

ЧТО НЕОБХОДИМО ОПРЕДЕЛЯТЬ: ПЕРИОД ИЛИ РЕАКТИВНОСТЬ РЕАКТОРА?

В. И. Борисенко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Внедрение современных систем нейтронного контроля на АЭС обеспечивает более надежный контроль параметров безопасности реактора. Несмотря на то, что в соответствии с требованиями нормативных документов современные средства позволяют контролировать такие параметры безопасности как реактивность и скорость ее ввода, их не включают в проект реакторной установки и контролируют только период. В статье рассматриваются ограничения такого подхода.

Ключевые слова: реактивность, период реактора, аппаратура контроля нейтронного потока, аварийная защита, ускоренная предупредительная защита.

К наиболее опасным последствиям при эксплуатации АЭС могут приводить так называемые реактивностные аварии, связанные с быстрым и/или неконтролируемым вводом положительной реактивности, и, как следствие, быстрому росту мощности реактора. Контроль нейтронного потока и динамики его изменения относится к важнейшим задачам обеспечения безопасной эксплуатации ядерного реактора. Это нашло отражение и в нормативных документах, так например, в соответствии с п. 3.3.1 [1]: «В состав РУ входят информационные, управляющие, механические и электромеханические системы, которые в совокупности образуют систему управления и защиты (СУЗ), предназначенную для:

управления реактивностью и мощностью РУ;

контроля плотности нейтронного потока, скорости его изменения, технологических параметров необходимых для защиты и управления реактивностью и мощностью РУ...».

Рассмотрим, как реализуются требования нормативных документов, в применяемых на АЭС системах контроля нейтронной мощности и скорости ее изменения.

1. Скорость изменения плотности нейтронного потока (ПНП).

В качестве скорости изменения ПНП обычно определяют не саму скорость изменения ПНП, а такие параметры как период и реактивность. Рассмотрим, что означают эти параметры в физике реакторов.

1.1. Реактивность.

Скорость изменения ПНП в критическом реакторе (без внешнего источника нейтронов) является следствием отклонения от единицы эффективного коэффициента размножения нейтронов $k_{эф}$ в ту или другую сторону. Изменение $k_{эф}$ может быть вызвано изменением материального состава и/или параметров активной зоны реактора (ввод-вывод топлива, поглотителей; температуры, плотности материалов активной зоны и т.п.), изменением свойств отражателя и другими причинами. Относительное отклонение $k_{эф}$ от стационарного значения, для которого $k_{эф}$ обычно равно единице, называется реактивностью:

$$\rho(t) = \frac{k_{эф} - 1}{k_{эф}}. \quad (1)$$

В более общем виде реактивность определяется как относительное изменение эффективного коэффициента размножения нейтронов для двух состояний активной зоны, характеризующейся $k_{эф}$ равными k_0 и k_1 соответственно:

$$\rho(t) = \frac{k_1 - k_0}{k_1 k_0}. \quad (2)$$

Изменение ПНП, вызванное изменением реактивности, может быть определено из уравнений кинетики точечной модели реактора, которое имеет следующий вид [2]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n + \sum_i \lambda_i c_i + q, \quad (3)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i c_i, \quad (4)$$

где все обозначения общепринятые: $\rho(t)$ - реактивность; $n(t)$ - плотность (концентрация) нейтронов; $c_i(t)$ - плотность (концентрация) ядер-предшественников запаздывающих нейтронов i -го сорта (обычно рассматривают шесть групп запаздывающих нейтронов); β_i - доля запаздывающих нейтронов i -го сорта; $\beta_{эф} = \sum_i \beta_i = 0.0064$; $i = 1, 6$ (зависит от изотопного состава топлива); λ_i - постоянная распада запаздывающих нейтронов i -го сорта; l - среднее время генерации нейтронов; q - внешний источник нейтронов; t - время.

Система уравнений (3), (4) имеет аналитическое решение для некоторых видов изменения $k_{эф}$ (или ρ). Так, например, при скачкообразном изменении $k_{эф}$ общее решение для нейтронного потока $n(t)$ может быть получено в виде [2]

$$n(t) = \sum_{j=1}^7 N_j \exp(\omega_j t), \quad (5)$$

где ω_j - корни характеристического уравнения

$$\omega_j = \frac{\Delta k}{l} - \frac{\omega_j k}{l} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\omega_j + \lambda_i}, \quad (6)$$

а коэффициенты N_j определяются из уравнения

$$N_j = \frac{l + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\omega_j + \lambda_i}}{l + k \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \lambda_i}{(\omega_j + \lambda_i)^2}}. \quad (7)$$

Из уравнения (6) можно получить известное уравнение «обратных часов», устанавливающее связь между реактивностью реактора и периодом [2]:

$$\rho = \frac{l}{kT_j} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T_j}, \quad (8)$$

где $T_j = \omega_j^{-1}$.

Уравнение «обратных часов» имеет большое практическое значение. Оно позволяет получить однозначное соответствие между введенной реактивностью и периодом.

