Ю. Н. Овдиенко, А. В. Кучин,
В. А. Халимончук

Государственный научно-технический центр по ядерной и
радиационной безопасности

О срабатывании аварийной защиты по периоду реактора в режиме ускоренной разгрузки блока с ВВЭР-1000

Проанализированы процессы, вызывающие срабатывание аварийной защиты (АЗ) в режиме ускоренной разгрузки мощности (УРБ) в условиях внедрения новой аппаратуры контроля нейтронного потока АКНП-И. Представлены результаты расчетных исследований режима УРБ, имевших место на АЭС Украины, а также сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Исследовано влияние на протекание режима УРБ таких факторов, как время падения ОР СУЗ, момент кампании, на котором возникает режим УРБ, шаг дискретизации при определении периода реактора.

Приведены результаты расчетного обоснования изменения в алгоритме АКНП-И шага дискретизации при определении периода реактора в диапазоне мощности $25 \div 75 \% N_{\text{ном}}$.

Ю. М. Овдієнко, О. В. Кучин, В. А. Халімончук

Про спрацьовування аварійного захисту за періодом реактора в режимі прискореного розвантаження блока з ВВЕР-1000

Проаналізовано процеси, що викликають спрацьовування аварійного захисту (АЗ) у режимі прискореного розвантаження потужності (ПРБ) в умовах впровадження нової аппаратури контролю нейтронного потоку АКНП-І. Представлено результати розрахункових досліджень режиму ПРБ, що мали місце на АЕС України, а також порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. Досліджено вплив на протікання режиму ПРБ таких факторів, як час падіння ОР СУЗ, момент кампанії, на якому виникає режим ПРБ, крок дискретизації при визначенні періоду реактора.

Наведено результати розрахункового обґрунтування зміни в алгоритмі АКНП-І кроку дискретизації при визначенні періоду реактора в діапазоні потужності $25 \div 75 \% N_{\text{ном}}$.

Режим ускоренной разгрузки мощности (УРБ) энергоблока с реактором ВВЭР-1000 предусмотрен для быстрого его перевода на уровень мощности ($40 \div 50 \% N_{\text{ном}}$). Этот режим возникает в случае отказа в работе определенного оборудования реакторной установки и осуществляется путем сброса группы УРБ ОР СУЗ. На уровне мощности $40 \div 50 \% N_{\text{ном}}$ блок поддерживается с помощью дополнительного привлечения к разгрузке 10-й (рабочей) группы ОР СУЗ.

В данном режиме после погружения группы УРБ ОР СУЗ в подкритическом состоянии реактора наблюдается рост нейтронной мощности, прежде чем она стабилизируется на новом пониженном уровне, что связано с действием отрицательных обратных связей. Скорость роста нейтронной мощности на этапе ее стабилизации может быть столь значительной, что даже возможно срабатывание аварийной защиты (АЗ) реактора по периоду, если в алгоритме АКНП не предусмотрены специальные меры для предотвращения неоправданного срабатывания АЗ в режиме УРБ без снижения безопасности эксплуатации РУ в энергетическом диапазоне.

Описание алгоритма определения периода реактора в АКНП-И. В АКНП-И для определения периода реактора используется изменение нейтронной мощности на заданном временном интервале τ , предшествующем моменту расчета периода. Длительность этого временного интервала зависит как от уровня нейтронной мощности реактора, так и от периода реактора. Так, при работе реактора на уровне мощности $25 \div 75 \%$ номинальной (диапазон, в котором находится мощность реактора после прохождения режима УРБ) $\tau = 1,2$ с. Этот интервал времени разбивается на восемь дискретных шагов, для которых определяется среднее значение токов ионизационных камер. Временное поведение этих токов на интервале τ аппроксимируется экспонентой, показатель которой и представляет собой значение периода в текущий момент времени t , являющийся концом интервала τ . Для детектирования нейтронного потока используются боковые ионизационные камеры, расположенные в биологической защите. Каждый канал детектирования (всего 6 каналов, далее они обозначаются как УНО 1–УНО 6 — устройство накопления и обработки) состоит из верхней и нижней камер. Для определения периода реактора системой АКНП-И используется суммарный сигнал верхней и нижней камер, причем весовой коэффициент для верхней камеры в 1,5 раза выше, чем для нижней.

