

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ОРУК-РЕАКТИМЕТРА С ТОКОВЫМ ДЕТЕКТОРОМ НЕЙТРОНОВ

А. С. Кошелев, А. В. Арапов, М. А. Овчинников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Приведены результаты файл-апробации ОРУК-реактиметра на базе действующего аппаратурно-измерительного комплекса с токовым детектором нейтронов КНК-4. Обработка файлов регистрации мощности реакторов БР-1М, БР-К1 и ВИР-2М ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» с использованием *Excel*-моделирования ОРУК-формализма показала возможность осуществления контроля реактивности при работе перечисленных реакторов на стационаре с уровня $\sim 5 \cdot 10^{-4} \beta_{эф}$.

Ключевые слова: реактор, стационарная мощность, реактивность, обращенное решение уравнений кинетики, токовый детектор нейтронов, цифровой регистратор тока.

ABOUT POSSIBILITY OF THE CREATION OF A SPECIALIZED ORUK-REACTIMETER WITH A CURRENT DETECTOR OF NEUTRONS / A. S. KOSHELEV, A. V. ARAPOV, M. A. OVCHINNIKOV // There are presented the file-testing results of ORUK-reactimeter based on a functional hardware-software system with a current tracer of neutrons KNK-4. The processing of power registration files of BR-1M, BR-K1 and VIR-2M reactors in FSUE «RFNC-VNIIEF» with the use of *Excel*-simulation of ORUK-formalism demonstrated the possibility of implementing reactivity monitoring during the above-specified reactors operation in a stationary mode beginning from the level of $\sim 5 \cdot 10^{-4} \beta_{ef}$.

Key words: reactor, stationary power, reactivity, inverse solution of kinetics equations, current detector of neutrons, digital recorder of current.

Введение

Преимущественно импульсный характер работы реакторных установок ВНИИЭФ определил и основное направление разработки и применения всех практически реализованных вариантов цифровых реактиметров как средств определения стартовой реактивности при подготовке к генерированию импульса делений на мгновенных нейтронах. Так как процедура подготовки стартового состояния проводится на минимально возможных уровнях мощности реактора с целью исключения температурных эффектов гашения реактивности, то во всех известных разработках использовались высокочувствительные детекторы-счетчики нейтронов и метод обращенного решения уравнений кинетики (ОРУК) для определения реактивности по изменению интенсивности отсчетов детектора.

Совершенствование систем управления реакторными установками и возросший интерес к рас-

ширению возможности их работы в статическом режиме на энергетически значимом уровне в течение продолжительного времени диктует и необходимость совершенствования форм контроля реактивности, ориентированных на использование в предполагаемых условиях работы. Очевидно, что в условиях повышенной мощности применение реактиметров, использующих детекторы-счетчики нейтронов, практически невозможно из-за известного эффекта возникновения просчетов вплоть до прекращения счета.

В настоящее время в практике контроля статической (квазистатической) мощности реакторных установок ВНИИЭФ находит применение аппаратурно-измерительный комплекс, в качестве токового детектора нейтронов в котором используется газонаполненная промышленная камера, нейтронная компенсированная, КНК-4, а в качестве регистратора тока – сертифицированный измерительный модуль токовой камеры [1]. В качестве

автономного канала контроля мощности упомяну-
тый аппаратно-измерительный комплекс ис-
пользовался на реакторах БР-1М, БР-К1 и ВИР-2М.
Полученный в результате измерений объем дан-
ных позволил организовать файл-апробацию
ОРУК-технологии с целью оценки диагностиче-
ских возможностей ОРУК-реактиметра с токовым
детектором нейтронов в интересах осуществления
оперативного контроля реактивности в процессе
реализации статических энергопусков вышепере-
численных реакторов.

Аппаратурно-измерительный комплекс

Комплектационная схема аппаратно-изме-
рительного комплекса, используемого на реактор-
ных установках ВНИИЭФ в качестве автономного
(не входящего в состав штатного оборудования)
канала контроля мощности (АККМ), представлена
на рис. 1.

Мобильный детекторный блок высокой, пре-
имущественно нейтронной чувствительности
включает в себя КНК-4 в качестве детектора теп-
ловых нейтронов и толстостенный (не менее 3 см)
замедлитель из полиэтилена. Техническое испол-
нение позволяет размещать указанный детектор-
ный блок в удобной позиции на любой реакторной
установке ВНИИЭФ. Наличие полиэтиленового
замедлителя обеспечивает высокую чувстви-
тельность к нейтронам любого спектрального состава.
Использование КНК-4 позволяет практически
полностью исключить влияние γ -составляющей
реакторного излучения как при регистрации раз-
ности токов функциональных секций (компенса-
ционный режим включения), так и при регистра-

ции токового отклика только n - γ -секции (соотно-
шение чувствительностей функциональных сек-
ций, как правило, не менее 1000). В комплект ап-
паратуры входят два измерительных модуля токо-
вой камеры (ИМТК) и три блока питающих на-
пряжений ВПН, размещаемых в приборном кор-
пусе Ratiopac PRO. Измерительный модуль ИМТК
утвержден Федеральным агентством по техниче-
скому регулированию и метрологии как средство
измерения (СВИДЕТЕЛЬСТВО № 39607.RU.
Е.38.046.А). Целевое назначение ВПН 1 и 2 – пи-
тание КНК-4 постоянным напряжением номиналом
до 500 В как положительной, так и отрицательной
полярности. Целевое назначение ВПН 3 – питание
комплектующих модулей приборного корпуса.