Для подкритического реактора ($k_{эф} < 1$) - все семь корней уравнения (8) – отрицательные величины. Для надкритического реактора ($k_{эф} > 1$) установившийся (асимптотический) период положителен, остальные шесть значений T_j - отрицательные величины. Так как в соответствии с уравнением (5) ПНП определяется как суперпозиция экспонент для семи периодов, то можно заключить, что после скачка реактивности:

для подкритического реактора ПНП с течением времени будет падать по экспоненте с показателем, соответствующей периоду (постоянной времени) наиболее долгоживущей группы запаздывающих нейтронов;

для надкритического реактора ПНП с течением времени будет расти по экспоненте с показателем равным асимптотическому периоду реактора.

1.2. Период.

В соответствии с уравнением (5) можно определить, что период реактора - это время, в течение которого мощность реактора изменяется в e раз.

Таким образом, можно заключить, что для реакторов, описываемых уравнениями (3), (4), установившийся период реактора и реактивность имеют один знак, и с течением времени связь между реактивностью и установившимся периодом определяется однозначно [2].

2. Определение периода реактора.

Почему же и до настоящего времени в эксплуатационной практике в основном контролируют период реактора?

На практике обычно решается непрямая задача – определить, как меняется нейтронный поток при изменении реактивности системы (уравнения (3), (4)), а обратная задача – определить реактивность по изменению нейтронного потока, вызванного таким изменением реактивности. Для этого необходимо решить обращенное уравнение кинетики реактора (ОРУК) – уравнение, «обратное» (относительно ρ) к системе уравнений динамики реактора (3), (4), состоящее в общем случае из семи дифференциальных уравнений. Для решения ОРУК необходимы «значительные» вычислительные затраты. На раннем этапе развития ядерного приборостроения – это было достаточно трудоемкой задачей. Задача решалась с помощью сложных аналоговых, а позднее и цифровых реактиметров. А вот период реактора можно легко посчитать по изменению мощности за заданное время. Для удобства в использовании рассчитаны зависимости между асимптотическим периодом и реактивностью для различных изотопов и времен жизни мгновенных нейтронов [2].

Вот поэтому период реактора используется более широко в эксплуатационной практике и до сих пор. Однако необходимо помнить условия, при которых справедливо соответствие между реактивностью и установившимся периодом реактора, а именно условие, когда реактор можно описать системой уравнений (3), (4). В общем случае это справедливо для реактора без обратных связей, а в случае энергетического реактора, для уровней минимально контролируемого уровня (МКУ) мощности.

Для энергетического реактора с обратными связями нельзя говорить об асимптотическом периоде в соответствии с уравнением (8), так как такой период никогда не может быть установившимся, и поэтому не может быть установлена однозначная связь между «периодом» реактора и величиной введенной реактивности. И как следствие – трудно определить степень опасности в изменении $k_{эф}$. Тем не менее понятие периода реактора широко используется в нормативных и проектных документах в качестве показателя опасной скорости изменения ПНП в энергетическом реакторе. В энергетическом реакторе знак периода будет соответствовать знаку введенной реактивности только на начальной стадии изменения реактивности при условии, что период определяется с малой инерционностью. Если же инерционность измерения реактивности сравнима с постоянными времени действия обратных связей, то в этом случае «опасный» период будет определен с задержкой или вообще не определен.

3. Контроль периода в системах контроля.

На практике для применения в технологическом управлении реактором, с целью минимизации или недопущения формирования ложных сигналов защит по периоду, должны быть обоснованы и заданы дополнительные параметры: время расчета, инерционность, точность вычисления и другие. Для контроля нейтронной мощности и скорости ее изменения на АЭС Украины используются разные поколения аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП). В ранних поколениях АКНП-3 и АКНП-07 используется аналоговая техника вычислений. В современных поколениях АКНП-И и АКНП-ИФ применяется цифровое моделирование для расчета периода и формирования сигналов защит и блокировок по уровню мощности и периоду реактора, а также для определения реактивности. И в аналоговом, и в цифровом исполнении время обновления информации определяется временем опроса измерительных каналов.

Что касается инерционности и погрешности вычислений, то требования к ним определены в проектных документах [3]: инерционность $0,5 T$, где T - измеряемый период; погрешность 10 % при измерении периода в диапазоне мощностей $(1 - 120) \% N_{ном}$

Период реактора может изменяться в широком диапазоне от менее 1 с до более 1000 с. Поэтому для удовлетворения требованиям проектных документов [3] инерционность канала контроля периода должна зависеть от значения определяемого периода. Так, например, в [4] указано, что «Согласно требованиям проектной документации на АКНП-7-02 постоянная времени измерения периода разгона реактора не должна превышать половины значения измеряемого периода в диапазоне от 1 до 120 % $N_{ном}$. По информации от разработчика данной аппаратуры (ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ») минимальная величина постоянной времени измерения периода реализована равной 3 с при значениях периода менее 20 с».