Расчетные исследования режима УРБ. Сравнение с экспериментальными данными. За период с конца 2007 г. по середину 2008 г. на украинских АЭС были зарегистрированы четыре режима УРБ, вызванные различными причинами. На двух энергоблоках режимы УРБ наблюдались в конце кампании, когда отрицательный температурный коэффициент реактивности имеет наибольшее значение по модулю. В этих обоих случаях режимы УРБ перешли в АЗ, вызванную уменьшением периода реактора ниже граничного значения в 10 с.

Далее рассматриваются результаты моделирования одного из режимов УРБ, произошедшего 22 сентября 2007 г. на 2-м энергоблоке Хмельницкой АЭС при эксплуатации 3-й топливной загрузки (конец кампании) из-за отключения электронасоса в системе регулирования ТПН-1 (турбопитательный насос) по снижению давления масла, что в конечном итоге привело к формированию сигнала «Отключение ТПН-1» и последующему срабатыванию режима УРБ. После сброса группы УРБ ОР СУЗ в активную зону

Рис. 1. Изменение нейтронной мощности реактора при срабатывании УРБ на 2-м блоке Хмельницкой АЭС

приблизительно через 3 с система АКНП-И зарегистрировала возрастание нейтронного потока в реакторе с периодом менее 10 с, в результате чего произошло срабатывание АЗ реактора по периоду. Расчетные значения коэффициентов реактивности по температуре топлива и теплоносителя для состояния активной зоны на 22 сентября 2007 г. составили соответственно $-2,69 \cdot 10^{-5}$ и $-55,56 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

При моделировании этого режима расчет периода реактора был максимально согласован с алгоритмом АКНП-И. Для этого, как и в алгоритме АКНП-И, использовался суммарный сигнал верхней и нижней камер с весовым коэффициентом 1,5 для верхней камеры, а интервал времени, на котором определялся период реактора с помощью аппроксимации временной зависимости плотности потока нейтронов в виде

Рис. 2. Изменение нейтронной и тепловой мощности реактора при срабатывании УРБ для различных моментов кампании

Рис. 3. Изменение периода реактора при срабатывании УРБ для различных моментов кампании ($\tau = 1,2$ с)

экспоненты, принимался равным $\tau = 1,2$ с. Для моделирования показаний боковых камер в расчетах по программе DYN3D использовались значения плотностей потоков нейтронов в ячейках периферийных ТВС, ближайших к камерам детектирования нейтронного потока. В расчетах было принято, что время падения группы УРБ составляет 1,8 с.

На рис. 1 представлена зависимость изменения нейтронной мощности реактора от времени при срабатывании УРБ на 2-м блоке Хмельницкой АЭС, полученная с помощью расчета по программе DYN3D без моделирования срабатывания АЗ. Здесь же приведены результаты показаний каналов измерения нейтронной мощности (УНО-1÷УНО-6). Наблюдаемые отличия в расчетных и экспериментальных значениях скоростей падения и подъема нейтронной мощности в подкритическом состоянии могут быть связаны со многими факторами: возможными неточностями временной регистрации нейтронной мощности и положения ОР СУЗ; отличиями в расчетных и экспериментальных значениях «весов» стержней УРБ и коэффициентов реактивности; отличием реального значения эффективной доли запаздывающих нейтронов от использованного в расчете; отсутствием адекватного описания движения каждого ОР СУЗ группы УРБ. В частности, реальное время падения стержней группы УРБ согласно отчету Хмельницкой АЭС об инциденте находилось в диапазоне 1,6÷1,8 с. В расчетах же, как упоминалось ранее, для всех стержней группы использовано одинаковое значение, равное 1,8 с.

