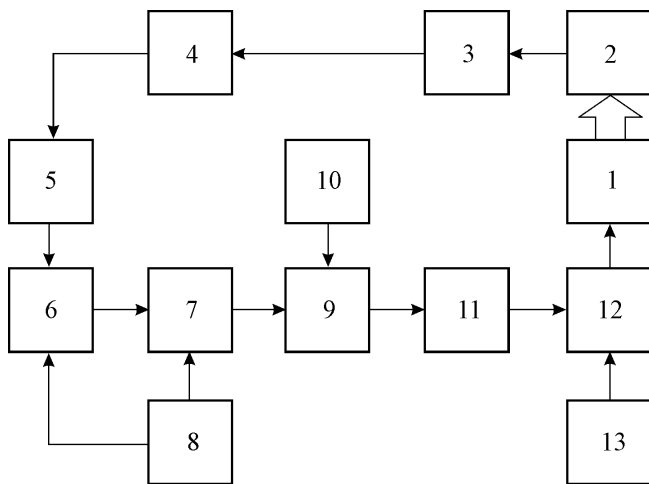


Рис. 1. Структура автоматической системы запуска режима подпитки:

1 — нуждающийся в подпитке технологический элемент ЯЭУ (реактор, парогенератор); 2 — система датчиков флуктуаций режимных параметров; 3 — система спектрального анализа измерительных сигналов; 4 — блок цифровой обработки спектральных характеристик; 5 — блок вычисления значений частотных передаточных функций; 6 — анализатор запасов стабильности теплогидравлических процессов; 7 — компаратор; 8 — задатчик базовых уставок; 9 — быстродействующий нормально-закрытый автоматический клапан; 10 — источник неподготовленного пара; 11 — специализированный паровой турбопривод; 12 — насосный агрегат; 13 — резервуар подпиточной воды

системы подпитки будет осуществляться с задержкой — уже по факту развития аварийного процесса, а не в режиме упреждения такового.

Основной характеристикой турбопривода 11 является высокое быстродействие.

Примером технического обеспечения эффективного включения резервного насосного оборудования подпитки парогенератора может служить агрегат с комбинированным турбоприводом, характеризующийся сокращенным временем включения в работу [10]. Такое техническое решение упрощает и ускоряет решение задачи аварийного запуска насосов подпитки, позволяя запустить привод аварийного насоса паром из холодного состояния (резерва). Более того, повышенные значения коэффициентов трения, свойственные двухфазному потоку, обеспечат минимизацию постоянной времени (крутизну кривой разгона) и сокращение времени переходного процесса при запуске агрегата.

Дополнительным техническим эффектом является также то, что подобная конструкция дает возможность совместить в одном корпусе турбину и сепаратор жидкой фазы двухфазного потока, что позволит просто и надежно подавать на лопаточную турбину пар, практически лишенный конденсата. Такое техническое решение может обеспечить подключение питающего турбонасосного агрегата непосредственно к паровому объему одного из парогенераторов через быстродействующий нормально-закрытый клапан, поскольку технологически парогенератор является источником влажного пара.

Выводы

1. Теоретически обоснованная возможность по флуктуациям режимных параметров оперативно диагностировать скрытые негативные процессы в теплообменном оборудовании ядерных энергетических установок даёт инструмент использования информации о динамике теплогидравлических процессов, представленной в неявном виде, для превентивного управления операциями аварийной подпитки оборудования с применением дополнительной системы устранения дефицита водной среды, возникшего вследствие утечек.

2. Разработанная структурная схема системы автоматического запуска режима подпитки, в которой учитываются результаты измерения по флуктуациям режимных параметров частотных передаточных функций, отражающих скрытые факторы аномального развития теплогидравлических процессов в ядерных энергоустановках, может быть агрегирована с системой применения комбинированного турбопривода подпиточного насоса, в которой можно использовать несепарированный влажный пар парогенераторов в условиях аварийного электрообесточивания штатных подпиточных насосов.

Список использованной литературы

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року : Схвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 №145-р. [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-%D1%80>
2. *Walker Samuel J.* Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective / Samuel J. Walker // Berkeley: University of California Press, 2004. — P. 231.
3. Опыт АЭС Фукусима-1 для повышения экологической безопасности атомной энергетики Украины / Д. В. Билей, В. Н. Вашенко, В. В. Злочевский, А. Ю. Погосов, В. И. Скалозубов, А. В. Шавлаков. — К. : Гос. академия последиplomного образования, 2012. — 194 с.
4. *Погосов А. Ю.* Анализ влияния инцидентных факторов на развитие аварийных событий с разрушением активных зон реакторов АЭС в сейсмоопасных регионах / А. Ю. Погосов, В. П. Кравченко // Ядерна енергетика та довкілля. — 2013. — № 1. — С. 63—67.
5. *Погосов А. Ю.* Диагностика скрытой динамики процессов в реакторных установках АЭС / А. Ю. Погосов. — Одесса : Наука и техника, 2013. — 288 с.
6. *Королев А. В.* Повышение теплотехнической надежности оборудования АЭС / А. В. Королев // Тр. Одесского политехнического университета. — 2008. — Вып. 1(29). — С. 103—105.
7. А. с. СССР № 1513305 МКИ F22В. Диагностическая система Герлиги—Погосова—Хабенского для контроля запаса теплогидравлической устойчивости парогенерирующего канала / Герлига Владимир Антонович, Погосов Алексей Юрьевич, Хабенский Владимир Беницианович. — Бюл. изобретений СССР. — 1989. — № 37.
8. *Деревянко О. В.* Предаварийные физические процессы и надежный теплоотвод в ядерных энергоустановках : Монография / О. В. Деревянко, А. В. Королев, А. Ю. Погосов. — Одесса : Наука и техника, 2014. — 264 с.
9. *Деревянко О. В.* Экстраординарные теплогидравлические процессы ЯЭУ и энерго-информационные возможности их автоматической аттенюации / О. В. Деревянко, А. В. Королев, А. Ю. Погосов // Междунар. науч.-исслед. журнал. — 2013. — № 12 (19), ч. 1. — С. 79—81.
10. *Королев А. В.* Подпитка парогенератора от надежных источников / А. В. Королев, О. В. Деревянко // Мат. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. «Повышение безопасности и эффективности атомной энергетики», Одесса (Украина), 24—28 сент. 2012 г. — Одесса: НПЦ «Энергоатом», 2013. — С. 111—113.

Получено 05.03.2014