Напомним, что инерционность измерения определяется как время между ступенчатым изменением значения величины на входе измерительного канала и моментом достижения этого же значения на выходе измерительного канала. Постоянная времени измерения - это время, в течение которого на выходе измерительного канала достигается уровень, соответствующий определенному уровню входного сигнала, обычно 63,2 %. Часто эти понятия не «различают». Очевидно, что постоянная времени всегда меньше, чем инерционность.

В то же время можно отметить, что для АКНП «старого» поколения (АКНП-3 и АКНП-07) в документации по проведению проверки работоспособности измерительного канала по определению периода при подаче на вход канала тестового сигнала с периодом T предписано провести сравнение тестового значения периода с определенным через время, равное 1,5 периода.

Для оценки точностных характеристик канала определения периода можно привести данные (рис. 1) по определению периода, полученные во время параллельной работы АКНП-3 и АКНП-И на одном из блоков с ВВЭР-1000.

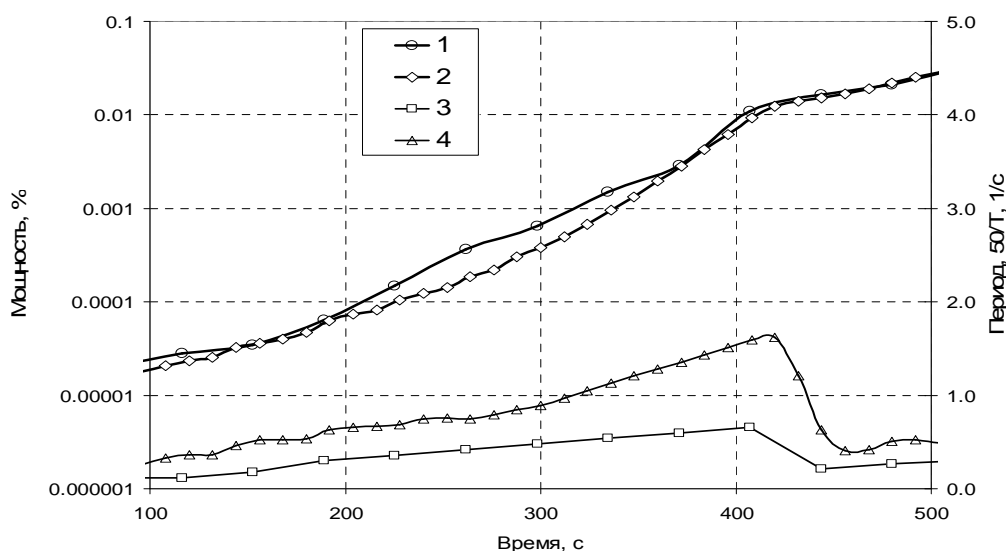


Рис. 1. Изменение мощности и периода реактора при наборе мощности:
 1 – мощность по АКНП-3; 2 – мощность по АКНП-И; 3 – период по АКНП-3; 4 – период по АКНП-И.

Как видно, мощность разными АКНП измеряется практически одинаково во всем динамическом диапазоне контроля мощности, а вот численные значения периода в АКНП-3 отличаются (больше) в 1,5 - 2 раза как от значений, определенных в АКНП-И, так и от значений периода, определенных аналитически по значениям мощности в АКНП-3. Требуется дополнительное подтверждение того, что АКНП старого поколения удовлетворяют требованиям проектных документов по контролю периода реактора. Можно также подтвердить, что современные средства определения параметров реактора, позволяют более надежно контролировать поведение реактора в динамических режимах.

Определим диапазон изменения мощности реактора, в котором по проектным требованиям в АКНП может быть сформирован сигнал аварийной защиты по периоду – АЗТ. В соответствии с нормативными требованиями п. 3.3.17 [1]: *«Каждый комплект аппаратуры аварийной защиты проектируется таким образом, чтобы во всем диапазоне изменения плотности нейтронного потока от $1,0E-7$ до 120 % номинального обеспечивалась защита не менее чем тремя независимыми каналами:*

по уровню плотности нейтронного потока;

по периоду изменения плотности нейтронного потока».

Так, при увеличении мощности с периодом $T = 10$ с (требуемая инерционность соответственно 5 с) минимальная мощность, при которой еще может быть сформирован сигнал АЗТ до достижения верхней границы диапазона контроля нейтронной мощности 120 % $N_{ном}$ (т.е. пока АКНП еще работает) соответствует ~ 73 % $N_{ном}$.

Таким образом, при реализации предложенных проектных требований к каналу контроля периода сигнал АЗТ при достижении периода $T = 10$ с не будет формироваться при мощности более 73 % $N_{ном}$, что не соответствует [1].

Определим параметры (время, уровни мощности) формирования АЗТ в АКНП-И, принимая во внимание, что формирование этого сигнала происходит при следующих условиях:

для АЗ (аварийная защита) $T < 10$ с и подтверждение роста мощности на 5 % в энергетическом диапазоне;

для ПЗ-1 (предупредительная защита 1-го рода) $T < 20$ с и подтверждение роста мощности на 5 % в энергетическом диапазоне.