Минимальное расчетное значение периода реактора в этом процессе составило 6,3 с, а экспериментально зарегистрированное и осредненное по шести каналам регистрации — 7,2 с. Заметим, что каждый из каналов регистрации периода представляет его значение в целочисленном виде (по пяти каналам — 7 с и по одному каналу — 8 с), поэтому реальное расхождение между экспериментом и расчетом может быть другим. Чтобы оценить это реальное расхождение, были вы-

полнены расчеты периодов с использованием алгоритма АКНП-И (но без представления в целочисленном виде) для каждого из шести каналов их регистрации на основании временного поведения токов камер в каждом канале. В результате такой оценки установлено, что АКНП-И в данном состоянии реактора должна была зарегистрировать по шести каналам измерения период от 8,4 с до 9,0 с. Таким образом, на основании имеющихся данных можно сказать, что период, определяемый программой DYN3D, с большой вероятностью максимально на 2,7 с меньше регистрируемого АКНП-И при одном и том же алгоритме вычисления.

Выполненная расчетная оценка изменения нейтронной/тепловой мощности и величины периода реактора в режиме УРБ для различных моментов времени 4-й топливной загрузки 2-го энергоблока Хмельницкой АЭС (в данном случае в режиме УРБ была задействована также рабочая 10-я группа ОР СУЗ) представлена на рис. 2 и 3.

Как следует из данных рис. 3 и с учетом приведенной выше оценки возможного различия в величине периода, определяемой программой DYN3D и регистрируемой АКНП-И, уже после 100 эффективных суток эксплуатации блока с ВВЭР-1000 в режиме УРБ возможно срабатывание АЗ по периоду. Поскольку это ведет к простоя блока, то важно исключить неоправданное срабатывание АЗ по периоду в подкритическом состоянии реактора. Далее исследуются возможные варианты достижения этой цели без снижения достигнутого уровня безопасности РУ.

Дополнительными расчетными исследованиями режима УРБ в состоянии энергоблока № 2 Хмельницкой АЭС за 22 сентября 2007 г. (конец 3-й кампании, когда имело место срабатывание АЗ) показано (рис. 4 и 5), что период реактора в режиме УРБ для этого состояния активной зоны был бы более 10 с, если бы время падения ОР СУЗ в активную зону превышало 8 с. Однако это время падения находится за пределами проектного времени погружения,

Рис. 4. Изменение мощности в переходном процессе при различном времени падения группы УРБ

Рис. 5. Изменение периода в переходном процессе при различном времени падения группы УРБ

определенного и обоснованного в ТОб на РУ. К тому же увеличение времени падения ОР СУЗ противоречит принципам обеспечения безопасности. Таким образом, решение данной проблемы за счет увеличения времени падения ОР СУЗ в активную зону неприемлемо.

Кроме того, на том же состоянии активной зоны за 22 сентября 2007 г, рассмотрен другой способ воздействия

на скорость роста нейтронной мощности в режиме УРБ, заключающийся в поэтапном введении отдельных стержней ОР СУЗ.

Из рассмотренных трех вариантов:

1) после начала движения ОР СУЗ (05-36, 06-21, 13-30) с задержкой 3,8 с начинают двигаться остальные стержни группы УРБ (03-28, 11-22, 10-37);

Рис. 6. Изменение мощности в переходном процессе сброса группы УРБ при поэтапном вводе ОР СУЗ

Рис. 7. Изменение периода в переходном процессе сброса группы УРБ при поэтапном вводе ОР СУЗ

2) после начала движения ОР СУЗ (05-36, 06-21, 13-30) с задержкой 1,5 с начинают двигаться остальные стержни группы УРБ (03-28, 11-22, 10-37);

3) после начала движения ОР СУЗ (05-36, 06-21, 13-30) с задержкой 1,5 с начинает двигаться стержень группы УРБ 03-28, далее с задержкой 3,0 с — стержень 11-22 и с задержкой 45 с погружается стержень 10-37

только в варианте 3 (рис.6, 7 и 8) за счет продления общего времени погружения ОР СУЗ группы УРБ (последний стержень достигает низа активной зоны в момент времени $t = 6,3$ с после начала УРБ, когда обратные отрицательные связи уже оказывают слабое воздействие на рост нейтронной мощности) удастся достичь увеличения периода более 10 с. Однако данное предложение довольно сложно

Рис. 8. Изменение положения ОР СУЗ в переходном процессе сброса группы УРБ для варианта 3 поэтапного ввода ОР СУЗ

Рис. 9. Изменение периода реактора при срабатывании УРБ в зависимости от момента кампании для различных интервалов времени

в реализации и поэтому, как и первое (увеличение времени падения ОР СУЗ), является неприемлемым.