Управление модулями, предварительную об-
работку и текущий визуальный контроль, а также
архивирование результатов измерений осуществ-
ляют персональный компьютер ПС и специализи-
рованное программное обеспечение ПО. Дискре-
тизация шкалы текущего времени, как правило,
осуществляется с шагом 1 с. Предусмотрена воз-
можность изменения шага дискретизации от 0,1 до
1 с шагами по 0,1 с.

В практике работ с АККМ находят примене-
ние две схемы электрического включения КНК-4,
представленные на рис. 2.

В работах преимущественно исследователь-
ской ориентации используется, как правило, схема
раздельной регистрации токов функциональных
секций (рис. 2, вариант 1). Такое включение по-
зволяет установить количественную значимость
каждого компонента реакторного излучения
в формировании токовых откликов функциональ-
ных секций КНК-4.

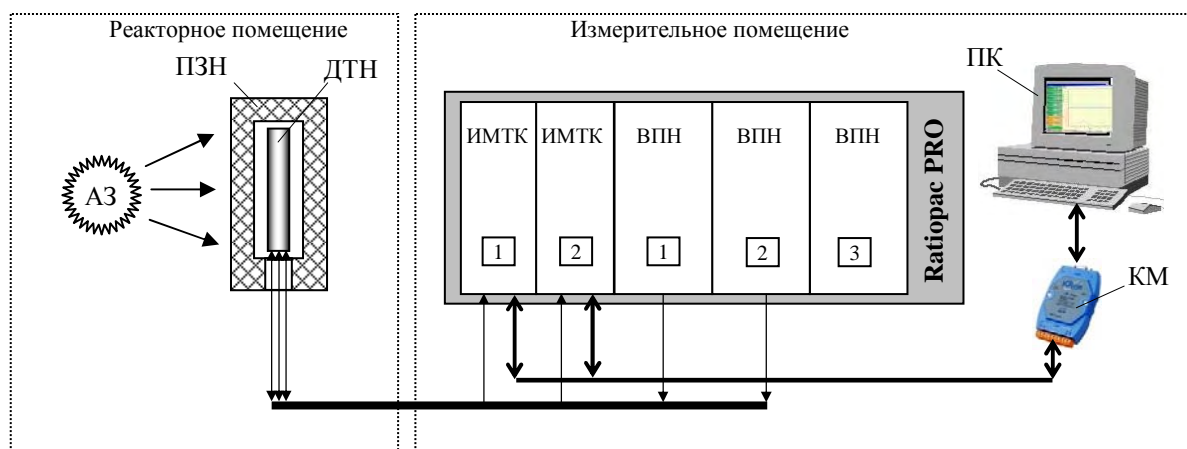


Рис. 1. Комплектационная схема аппаратно-измерительного комплекса с токовым детектором нейтронов:
АЗ – активная зона, ПЗН – полиэтиленовый замедлитель нейтронов, ДТН – детектор тепловых нейтронов,
ИМТК – измерительный модуль токовой камеры, ВПН – выпрямитель питающих напряжений,
ПК – персональный компьютер, КМ – коммутирующий модуль