Реализация в алгоритме формирования сигнала АЗТ, принципа «совпадения» названных сигналов не соответствует требованиям п. 3.3.27 [1], а также п. 2.3.23 [5], в соответствии с которыми разрабатывалась АКНП-И. В частности, в п. 3.3.27. [1] говорится: *«В проекте приводится, а в ОАБ обосновывается перечень исходных событий, при которых необходимо срабатывание АЗ. Срабатывание АЗ должно происходить, как минимум, в следующих случаях:*

при достижении уставки АЗ по уровню плотности нейтронного потока;

при достижении уставки АЗ по периоду нарастания плотности нейтронного потока (или реактивности);...».

При формировании сигнала защиты реактора должна работать логика «ИЛИ», т.е. при выполнении любого условия из перечня. Дополнительное подтверждение роста мощности включает логику «И» или совпадение сигналов «периода» и «величины изменения мощности», что не предусмотрено [1, 5], а также не указано в документах проекта [13]. Поэтому алгоритм формирования уставки по периоду в АКНП-И необходимо привести в соответствие с требованиями [1], а именно исключить условие подтверждения роста мощности (на 5 %). Это условие можно заменить временной задержкой, зависящей от уровня мощности и значения периода, как это и реализовано, например, в алгоритме формирования сигнала АЗТ в АКНП-07-02.

Для АКНП-07-02 расчетные значения времени задержки при формировании сигнала АЗТ после достижения уставки $T = 10$ с и сигнала ПЗ-1 (предупредительная защита) после достижения уставки $T = 20$ с в соответствии с [6] приведены в табл. 1.

Можно определить, что условия формирования сигнала АЗТ в АКНП-07 по времени задержки почти в 2 раза меньше, чем для АКНП-И (время достижения условия подтверждения 5 % роста мощности). Ниже будет показано, что условие подтверждения 5% роста мощности вообще не «физично» для энергетического реактора и не позволяет сформировать сигнал АЗТ для режимов с быстрым вводом положительной реактивности.

Принимая во внимание, что формирование аварийной защиты по уровню мощности (АЗР) реализовано в АКНП-И при достижении 107 % от текущего уровня, а также не включая в алгоритм формирования АЗТ условия подтверждения 5 % роста мощности, получим таблицу времени достижения уставок по формированию сигналов АЗТ и АЗР в зависимости от уровня мощности в диапазоне 1 - 102 % $N_{ном}$.

Таблица 1. Временная задержка на формирование сигнала $T < 20$ с и $T < 10$ с в зависимости от уровня мощности

Мощность, %	$T = 20$ с	$T = 10$ с
100	1,00	0,25
75	1,32	0,34
50	1,95	0,50
25	3,73	0,97
10	8,27	2,28
1	36,23	12,70

Как видим, в логике алгоритма расчета периода заложено уменьшение инерционности (временного буфера расчета) при уменьшении расчетного периода и увеличении мощности. Следовательно, при произвольном сценарии роста мощности, при достижении уровня мощности более 90 % $N_{ном}$ и периоде меньше 10 с (но больше 5,5 с) защита по периоду будет сформирована раньше, чем защита по мощности. Во всем диапазоне изменения мощности обеспечивается проектная последовательность в достижении и формировании уставок по периоду ПЗ-2, ПЗ-1 и АЗ.

В соответствии с табл. 2, в зависимости от уровня мощности, может быть обоснованно выбрана величина временной задержки, которая должна быть введена в алгоритм формирования сигнала АЗТ вместо условия подтверждения роста мощности на 5 % независимо от уровня мощности.

Таблица 2. Формирование сигналов АЗТ и АЗР при периоде 10 с

Начальная мощность, %	1	24	25	74	75	89	90	100	102
Инерционность определения периода, с	1,6	1,6	1,2	1,2	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4
Время достижения уставки 107 %	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,48
Мощность, при которой будет выдан сигнал АЗ, %	1,07	25,68	26,75	79,18	80,25	95,23	96,30	107,00	107,00
Мощность, при которой вычислен период, % (N_1)	1,17	28,16	28,19	83,43	81,25	96,41	93,67	104,08	106,16
Уставка по периоду сформируется позже на, с	0,92	0,92	0,52	0,52	0,12	0,12	-0,28	-0,28	-0,08

При этом выбранная инерционность определения периода в АКНП-И, а также реализация обоснованной временной задержки при формировании сигнала АЗТ обеспечит работоспособность (формирование сигнала АЗТ и АЗР) во всем диапазоне контроля мощности в соответствии с п. 3.3.17 [1].

Поэтому при использовании в алгоритме определения периода «постоянной» времени расчета в 2 ~ 3 с, что реализовано в АКНП-07 и АКНП-3 или рекомендуемых 5 с [4], формирование сигнала АЗТ может быть только после формирования сигнала АЗР или после достижения сигнала конца диапазона (т.е. его никогда не будет). Исключения могут быть только для режима работы на МКУ или в случае, если оператор «ошибочно» не установил в АКНП в соответствии с регламентом уставки АРМ, ПЗ-1 и АЗ на уровнях 102, 104 и 107 % соответственно от заданного уровня мощности.

