

СТАТЬИ

УДК 621.039.526+621.039.55

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПОДКРИТИЧНОСТИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ МБИР

*Александров С.И., Королева Т.Д., Крюков С.И., Лукасевич И.Б., Постников В.В., Суволокин Д.В.
(АО «НИКИЭТ», г. Москва), Ожегин И.В. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)*

Многоцелевой исследовательский быстрый реактор с натриевым теплоносителем МБИР, создаваемый по проекту АО «НИКИЭТ», планируется пустить в 2019 г. на площадке АО «ГНЦ НИИАР». Реактор предназначен для исследований и испытаний новых видов ядерного топлива, теплоносителя и конструкционных материалов. Его активная зона, выполненная в виде правильного шестиугольника, имеет высоту 0,55 м, размер «под ключ» 0,87 м.

Система контроля подкритичности, являющаяся развитием более ранних разработок, предназначена для широкодиапазонного безынерционного контроля нейтронно-физических параметров, таких, как период экспоненциального увеличения в диапазоне от 200 до 5 с и плотность потока нейтронов, подкритичность и реактивность в диапазоне от $-10\beta_{эф}$ до $0,7\beta_{эф}$, при выводе реактора из остановленного состояния, т.е. с мощности от $10^{-9}\%$ $N_{ном}$ и работе до $N_{ном}$. Система предназначена также для контроля перегрузочных работ в активной зоне, взвешивания органов регулирования и многообразия исследовательских и экспериментальных работ с использованием реакторного излучения.

В соответствии с нормативными документами система контроля подкритичности является системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности. Класс безопасности 3. Классификационное обозначение ЗН. Для выполнения перечисленных функций в ней предусмотрены:

три боковые и одна резервная подвеска с детекторами плотности потока нейтронов с двухпозиционным положением, расположенные на расстоянии 1430 мм от оси реактора («ближние» подвески). В верхнем положении детекторы (камеры деления КНТ54-1) расположены на уровне центра активной зоны по высоте;

три боковые однопозиционные и одна резервная подвеска с камерами деления КНТ23-2, расположенные на расстоянии 2670 мм от оси реактора («дальние» подвески) на уровне центра активной зоны по высоте;

шесть независимых каналов оцифровки импульсно-токовых сигналов детекторов;

три модуля управления электроприводом для перемещения двухпозиционных подвесок;

вычислитель реактивности, оснащенный программой ENOT-МБИР и устройством визуализации выходных значений.

По сигналам детекторов ближних подвесок контролируется плотность потока нейтронов с мощности от 10^{-9} до $10^{-4}\%$ $N_{ном}$. Ближние подвески оснащены механизмом перемещения с электроприводом, который способен перемещать детектор вниз-вверх на расстояние 3,5 м, что позволяет предотвратить его перегрев и ускоренное выгорание делящегося вещества при работе реактора на мощности. Управление механизмом перемещения осуществляется в автоматическом режиме по сигналу вычислителя реактивности или по команде оператора. При плотности потока нейтронов $\sim 10^6$ с⁻¹·см⁻², что соответствует $10^{-4}\%$ $N_{ном}$, происходит переключение работы системы контроля подкритичности с ближних камер на дальние с последующим перемещением пусковых камер вниз по каналам.

Дальние однопозиционные подвески контролируют плотность потока нейтронов на мощности от 10^{-5} до 100% $N_{ном}$, обеспечивая перекрытие диапазонов чувствительности пусковых и рабочих детекторов. Их устанавливают в боковые гильзы, расположенные в бетоне.

Блоки предварительного усилителя устанавливаются на расстоянии не более 10 м от подвесок. Усиленные импульсные и токовые

сигналы детекторов можно передавать по линиям связи на расстояние до 100 м в аппаратуру стойки системы контроля подкритичности. В стойку входят шесть модулей оцифровки сигналов детекторов, шесть модулей питания, три модуля управления электроприводом для перемещения двухпозиционных подвесок, вычислитель реактивности. Вычислитель реактивности конструктивно состоит из двух промышленных контроллеров, дублирующих выполнение всех функций. Каждый промышленный контроллер формирует сигнал, пропорциональный средней по активной зоне плотности потока нейтронов. По сигналу можно оценить интенсивность деления топлива в данное время. Каждый промышленный контроллер вычисляет по динамике изменения плотности потока нейтронов подкритичность/реактивность в диапазоне от $-10\beta_{эф}$ до $0,7\beta_{эф}$ в рамках точечной модели кинетики с учетом шести групп запаздывающих нейтронов (для каждого изотопа ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu) при использовании нейтронно-физических констант МБИР. Данные хранятся в памяти промышленного контроллера и передаются по оптическим кабелям в систему контроля и управления и на пульт оператора.