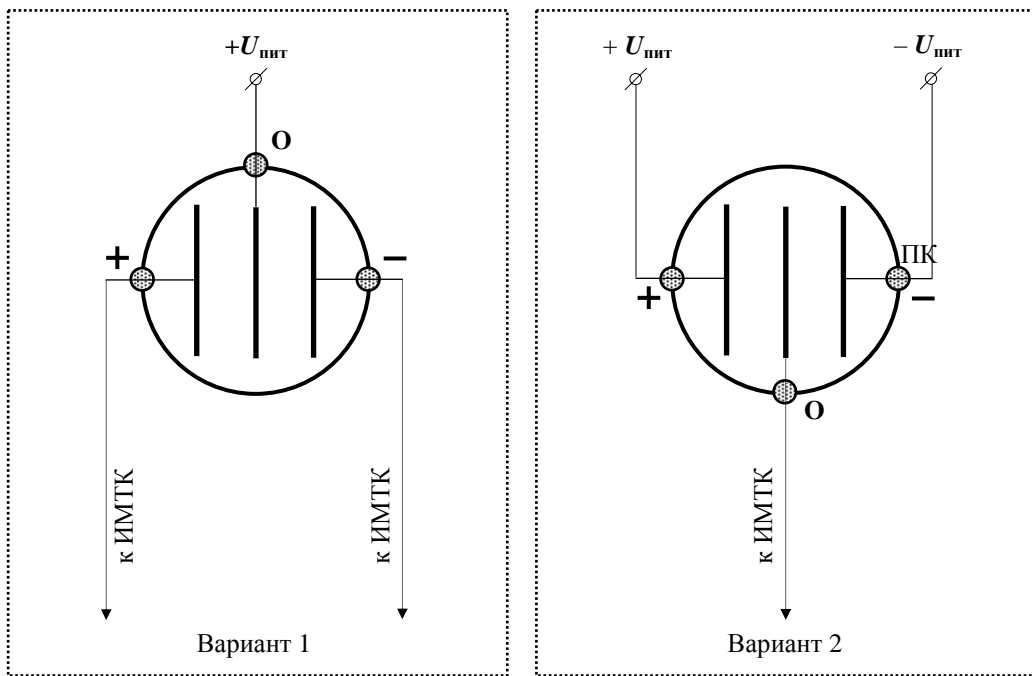


Рис. 2. Используемые схемные решения электрического включения КНК-4

В работах преимущественно прикладной ориентации используется, как правило, компенсационная схема (рис. 2, вариант 2). Такое включение схемно минимизирует влияние реакторного γ -излучения на регистрацию детектором КНК-4 излучаемых реактором нейтронов и допускает использование только одного ИМТК вместо обязательных двух в схеме раздельной регистрации.

Формализм определения реактивности

Основные положения операционного формализма цифровых ОРУК-реактиметров, ориентированных на использование детекторов-счетчиков нейтронов, подробно изложены в работе [2].

Для счетных ОРУК-реактиметров реакторных установок ИЯРФ, согласно [3], алгоритм определения реактивности формализован в виде

$$\rho_j = 1 - \frac{S + \sum C_{i,j}}{n_j};$$

$$C_{i,j} = C_{i,j-1}E_i + A_i n_j - B_i n_{j-1};$$

$$E_i = \exp(-\lambda_i \Delta t);$$

$$A_i = a_i \left[1 - (1 - E_i) / (\lambda_i \Delta t) \right];$$

$$B_i = a_i \left[E_i - (1 - E_i) / (\lambda_i \Delta t) \right];$$

$$C_{i,0} = a_i n_0.$$

(1)

В приведенных выше соотношениях ρ_j – реактивность в единицах $\beta_{эф}$ в момент времени $t = j\Delta t$, n_j – скорость отсчетов в j -м интервале квантования времени Δt , a_i и λ_i – константы i -й группы запаздывающих нейтронов, $C_{i,j}$ – концентрация предшественников i -й группы запаздывающих нейтронов в j -м интервале времени, S – аналог внешнего источника нейтронов.

По форме определения отклик счетного детектора в единицах «отсч./с» (интенсивность отсчетов) адекватен определению отклика токового детектора в единицах «А». Соответственно, алгоритм определения реактивности, ориентированный на использование с токовым детектором нейтронов, будет аналогичен алгоритму (1) с заменой скоростей отсчетов n_j на токи I_j .

Для осуществления файл-апробации с использованием избранных регистрационных файлов АККМ для реакторов БР-1М, БР-К1 и ВИР-2М был разработан комбинированный *Excel*-шаблон, иллюстрируемый в табл. 1, 2 на примере реактора ВИР-2М с 6-групповой системой параметров запаздывающих нейтронов. Табл. 1 – это *Excel*-табулированные характеристики запаздывающих нейтронов и производные операнды E_i , A_i , B_i , $C_{i,0}$, I_0 , Δt системы (1), ориентированные на запрограммированное использование с *Excel*-шаблоном (табл. 2) для последовательного определения текущей реактивности.

Excel-табулированные параметры влияния запаздывающих нейтронов (вариант для реактора ВИР-2М)

	A	B	C	D	E	F	G
1		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
2	λ_i	0,0124	0,0305	0,111	0,301	1,14	3,01
3	a_i	0,033	0,219	0,196	0,395	0,115	0,042
4	E_i	0,9877	0,9700	0,8949	0,7401	0,3198	0,0493
5	A_i	0,0002	0,0033	0,0105	0,0539	0,0464	0,0287
6	B_i	-0,0002	-0,0033	-0,0101	-0,0488	-0,0318	-0,0112
7	$C_{i,0}$	$5,38 \cdot 10^{-13}$	$3,57 \cdot 10^{-12}$	$3,26 \cdot 10^{-12}$	$6,44 \cdot 10^{-12}$	$1,87 \cdot 10^{-12}$	$6,85 \cdot 10^{-13}$
8	I_0	$1,63 \cdot 10^{-11}$	$1,63 \cdot 10^{-11}$	$1,63 \cdot 10^{-11}$	$1,63 \cdot 10^{-11}$	$1,63 \cdot 10^{-11}$	$1,63 \cdot 10^{-11}$
9	Δt	1	1	1	1	1	1