В связи с невозможностью реализации рассмотренных выше решений для прохождения режима УРБ без срабатывания АЗ рассмотрим, как влияет на измеряемый период увеличение времени τ . Результаты этих исследований представлены на рис. 9.

Как следует из рис. 9, для всех значений τ минимальный период разгона реактора реализуется для состояния активной зоны реактора на конец работы топливной загрузки. При увеличении τ до 4,0 с период реактора в УРБ не уменьшается ниже 10 с на протяжении работы всей топливной загрузки и изменяется от 17,4 с в начале кампании до 11,8 с

Рис. 10. Период, измеренный аппаратурой АКНП-И
(«истинный» период $T = 10$ с)

Рис. 11. Период, измеренный аппаратурой АКНП-И
(«истинный» период $T = 5$ с)

в конце. Таким образом, при использовании в АКНП-И $\tau = 4,0$ с для определения периода реактора в диапазоне мощности 25÷75 % номинальной аварийная защита в режиме УРБ срабатывать не будет. Если на основании временного изменения потока нейтронов в виде $N(t) = N_0 \cdot \exp(t/T)$ с $T = 5$ и 10 с вычислить период реактора в соответствии

с алгоритмом, использованным в АКНП-И с $\tau = 1,2$ и 4,0 с, то можно убедиться (рис. 10), что максимальная задержка в формировании сигнала по уменьшению периода $T < 10$ с увеличится также с 1,2 до 4,0 с, т. е. увеличение запаздывания составит 2,8 с. Заметим, что это увеличение запаздывания будет уменьшаться с уменьшением истинного периода

Таблица 1. Максимальный рост нейтронной мощности реактора при выбросе кластера

Максимальное увеличение нейтронной мощности реактора при выбросе кластера	Исходный уровень мощности реактора перед выбросом кластера					
	Начало кампании			Конец кампании		
	25 % $N_{\text{ном}}$	50 % $N_{\text{ном}}$	75 % $N_{\text{ном}}$	25 % $N_{\text{ном}}$	50 % $N_{\text{ном}}$	75 % $N_{\text{ном}}$
$(W_{\text{макс}} - W_{\text{нач}})$, МВт	167	119	162	200	185	237
$(W_{\text{макс}}/W_{\text{нач}})$, отн.ед.	1,22	1,08	1,07	1,27	1,12	1,11

Таблица 2. Максимальный рост нейтронной мощности при выбросе кластера, фиксируемый каналами измерения

Состояние активной зоны реактора	Рост нейтронной мощности, МВт					
	Первый комплект АКНП			Второй комплект АКНП		
	ИК-27	ИК-17	ИК-7	ИК-22	ИК-12	ИК-2
Начало кампании:						
$N = 25 \%$	202,0	124,1	54,9	294,0	64,3	86,7
$N = 50 \%$	122,3	79,2	39,5	163,1	44,1	59,9
$N = 75 \%$	168,4	106,6	58,3	220,1	61,9	86,1
Конец кампании:						
$N = 25 \%$	234,3	143,3	74,0	313,9	81,6	110,6
$N = 50 \%$	184,5	123,2	68,4	230,6	74,8	98,0
$N = 75 \%$	234,8	156,5	88,1	292,9	96,0	125,3