Оператор управляет системой контроля подкритичности, вводя в вычислитель реактивности перед пуском начальную расчетную подкритичность и перемещая двухпозиционные подвески. Перед пуском подвески устанавливаются в крайнее верхнее положение (напротив центра активной зоны по высоте). Плотность потока нейтронов при пуске первоначально контролируется с использованием двухпозиционных подвесок. При достижении мощности, соответствующей нижней границе контроля однопозиционной подвески, плотность потока нейтронов контролируется по сигналам трех каналов оцифровки импульсно-токовых сигналов детекторов, подключенных к этим подвескам. Вычислитель реактивности или оператор дают сигнал на перемещение двухпозиционных подвесок в нижнее положение. При срабатывании аварийной защиты и сбросе стержней системы управления и защиты вычислитель реактивности или оператор перемещает эти подвески в верхнее положение и плотность потока нейтрона контролируется по ним. При отказе подвески для каждого рабочего диапазона осу-

ществляется переключение канала от отказавшей к резервной подвеске.

Контроль первой загрузки и физический пуск реактора осуществляются при использовании системы контроля подкритичности с установленным в активную зону изотопным источником нейтронов.

Первоначально рассматривался вариант с размещением ближней подвески на расстоянии 1700 мм от оси реактора, в слое засыпки Al_2O_3 . В этом случае необходимым оказалось использовать пусковой источник нейтронов интенсивностью $1 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Расчет показал, что при физическом пуске реактора с использованием такого источника нейтронов плотность потока тепловых нейтронов на поверхности камеры деления составит около $2,5 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, однако значительную часть в показания детектора вносит надтепловая часть спектра (около 60%). В результате оцененная скорость счета в детекторе в этих условиях составляет около 3 имп./с. В дальнейшем был принят вариант размещения ближней подвески на максимально близком расстоянии от оси реактора (1430 мм). В этой области нейтронный спектр еще более высокоэнергетический, чем на радиусе 1700 мм. В результате вклад нейтронов энергией до 0,5 эВ в деление активного материала детектора составляет лишь 5%, и детектор работает в основном в надтепловой (менее эффективной) области нейтронного спектра. Тем не менее значительно более высокая интегральная плотность потока нейтронов на радиусе 1430 мм формирует лучшие, чем в предыдущем варианте, условия для детектирования, что позволит снизить интенсивность пускового источника до $5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ при сохранении расчетной скорости счета на уровне 3 имп./с.

Во время останова реактора после работы на мощности активная зона является источником нейтронов, возникающих при спонтанном делении наработанных изотопов. Основной вклад (около 60%) при этом вносит ^{242}Cm , остальной вклад почти полностью определяется ^{240}Pu и ^{246}Cm . Интенсивность образования нейтронов оценивается $1,5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, в период останова не требуется установка в активную зону внешнего источника нейтронов.

Реактивность (подкритичность) определяется с помощью классических уравнений точечной кинетики ядерного реактора [1]

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta_{\text{эф}}}{l} n + \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i + S; \\ \frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i C_i, i = 1, \dots, m, \end{cases} \quad (1)$$

где n — плотность нейтронов, см^{-3} ; t — время; ρ — реактивность, $\beta_{\text{эф}}$; $\beta_{\text{эф}}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов; l — эффективное время жизни мгновенных нейтронов, с; λ_i — постоянная распада ядер-излучателей запаздывающих нейтронов или фотонейтронов i -й группы; C_i — концентрация ядер-излучателей запаздывающих нейтронов i -й группы; S — интенсивность внешнего источника нейтронов; β_i — доля запаздывающих нейтронов i -й группы; m — число учитываемых групп запаздывающих нейтронов и фотонейтронов.