Таблица 2

Excel-шаблон для расчета реактивности по файлу данных (ВИР-2М)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	t, c	I, A	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	Sum C	$\rho, \beta_{эф}$
2	1	1,63–11	5,38–13	3,57–12	3,19–12	6,44–12	1,87–12	6,85–13		–
3	2	1,69–11	5,38–13	3,57–12	3,20–12	6,47–12	1,90–12	7,02–13	1,64–11	+0,03043
4	3	1,61–11	5,38–13	3,57–12	3,20–12	6,48–12	1,89–12	6,86–13	1,64–11	-0,01714
5	4	1,69–11	5,38–13	3,57–12	3,21–12	6,49–12	1,90–12	7,00–13	1,64–11	+0,02875
6	5	1,75–11	5,39–13	3,58–12	3,22–12	6,57–12	1,96–12	7,27–13	1,66–11	+0,05140
7	6	1,61–11	5,39–13	3,58–12	3,23–12	6,59–12	1,93–12	6,94–13	1,66–11	-0,02878
8	7	1,75–11	5,39–13	3,59–12	3,24–12	6,60–12	1,94–12	7,14–13	1,66–11	+0,05004
9	8	1,72–11	5,39–13	3,59–12	3,26–12	6,67–12	1,98–12	7,26–13	1,68–11	+0,02587
10	9	1,58–11	5,39–13	3,59–12	3,25–12	6,62–12	1,91–12	6,82–13	1,66–11	-0,05090
11	10	1,71–11	5,39–13	3,59–12	3,25–12	6,59–12	1,91–12	7,02–13	1,66–11	+0,02999

Размерности: $\lambda_i - c^{-1}$; $a_i - \text{отн.ед.}$, $\sum a_i = 1$; $I_0 - A$; $\Delta t - c$. Все приведенные значения I_0 – это значение тока в первой строке регистрационного файла, выбранного для апробации. Значение $C_{i,0}$ для столбца B определено по соотношению $B8*B3$; аналогично определены значения $C_{i,0}$ для столбцов C, D, E, F, G. Для определения параметров E_i, A_i, B_i использованы соответствующие соотношения из (1).

Работа пользователя с Excel-шаблоном заключается в переносе шкалы текущего времени и значений тока из регистрационного файла в ряды A и B. При использовании ранее заполненного шаблона замена данных в столбцах C, D, E, F, G, H, I, J осуществляется автоматически в строках с ранее имеющимися значениями t и I .

Первоначальное заполнение шаблона проиллюстрируем на примере заполнения данных

столбца C, аналогичного заполнению столбцов D, E, F, G и H:

– в ячейку C2 табл. 2 заносятся данные ячейки B7 табл. 1 по команде «=B7»;

– данные в ячейке C3 табл. 2 находятся по команде «=C2*B4+B3*B5-B2*B6»;

– данные в ячейке C4 табл. 2 находятся по команде «=C3*B4+B4*B5-B3*B6»;

– заполнение последующих ячеек ряда C можно продолжать аналогично вышеуказанному или путем смещения выделенной ячейки C4 захватом за ее правый нижний угол.

После заполнения всех столбцов C_i начинается заполнение столбца I с ячейки I3 по команде «=C3+D3+E3+F3+G3+H3» с дальнейшим выделением данной ячейки и перетаскиванием путем захвата за ее нижний правый угол.

Планируемое использование токового варианта ОРУК-реактиметра для измерения (контроля)

Эффективные параметры запаздывающих нейтронов БР-1М, БР-К1, ВИР-2М

Группа i	БР-1М [3]		БР-К1 [3]		ВИР-2М [4]	
	$\lambda_i, \text{с}^{-1}$	$a_i, \text{отн.ед.}$	$\lambda_i, \text{с}^{-1}$	$a_i, \text{отн.ед.}$	$\lambda_i, \text{с}^{-1}$	$a_i, \text{отн.ед.}$
1	0,0127	0,0391	0,0127	0,0320	0,0124	0,033
2	0,0317	0,1960	0,0317	0,1605	0,0305	0,219
3	0,1150	0,1824	0,1150	0,1493	0,111	0,196
4	0,3110	0,3929	0,3110	0,3217	0,303	0,395
5	1,4000	0,1326	1,4000	0,1085	1,14	0,115
6	3,8700	0,0270	3,8700	0,0222	3,01	0,042
7	0,0132	0,0004	0,0132	0,0027	–	–
8	0,0321	0,0026	0,0321	0,0180	–	–
9	0,1390	0,0037	0,1390	0,0256	–	–
10	0,3580	0,0114	0,3580	0,0779	–	–
11	1,4100	0,0087	1,4100	0,0597	–	–
12	4,0200	0,0032	4,0200	0,0219	–	–

реактивности вблизи запаздывающей критичности при работе реактора на достаточно высоком уровне мощности позволяет исключить учет внешнего источника нейтронов и фон детектора путем зануления соответствующих параметров. Без учета источника и фона значение реактивности в ячейке J3 находится по команде «=1-(I3/V3)». Все последующие значения ρ находятся путем перетаскивания выделенной ячейки J3 захватом за ее нижний правый угол.