реактора (рис. 11). Чтобы обеспечить значение $\tau = 4,0$ с в алгоритме АКНП-И, необходимо изменить шаг дискретизации с $\Delta t = 0,15$ с на $\Delta t = 0,5$ с. Следует отметить, что шаг дискретизации 0,15 с используется в алгоритме АКНП-И для вычисления периода не только в подкритическом состоянии реактора, но и при эксплуатации его на уровне мощности в диапазоне $25 \div 75 \% N_{\text{ном}}$. Поэтому, чтобы реализовать шаг дискретизации $\Delta t = 0,5$ с вместо 0,15 с, необходимо показать, что это безопасно и при эксплуатации реактора в диапазоне мощностей $25 \div 75 \% N_{\text{ном}}$. Для этого следует оценить влияние данной замены на формирование сигнала АЗ по периоду при работе реактора на стационарном уровне мощности в диапазоне $25 \div 75 \% N_{\text{ном}}$ и выполнить в этом диапазоне мощностей анализ аварий, связанных с вводом положительной реактивности.

Расчетное обоснование изменения шага дискретизации при определении периода реактора в диапазоне мощности $25 \div 75 \% N_{\text{ном}}$. Для обоснования такой возможности должны быть исследованы аварийные ситуации, рассмотренные в техническом проекте по обоснованию безопасной эксплуатации реакторной установки: выброс органа регулирования (кластера ОР СУЗ); самоход регулирующей группы; ошибка при подключении ранее не работавшей петли; разрыв паропровода; аварии с разбавлением бора. Поскольку в данном случае авария, связанная с выбросом органа регулирования (с точки зрения скорости введения положительной реактивности, скорости роста нейтронной мощности и быстроты протекания процессов в активной зоне реактора) оказалась наиболее критичной, то далее приводится анализ только этой аварии.

Остановимся на результатах моделирования «выброса кластера», когда в качестве исходного состояния рассматривается реальное состояние активной зоны энергоблока № 2 Хмель-

ницкой АЭС в 4-й топливной кампании на уровне мощности $25 \div 75 \% N_{\text{ном}}$. Предполагалось, что происходит выброс кластера регулирующей группы с координатами 10-35 за время 0,1 с. Исходная глубина погружения группы принималась максимально возможной при работе реактора на конкретном уровне мощности: $H_{10} = 45 \%$ на уровне мощности $25 \% N_{\text{ном}}$ и $H_{10} = 70 \%$ на уровне мощности 50% и $75 \% N_{\text{ном}}$. Для расчета периода реактора использовалась процедура, реализованная в системе АКНП-И. В качестве сигналов датчиков использовались значения плотностей потоков нейтронов на участках ТВС, расположенных в непосредственной близости к датчикам. Выброс кластера рассматривался для двух состояний активной зоны реактора — на начало и конец работы топливной загрузки. Моделирование этих режимов производилось без учета срабатывания АЗ.

Максимальное увеличение нейтронной мощности для исследуемых вариантов приведены в табл. 1.

Выполненные расчеты показали, что сигнал АЗ по превышению допустимого уровня нейтронной мощности в случае выброса кластера из реальных состояний активной зоны с исходным уровнем мощности в диапазоне $25 \div 75 \% N_{\text{ном}}$ не формируется (табл. 2), так как ни один из комплектов АКНП не фиксирует превышение уставки (210 МВт) одновременно для двух каналов измерения.

На основании изменения нейтронного потока в каналах измерения для каждого варианта были рассчитаны периоды реактора для различных интервалов времени его измерения τ : 1,2; 2,0; 3,0; 4,0 с. Сигнал АЗ по периоду реактора формируется, когда двумя каналами из любого комплекта измерительной аппаратуры сформированы сигналы АЗ по периоду. Сигнал АЗ по периоду в каждом канале измерения формируется, если в канале достигнута уставка по периоду реактора менее 10 с и получено подтверждение

Таблица 3. Моменты времени, когда период реактора становится менее 10 с, и минимальные значения периода реактора в аварии с выбросом кластера для состояний активной зоны на начало и конец работы топливной загрузки на уровне мощности реактора 25 % $N_{\text{ном}}$