В расчетах используется допущение о том, что до начала измерений реактор находился в стационарном состоянии, из чего были получены следующие соотношения для начальных условий:

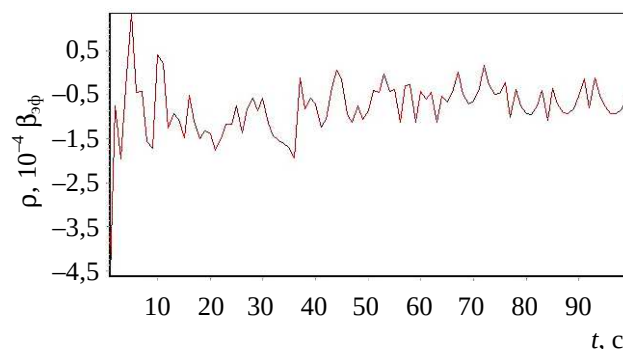
$$C_{i0} = \frac{\beta_i}{\lambda_i l} n_0; \quad n_0 = \frac{Sl}{|\rho_0|}. \quad (2)$$

Система (1) для удобства вычислений была приведена к безразмерному виду путем нормировки величин n и C_i на их начальные значения и измерение реактивности в долях $\beta_{\text{эф}}$. С использованием выражений (2) система (1) преобразуется к виду

$$\begin{cases} \frac{l}{\beta_{\text{эф}}} \frac{d\tilde{n}}{dt} = (\tilde{\rho} - 1)\tilde{n} + \sum_{i=1}^m a_i \tilde{C}_i + \tilde{\rho}_0; \\ \frac{d\tilde{C}_i}{dt} = \lambda_i (\tilde{n} - \tilde{C}_i), i = 1, \dots, m, \end{cases}$$

где $\tilde{n}$ — относительная плотность нейтронов; $\tilde{C}_i$ — относительная концентрация ядер-излучателей запаздывающих нейтронов i -й группы; a_i — относительная доля запаздывающих нейтронов i -й группы.

Программа ENOT-МБИР представлена для получения аттестационного паспорта в НТЦ ЯРБ. Ее верификационная матрица для вычислителя реактивности включает в себя переходные процессы при выходе экспериментальной установки БФС-2, критическая сборка которой представляет модель быстрого реактора с натриевым теплоносителем, на стационарный уровень мощности и сбросе органа аварийной защиты на стационарном уровне мощности. По-



Разность между подкритичностью, вычисленной по программам ENOT-МБИР и PRISET-MBIR, при ее изменении от -2 до $-5\beta_{\text{эф}}$

лученный по программе ENOT-МБИР при обработке измерений на стенде БФС-2 вес АЗ-1 хорошо совпал с нормативным $-0,5\beta_{\text{эф}}$.

Также использовались рассчитанные с помощью программы PRISET-MBIR [2] переходные процессы для изменения подкритичности от -2 до $-5\beta_{\text{эф}}$. Представленная на рисунке временная зависимость разности подкритичности, вычисленной по программам PRISET-MBIR и ENOT-МБИР, указывает на удовлетворительное совпадение результатов. Среднеквадратичное отклонение разности реактивности составило $1,9 \cdot 10^{-4}$.

Таким образом, данные верификационной матрицы указывают на соответствие программы ENOT-МБИР, заложенной в вычислитель реактивности, требованиям, предъявляемым к программам данного класса. В начальный период эксплуатации вычислителя реактивности целесообразно разработать уточненную расчетно-экспериментальную модель интенсивности источника спонтанных нейтронов, что позволит существенно повысить точность и оперативность расчетов подкритичности, выполняемых вычислителем реактивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Могильнер А.И., Фокин Г.Н., Чайка Ю.В., Кузнецов Ф.М. Применение малых ЭВМ для измерения реактивности. — Атомная энергия, 1974, т. 36, вып. 5, с. 358.
2. Платонов И.В., Ларионов И.А., Долгов Ю.А. Связанный нейтронно-физический и теплогидравлический программный комплекс PRISET-MBIR для исследования переходных и аварийных режимов и обоснования безопасности. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС, 2013, вып. 33, с. 59–67.

Поступила 1.12.14
В окончательной редакции 17.09.15