Использованные для файл-апробации системы параметров запаздывающих нейтронов представлены в табл. 3.

Для реакторов БР-1М и БР-К1 были выбраны 12-групповые системы параметров запаздывающих нейтронов, представленные в табл. 1 работы [4]. Для реактора ВИР-2М была выбрана 6-групповая система параметров запаздывающих нейтронов, аналогичная системе параметров запаздывающих нейтронов из таблицы 4.8 работы [5] для деления ^{235}U тепловыми нейтронами.

Реактор БР-1М

Файл-апробация токовой версии ОРУК-реактиметра на реакторе БР-1М была осуществлена с использованием регистрационного файла показаний АККМ в шестичасовом статическом энергопуске реактора. Шаг шкалы текущего времени – 1 с. Полная длительность регистрации – 23650 с. Длительность стационарного участка мощности – 23300 с. Средний ток КНК-4 $\sim 3,1 \cdot 10^{-6}$ А при среднем значении стационарной мощности $\sim 1,5 \cdot 10^{13}$ дел.АЗ/с.

Нормировка мощности в условных единицах осуществлена по соотношению $P = 10^5 I_{\text{КНК}}$.

Результаты апробации в графической форме представлены на рис. 3, 4.

Рис. 3 демонстрирует выраженную функциональную зависимость мощности от реактивности реактора БР-1М. Даже без конкретизации погрешности приведенных значений реактивности, по нашему мнению, можно ожидать хорошей практической перспективы в плане совершенствования процедуры управления процессом вывода реактора БР-1М на стационарную мощность и выдержки его на выбранном уровне в течение требуемого периода времени.

Сравнение вариативности мощности δP_j в j -м интервале квантования времени (определяемой соотношением $\delta P_j = (P_j - \bar{P}) / \bar{P}$) с вариативностью реактивности $\delta \rho_j$ относительно запаздывающей критичности $\rho = 0$ на всем интервале поддержания стационарной мощности реактора однозначно характеризует функциональную связь данных величин как выражено закономерно, а не статистически случайную. Нулевое значение базовой реактивности, относительно которой определяется вариативность, позволяет осуществить переобозначение $\delta \rho_j = \rho_j$.

Сказанное наглядно демонстрируют графики δP_j и ρ_j на избранном участке изменения j от 6200 до 7800 с, представленные на рис. 4. Несмотря на низкий уровень численных значений δP_j (не более 1 %) и ρ_j (не более $0,003\beta_{\text{эф}}$) имеет место однозначно трактуемая картина процесса регулирования в режиме ручного управления при ориентации