4. Контроль периода реактора в переходных режимах работы.

Для переходных режимов работы реактора с «сильными» обратными связями не может быть установлено однозначное соответствие между введенной реактивностью и наблюдаемым периодом реактора, и более того будет наблюдаться противоречие, а именно знак введенной реактивности и наблюдаемого периода реактора могут (и будут) противоположны.

ными. При введенной отрицательной реактивности будет наблюдаться положительный период, и, наоборот, при введенной положительной реактивности – отрицательный период (см. рис. 3).

Время, в течение которого достигаются возможные противоположенные значения реактивности и периода, зависит от величины введенной реактивности, а также от коэффициентов и постоянных времени действия обратных связей.

Следовательно, «мгновенный» период в переходном режиме работы реактора с обратными связями показывает знак соответствия с введенной реактивностью только в начальный момент возмущения, когда еще можно пренебречь действием обратных связей. После окончания возмущения (или уменьшения ее величины), изменение значений периода показывает эффективность действия обратных связей (и зависит от их величин и постоянных времени), и, следовательно, не может являться мерой опасности скорости нарастания ПНП.

Поэтому мерой опасности скорости изменения ПНП в энергетическом реакторе являются реактивность и скорость ее изменения. Нормативные требования, предписывающие обязательный контроль реактивности и скорости ее изменения включены как в старые [5], так и введенные в 2008 г. новые нормативные требования [1].

После внедрения на ВВЭР-1000 АЭС Украины современной АКНП-И были отмечены случаи достижения уставок и формирования АЗТ при срабатывании ускоренной предупредительной защиты (УПЗ) реактора во второй половине топливной кампании. Анализу причин формирования АЗТ в режиме УПЗ посвящено ряд исследований [7 - 9]. Несмотря на то, что зафиксированы отклонения от требований проектных документов, например по скорости набора мощности после 50 % $N_{ном}$, по изменению температуры топлива, ведущие организации по проектированию и сопровождению эксплуатации ВВЭР РНЦ КИ, ВНИИАЭС и ОКБ Гидропресс подтверждают, что режим УПЗ проектный и соответствует требованиям проектных документов. Вместе с тем, после анализа событий со срабатыванием АЗТ в режимах с УПЗ на ВВЭР-1000 российский «Концерн Энергоатом» инициировал дополнительные исследования по обоснованию безопасности режима УПЗ [10, 11].

В работе [7] представлены материалы, положенные в основу принятия технического решения (ТР) НАЭК «Энергоатом» [12], с целью исключения необоснованного формирования сигнала АЗТ в режиме УПЗ. В технической экспертизе [13] высказаны замечания на некоторые положения документов по обоснованию ТР [12], в частности:

в расчетной модели скорость роста мощности в режиме УПЗ на ~ 40 % больше, чем зафиксировано АКНП-И;

не обоснованы предпосылки относительно весовых коэффициентов в измерительном канале АКНП;

не обоснованы предпосылки для включения в алгоритм формирования АЗТ условия подтверждения роста мощности на 5 %.

Возможно эти «допущения» и явились причиной получения противоречий с требованиями проектных документов по обосновывающим режимам работы реакторной установки, при которых необходимо срабатывание АЗТ [14].

Для подтверждения работоспособности алгоритма расчета и формирования сигнала защиты по периоду в соответствии с ТР [12] на Запорожской АЭС были проведены испытания в режиме УПЗ в конце топливного цикла. Было подтверждено, что увеличение временного буфера расчета периода до 4,0 с в диапазоне мощности 25 - 75 % $N_{ном}$ обеспечивает прохождение режима работы УПЗ без формирования АЗ.

Для данного испытания формирование сигнала АЗ не происходит и в случае применения временного буфера расчета периода равного 2,0 с, даже без применения условия подтверждения роста мощности на 5 % (рис. 2).

Рассмотрим на примере, какое влияние на формирование защит и блокировок в режимах с быстрым вводом реактивности, например выброс органа регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), оказывает внедренное ТР [12].