Интервал времени расчета периода, τ	Время, когда период реактора становится менее 10 с / минимальное значения периода реактора в аварии с выбросом кластера					
	Первый комплект АКНП			Второй комплект АКНП		
	ИК-27	ИК-17	ИК-7	ИК-22	ИК-12	ИК-2
Начало кампании, $N = 25\%$						
1,2 с	0,20/3,8	0,30/5,9	– /12,8	0,15/2,7	– /11,0	0,46/8,3
2,0 с	0,49/6,4	1,09/10,0	– /21,7	0,34/4,6	– /18,6	– /14,0
3,0 с	1,46/9,9	– /15,4	– /33,5	0,78/7,1	– /28,7	– /21,6
4,0 с	– /13,4	– /21,1	– /46,1	1,78/9,7	– /39,4	– /29,7
Конец кампании, $N = 25\%$						
1,2 с	0,19/3,4	0,27/5,3	0,66/9,0	0,15/2,7	0,51/9,0	0,35/6,8
2,0 с	0,44/6,0	0,82/9,4	– /17,6	0,33/4,6	– /16,0	– /12,0
3,0 с	1,18/9,5	– /15,0	– /28,6	0,76/7,3	– /26,0	– /19,3
4,0 с	– /13,2	– /21,3	– /41,1	– /10,1	– /37,2	– /27,4

этим каналом последующего роста нейтронной мощности на 5 % номинального значения. Как показывают результаты моделирования (табл. 3), при проектном значении $\tau = 1,2$ с только на уровне мощности 25 % $N_{\text{ном}}$ практически во всех каналах измерения достигается уставка по периоду реактора менее 10 с. Однако сигнал АЗ по периоду (АЗТ) в каждом канале измерения не будет сформирован, поскольку после достижения уставки по периоду имеет место снижение мощности (т. е. нет подтверждения последующего 5 %-го роста нейтронной мощности).

Однако по данным эксплуатирующей организации подтверждение 5 %-го роста уровня мощности реактора в АКНП-И реализовано несколько отличным образом: принято, что если в момент времени t_1 зафиксирован период реактора менее 10 с и он остается менее 10 с на протяжении 0,8 с, то по данному каналу измерения в момент времени $t_1 + 0,8$ с формируется сигнал АЗ. Благодаря такой реализации формирования сигнала АЗ по периоду реактора в случае $\tau = 1,2$ с он будет сформирован. Таким образом, изменение τ с 1,2 с на 4,0 с ведет к тому, что в аварии «выброс кластера» сигнал по периоду не будет сформирован на мощности 25 % $N_{\text{ном}}$. На других уровнях мощности из рассматриваемого диапазона 25÷75 % $N_{\text{ном}}$ как для $\tau = 1,2$ с, так и для $\tau = 4,0$ с сигнал АЗ по периоду или мощности не формируется. Таким образом, при введении $\tau = 4$ с безопасность реактора в аварии, связанной с выбросом кластера в диапазоне мощностей 25÷75 % $N_{\text{ном}}$, обеспечивается ограничением мощности реактора только за счет отрицательных обратных связей. Отметим, что это было характерно и для старой модификации АКНП (АКНП-3 и АКНП-7).

Оценка безопасности в данной аварии, протекающей без срабатывания АЗ на уровне мощности 25÷75 % $N_{\text{ном}}$, была произведена на основе анализа выполнения условий приемлемости для горячего канала. Предполагалось, что: горячий

канал расположен в ТВС, находящейся в непосредственной близости с выбрасываемым кластером; с помощью коэффициента горячего канала обеспечивалось достижение в исходном состоянии максимально допустимых линейных нагрузок 448 Вт/см на высоте до 50 % от низа активной зоны (при этом интегральная мощность горячего канала на уровне мощности реактора в исходном состоянии 25 % $N_{\text{ном}}$ составила 86,6 кВт).