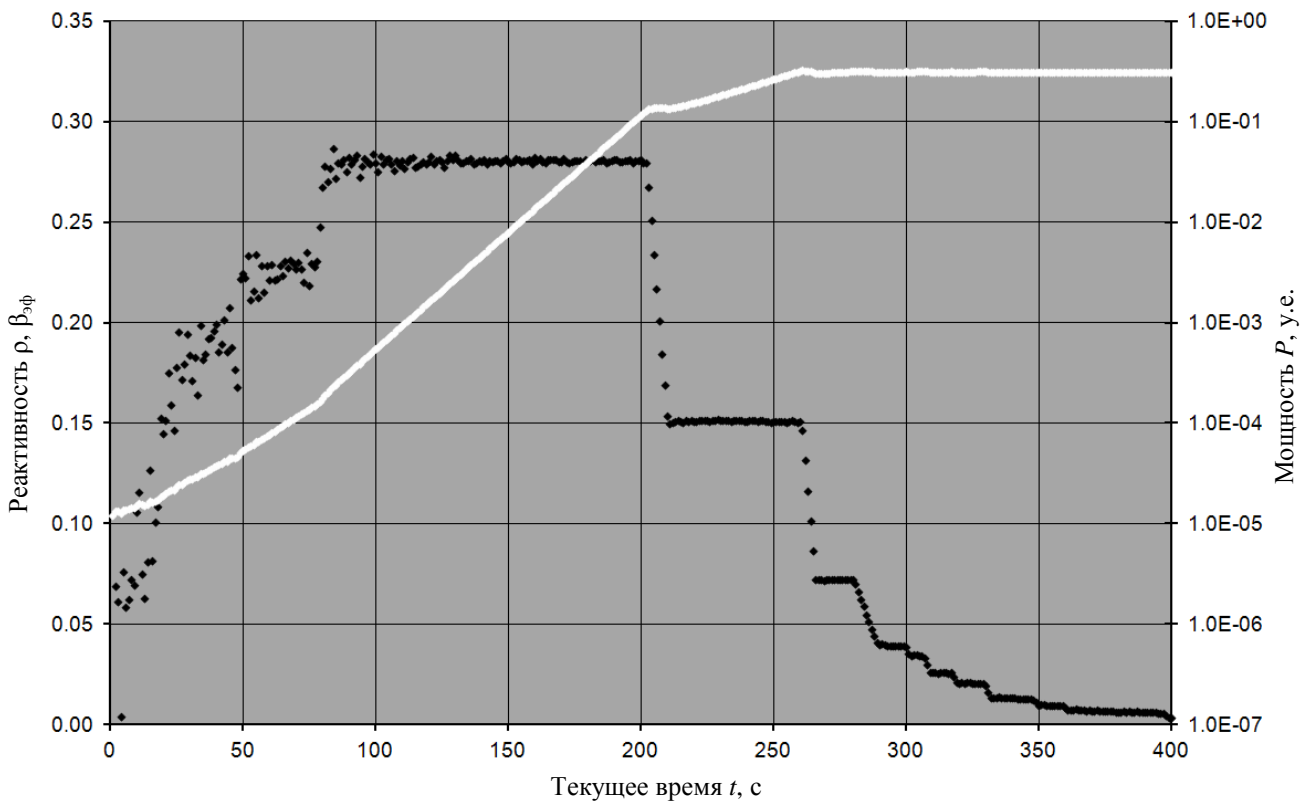


Рис. 3. Реактивность (◆) и мощность (◇) реактора БР-1М на участке выхода на стационарную мощность

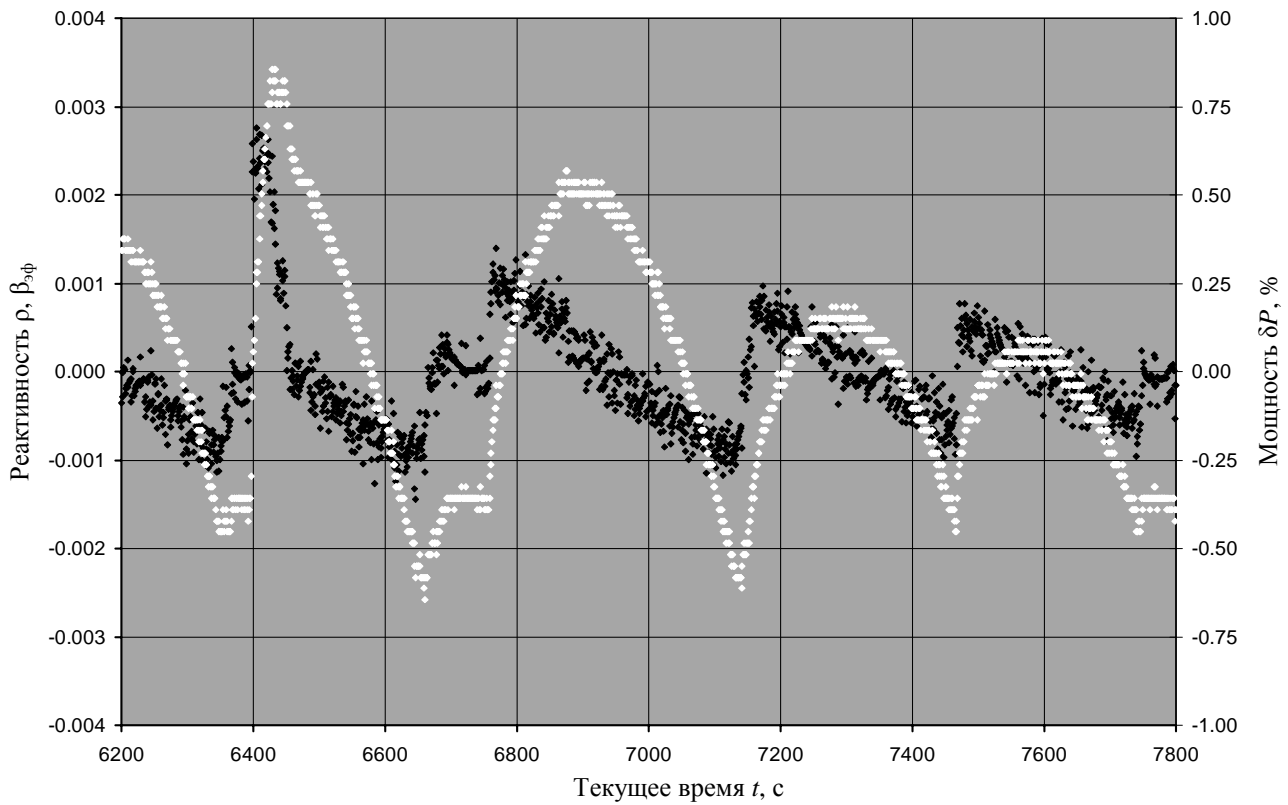


Рис. 4. Изменение реактивности (◆) и мощности (◇) реактора БР-1М на избранном участке работы на стационарной мощности

оператора на уровень мощности реактора. При доступном контроле уменьшения установленного уровня стационарной мощности оператор, опираясь на предшествующий опыт работы, путем перемещения соответствующего органа регулирования осуществляет некоторое увеличение реактивности реактора.