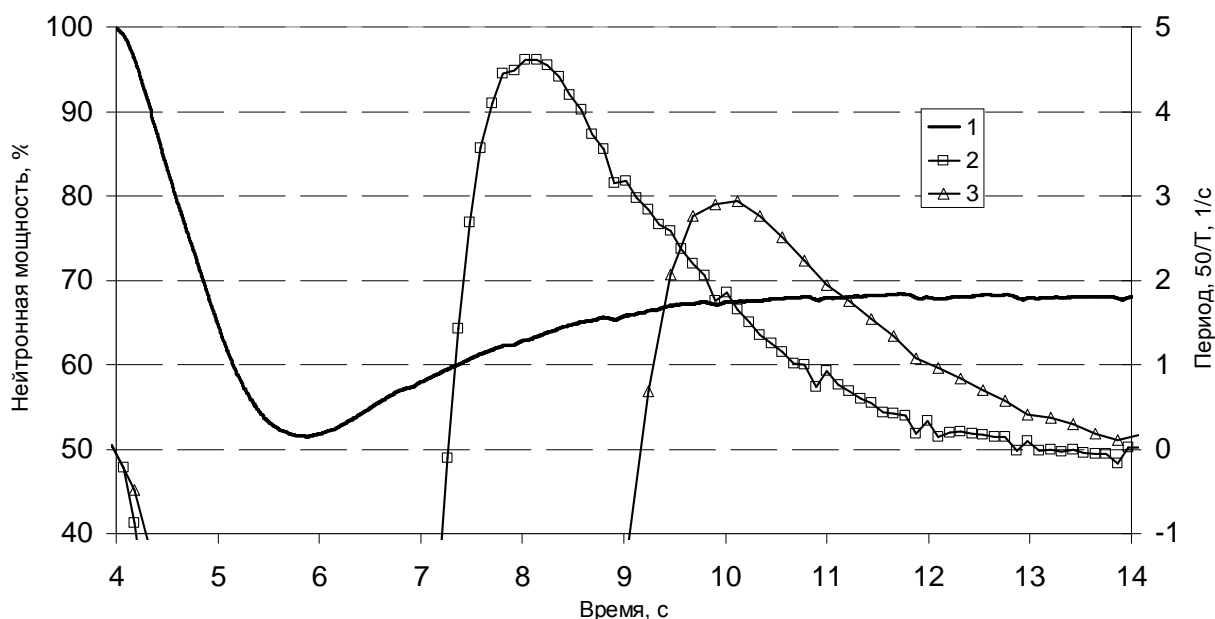


Рис. 2. Изменение мощности и периода реактора в режиме УПЗ:
 1 – мощность; 2 – период, временной буфер = 2,0 с; 3 – период, временной буфер = 4,0 с.

Для демонстрации этого воспользуемся результатами моделирования на точечной модели реактора, которая учитывает обратные связи по температуре топлива и теплоносителя [4, 8]. Применимость простых (не пространственных) моделей реактора подтверждена тем, что они позволяют корректно описать большинство переходных режимов работы реакторной установки, в частности корректно описывают режимы с УПЗ [4, 8]. Следует отметить, что системы контроля мощности, периода и реактивности реактора также используют точечное приближение.

В модели рассмотрено изменение нейтронной мощности реактора и формирование сигналов защиты при вводе положительной реактивности (выбросе «тяжелого» ОР СУЗ с эффективностью от 0,1 до 0,35 $\beta_{эф}$) для начала топливной кампании. Начало топливной кампании характеризуется тем, что коэффициенты реактивности реактора наименьшие по абсолютной величине, и, следовательно, обратные связи по температуре топлива и теплоносителя оказывают влияние на рост мощности в наименьшей степени.

Период реактора определим по алгоритму АКНП-И, а в качестве варьируемого параметра будем использовать величину временного буфера, на котором рассчитывается период.

В АКНП-И до реализации ТР [12] величина временного буфера изменялась в зависимости от уровня мощности реактора в соответствии с табл. 1. После реализации ТР временной буфер в диапазоне мощности 25 - 75 % $N_{ном}$ увеличен с 1,2 с до 4,0 с.

Эффективность ОР СУЗ и уровень мощности, с которого начинается выброс ОР СУЗ, варьировались таким образом, чтобы мощность реактора оставалась в диапазоне 25 - 75 % $N_{ном}$. Дополнительно предполагается, что оператор не переставил уставки формирования ПЗ и АЗ на уровни 104 и 107 % соответственно от заданного уровня мощности, и, следовательно, формирования защит по уровню мощности до уровня 104 и 107 % $N_{ном}$ не будет.

Вариация величины времени выброса стержня от 0,1 до 1,0 с не вносит значительного влияния на результаты моделирования. Основной вывод выполненного моделирования состоит в том, что для рассмотренных случаев с вариацией величины начальной мощности, эффективности ОР СУЗ и времени выброса ОР СУЗ формирование сигнала АЗТ не происходит, даже если определенный период меньше 10 с, так как ко времени вычисления периода с $T < 10$ с с временным буфером в 4,0 с мощность уже падает и соответственно не будет подтверждено условие роста мощности на 5 %.

На рис. 3 представлены результаты моделирования с выбросом ОР СУЗ эффективностью $0,32 \beta_{эф}$ за время 1,0 с.