Выполненные исследования показали, что в аварии «выброс кластера», происходящей на уровне мощности 25 % $N_{\text{ном}}$, критические параметры имеют наименьший запас до допустимых значений. Это объясняется тем, что в исходном состоянии с мощностью 25 % $N_{\text{ном}}$ поле энерговыделения сильнее смещено в верхнюю часть активной зоны и выбрасываемый кластер имеет большую глубину погружения. Поэтому в переходном процессе поле энерговыделения сильнее смещается в верх активную зоны, что приводит к более существенному уменьшению коэффициента запаса до кризиса теплообмена. Расчетный анализ горячего канала показал выполнение критериев приемлемости в этом случае, а именно: максимальная температура топлива 1830 °С и не превышает температуру плавления; максимальная температура оболочки около 352 °С; минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена 1,055. Это свидетельствует о возможности изменения в алгоритме АКНП-И значения τ , используемого для определения периода реактора в диапазоне мощностей 25÷75 % $N_{\text{ном}}$, с 1,2 на 4,0 с.

Кроме этого, рассмотрено моделирование «выброса кластера» в консервативном приближении. В данном случае предполагается, что происходит выброс одного кластера из группы УРБ (ТВС с координатами 13-32), находящейся в полностью погруженном состоянии. Для увеличения «веса» выбрасываемого кластера искусственно повышается поток тепловых нейтронов в районе кластера, для чего зануляется

концентрация ядер ксенона-135 и самария-149 в ТВС с кластером и в шести ближайших ТВС. Вследствие этого «вес» выбрасываемого кластера на уровне мощности 25 и 75 % $N_{\text{ном}}$ составил приблизительно 0,4 %. В этом случае выбеги нейтронной мощности и скорость ее изменения значительно больше, чем при реальных положениях ОР СУЗ. Поэтому будут формироваться сигналы АЗ как по уровню мощности, так и по периоду. При этом для всех рассмотренных значений τ превышение уставки по уровню нейтронной мощности наступает раньше, чем по периоду. Для наихудшего из рассмотренных вариантов выброса кластера в исходном состоянии на уровне мощности $N = 25 \% N_{\text{ном}}$ выбег нейтронной мощности, регистрируемый каналами измерения №№ 2 и 22, составляет 2800 МВт. Если уставка по уровню мощности переведена на пониженный уровень, то она будет достигнута через 0,06 с после начала выброса кластера. Если же оператор не переключил уставку на пониженный уровень мощности, то срабатывания аварийной защиты по мощности не происходит (не достигнута мощность 107 % $N_{\text{ном}}$). Однако в этом случае сигнал АЗ по периоду реактора формируется для всех τ . Максимальное время задержки в срабатывании АЗ по периоду для $\tau = 4,0$ с составило 1,47 с: 0,37 с — момент превышения уставки по периоду, регистрируемому каналами измерения №№ 2 и 22; 0,8 с — время для подтверждения 5 %-го роста мощности реактора; 0,3 с — время задержки в срабатывании АЗ после выработки сигнала по периоду. Исследования показывают, что и в этом случае критерии приемлемости выполняются.

Выводы

Рассмотренные исследования послужили обоснованием внесения изменений в алгоритм АКНП-И в части вычисления периода реактора в диапазоне мощности 25÷75 % $N_{\text{ном}}$.

Проведенный эксперимент по ускоренной разгрузке 2-го энергоблока Запорожской АЭС в конце 21-й кампании показал (до проведения эксперимента в этой кампании был зарегистрирован режим УРБ с последующим срабатыванием АЗ), что изменение в алгоритме АКНП-И шага дискретизации при определении периода реактора в диапазоне мощности 25÷75 % $N_{\text{ном}}$ с 0,15 на 0,5 с исключает в режиме УРБ необоснованное (в подкритическом состоянии реактора) срабатывание АЗ по периоду.

Литература

1. *U. Grundmann, U. Rohde, S. Mittag, S. Kliem*. DYN3D Version 3.2. Code for Calculation of Transients in Light Water Reactors (LWR) with Hexagonal or Quadratic Fuel Elements. Description of Models and Methods, FZR 434, August, 2005.
2. *Yu. Ovdienko, V. Khalymonchuk, O. Kuchin*. Conservative Approaches for Studying Emergency Mode of Rejecting VVER-1000 Cluster at the Rated Level of Power Performed with Using of Spatial Kinetics Computer Code. New Aspects and Developments of Calculations, Evaluations and Assessments in the Field of Reactor Physics, 21–25 June, 2004, Garching, Germany.