Во время внешнего изменения реактивности реактора, как следует из рис. 4, наблюдаемый характер изменения и реактивности, и мощности визуально одинаков. По завершению операции регулирования реактивности имеет место выражено нелинейное изменение мощности при выражено линейном изменении (уменьшении) реактивности, обусловленном ее температурным гашением. В качестве визуально контролируемого уровня изменения реактивности вполне может быть принят уровень $5 \cdot 10^{-4} \beta_{эф}$.

Реактор БР-К1

Файл-апробация токовой версии ОРУК-реактиметра на реакторе БР-К1 была осуществлена с использованием регистрационного файла пока-

заний АККМ в сорокаминутном энергопуске реактора. Шаг шкалы текущего времени – 1 с. Полная длительность регистрации – 2450 с. Длительность стационарного участка мощности – 1420 с. Средний ток КНК-4 $\sim 7,6 \cdot 10^{-6}$ А при среднем значении стационарной мощности $\sim 1,6 \cdot 10^{14}$ дел.А3/с. Нормировка мощности в условных единицах осуществлена по соотношению $P = 10^5 I_{кнк}$.

Результаты апробации в графической форме представлены на рис. 5, 6.

Рис. 5 демонстрирует связь между реактивностью и мощностью реактора, как и в случае БР-1М, вполне пригодную для совершенствования процедуры управления процессом вывода реактора БР-К1 на стационарную мощность и выдержки его на выбранном уровне в течение требуемого времени.

Рис. 6 демонстрирует связь между реактивностью и мощностью (в формате вариативности мощности) при ручном регулировании с целью фиксации выбранного стационарного уровня мощности. Как и в случае БР-1М, можно констатировать возможность надежного визуального контроля реактивности реактора в состоянии запаздывающей критичности с уровня $\sim 5 \cdot 10^{-4} \beta_{эф}$.