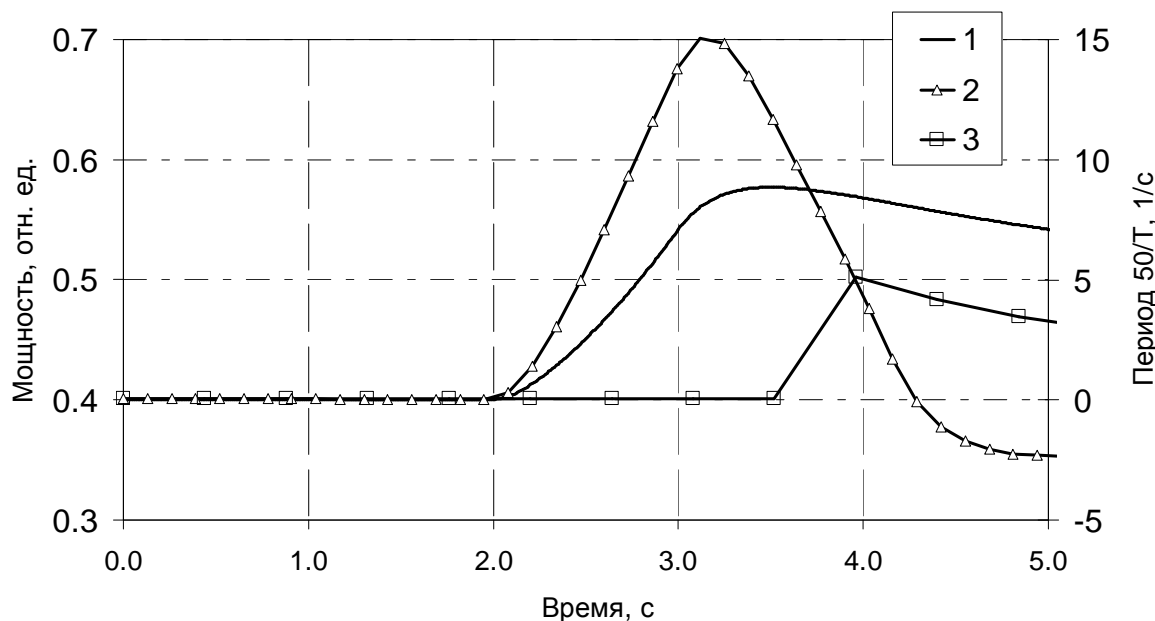


Рис. 3. Изменение мощности и периода реактора при вводе положительной реактивности $0,32 \beta_{эф}/с$ в течение 1,0 с: 1 – мощность; 2 – период, временной буфер = 1,2 с; 3 – период, временной буфер = 4,0 с.

Применение временного буфера в 4,0 с для расчета периода не обеспечивает формирование сигналов защиты по периоду для соответствующих режимов в соответствии с проектными документами [14].

В нормативных требованиях содержится требование по контролю скорости ввода положительной реактивности, в соответствии с п. 3.3.43 [1]: «Скорость увеличения реактивности средствами воздействия на реактивность не должна превышать $0,07 \beta_{эф}/с$ ».

Защита реактора при превышении скорости ввода положительной реактивности более $0,07 \beta_{эф}/с$ до настоящего времени не реализована. Для оценки реализации такой защиты в АКНП-И определим время формирования сигнала АЗТ при моделировании переходных режимов работы реактора (в начале топливной кампании) с вводом положительной реактивности в диапазоне мощности 25 - 75 % $N_{ном}$.

В табл. 3 представлены результаты моделирования для случая ввода указанной реактивности в течение 1,0 с.

Таблица 3. Время формирования АЗТ после начала ввода реактивности

Инерционность измерительного канала, с	Скорость ввода реактивности, $\beta_{эф}/с$				
	0,10	0,12	0,22	0,32	0,07 без учета ОС
0,2	0,58	0,36	0,20	0,16	1,58
1,2	–	1,12	0,73	0,47	2,03
2,0	–	–	1,08	0,85	2,40
4,0	–	–	–	1,87	3,72

В табл. 3 для разных значений инерционности канала определения периода указаны такие минимальные значения скорости ввода реактивности, при которых возможно формирование сигнала АЗТ.

Из результатов моделирования следует, что применяемый после реализации ТР алгоритм формирования сигнала АЗТ (с временным буфером = 4,0 с) позволяет сформировать сигнал защиты только при скорости ввода реактивности $0,32 \beta_{эф}/с$ (это без ожидания под-

тверждения 5 % роста мощности). До реализации ТР (временной буфер = 1,2 с) сигнал АЗТ мог формироваться при скорости ввода реактивности $0,12 \beta_{эф}/с$. Минимальная скорость ввода реактивности, при которой может быть сформирован сигнал АЗТ в диапазоне мощности 25 - 75 % $N_{ном}$, составляет $0,10 \beta_{эф}/с$ при условии расчета периода на временном буфере, равном 0,2 с. Таким образом, реализация требований п. 3.3.43 [1] возможна только путем формирования сигнала защиты по скорости ввода реактивности, что может и должно быть реализовано в АКНП-И.

В последней колонке табл. 3 приведено время формирования сигнала АЗТ для модельного случая - непрерывного ввода положительной реактивности без учета обратных связей по температуре топлива и теплоносителя.

Заключение

1. Выполнение требований НТД относительно контроля скорости изменения ПНП во всем диапазоне изменения мощности может быть реализовано только на основе использования расчета реактивности.

2. Широко применяемый в системах контроля и управления период реактора обоснованно может быть использован только на минимально контролируемых уровнях мощности.

3. Изменения, внесенные в алгоритм формирования сигнала защиты по периоду в соответствии с ТР [12], не позволяют выполнить требования НТД по аварийной защите реактора по скорости изменения плотности нейтронного потока для определенных в проектных документах режимов работы реакторной установки.

4. Из алгоритма формирования сигналов защиты по периоду при достижении уставок 20 и 10 с необходимо исключить условие подтверждения роста мощности на 5 %, как не соответствующее требованиям НТД.

5. Для обеспечения формирования сигналов защиты по периоду в соответствии с проектными документами необходимо внести изменения в ТР: временной буфер увеличить до 3,0 с, но не по условию - мощность реактора в диапазоне 25 - 75 % $N_{ном}$, а по условию - реактивность меньше $-0,1\beta$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций с реакторами с водой под давлением*. НП 306.2.145-2008
2. *Кипин Дж. Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов. - М.: Атомиздат, 1967. - 428 с.
3. *Реакторная установка В-320*. Техническое обоснование безопасности реакторной установки. 320.00.00.000 Д61. ОКБ ГП.1987.
4. *О безопасности и устойчивости эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 в динамических режимах со срабатыванием УПЗ (УРБ): (Отчет) / ОАО «ВНИИАЭС»*, 2008.
5. *Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций*. ПБЯ РУ АС-89.
6. *Комплекс аппаратуры контроля нейтронного потока АКНП-7-02Б*. Руководство по эксплуатации. РУНК.501319.034 РЭ. СНИИП-СИСТЕМАТОМ. 2002
7. *Технический отчет «Модернизация проектного режима работы УРБ реакторной установки ВВЭР-1000*. Разработка ОАБ по модернизации режима работы УРБ». - ООО «ФИЗАР», 2008.
8. *Борисенко В.И., Каденко И.М., Самойленко Д.В.* Особливості перехідного процесу в реакторній установці ВВЕР-1000 при спрацюванні прискореного попереджувального захисту // *Ядерна фізика та енергетика*. - 2009. - Т. 10, № 2. - С. 157 - 164.
9. *Быков М.А., Алехин Г.В., Петкевич И.Г.* Анализ показаний аппаратуры нейтронного потока в режимах со срабатыванием ускоренной предупредительной защиты для реакторных установок с реактором ВВЭР-1000 // Шестая междунар. науч.-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". -6-29.05.2009 (ОКБ "ГИДРОПРЕСС", Подольск, Россия).
10. *Сопровождение условий действия лицензий Ростехнадзора. Улучшение топливоиспользования. Анализ безопасности режима со срабатыванием УПЗ (УРБ) на российских АЭС с ВВЭР-1000*. - ОАО "Концерн Энергоатом", 2008.

11. *Обоснование безопасности при эксплуатации. Разработка материалов для корректировки ТООБ АС энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 в части уточнения режимов эксплуатации со срабатыванием УПЗ (УРБ)*. - ОАО "Концерн Энергоатом", 2009.
12. *Отраслевое техническое решение НАЭК «Энергоатом» «О внедрении усовершенствованного алгоритма формирования сигнала АЗ в аппаратуре контроля нейтронного потока АКНП-И (ИФ) по периоду изменения нейтронной мощности реактора ВВЭР-1000»* ОТР-1234.03.127-08.
13. *Отчет о выполнении оценки на соответствие требованиям действующей в Украине НТД по ЯРБ научно-технического отчета «Анализ влияния величины интервала времени, на котором вычисляется период изменения мощности реактора, на безопасность реакторной установки ВВЭР-1000»* 047-МЦЯБ.00.ЛИЯБ.ГКЯРУ.ОТ.09(П).
14. *ОАБ. Т. 16, гл. 16. Пределы и условия безопасной эксплуатации. 43-923.203.254.ОБ.16.РЕД.2.Ф.* - НАЭК «Энергоатом», 2004.

ЩО НЕОБХІДНО ВИЗНАЧАТИ: ПЕРІОД АБО РЕАКТИВНІСТЬ РЕАКТОРА?

В. І. Борисенко

Впровадження сучасних систем нейтронного контролю на АЕС забезпечує більш надійний контроль за параметрами безпеки реактора. Незважаючи на те, що відповідно до вимог нормативних документів сучасні засоби дають змогу контролювати такі параметри безпеки, як реактивність і швидкість її введення, їх не поспішають включати в проект реакторної установки й контролюють тільки період. Розглядаються обмеження такого підходу.

Ключові слова: реактивність, період реактора, апаратура контролю нейтронного потоку, аварійний захист, прискорений попереджувальний захист.

THAT IS IT NECESSARY: TO DETERMINE PERIOD OR REACTIVITY OF REACTOR?

V. I. Borysenko

Introduction of the modern neutron monitoring systems on NPPs provides more reliable control after the parameters of safety of reactor. In accordance with the requirements of normative documents modern monitoring systems allow to control such parameters of safety as reactivity and speed of its input, they are not plugged in the project of the reactor setting and control only period. Limitations of such approach are presented in the article.

Keywords: reactivity, period of reactor, neutron flux monitoring systems, SCRAM, accelerated unit uploading.

Поступила в редакцію 16.11.09