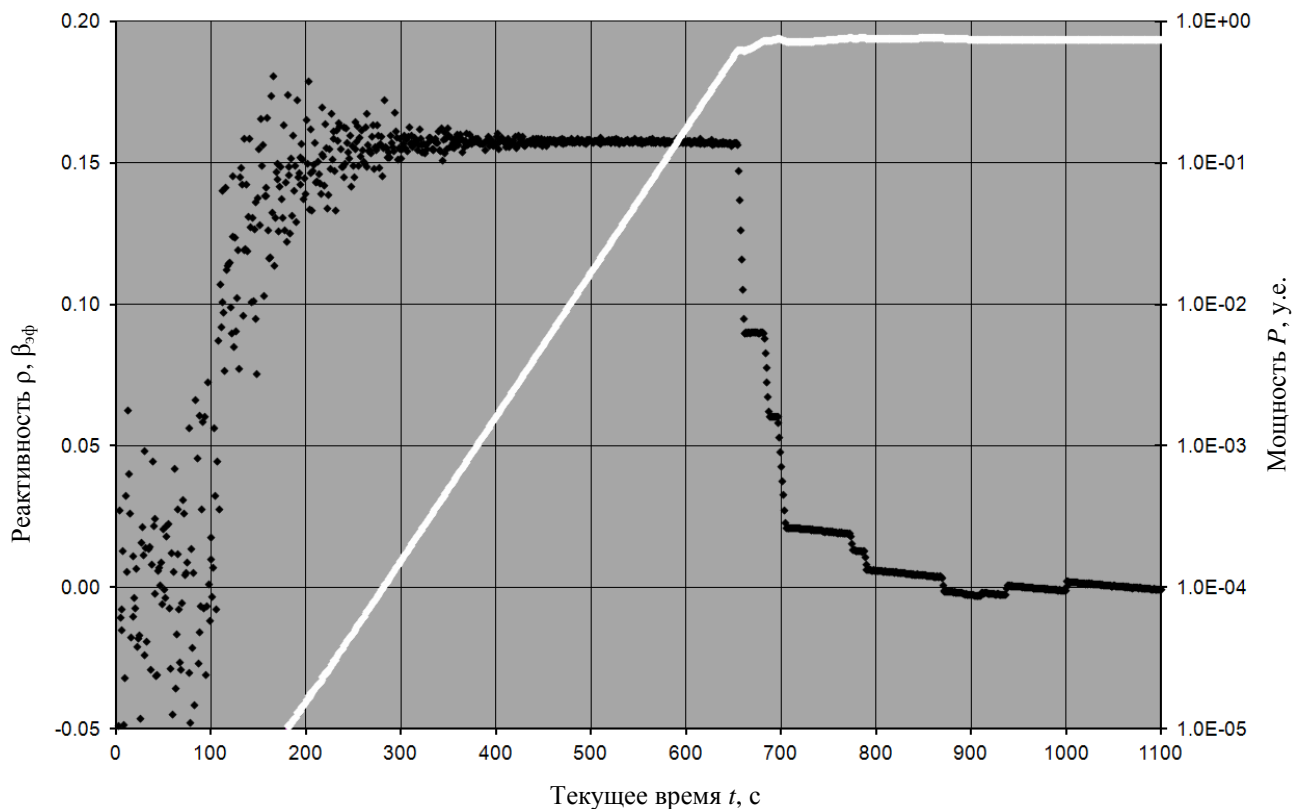


Рис. 5. Реактивность (◆) и мощность (◇) реактора БР-К1 на участке выхода на стационарную мощность

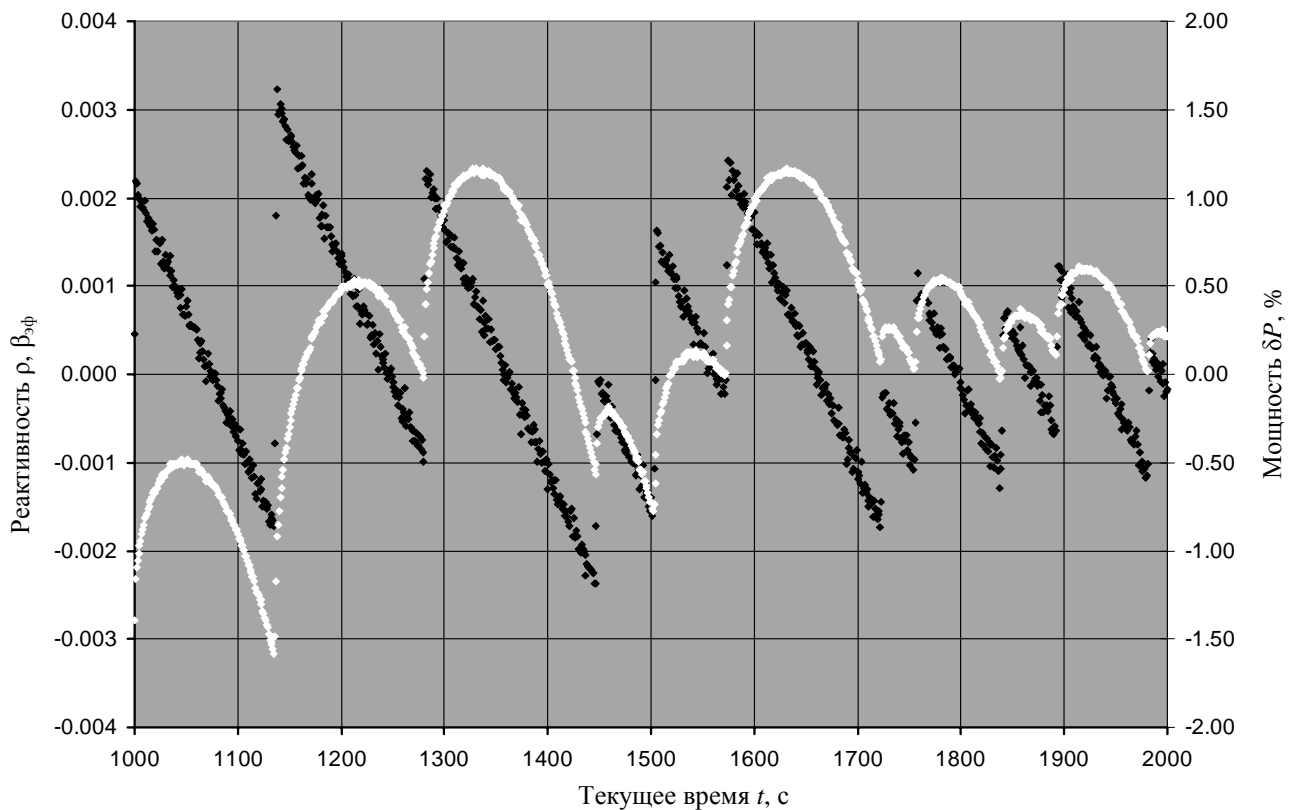


Рис. 6. Изменение реактивности (◆) и мощности (◇) реактора БР-К1 на избранном участке работы на стационарной мощности

Реактор ВИР-2М

Файл-апробация токовой версии ОРУК-реактиметра на реакторе ВИР-2М была осуществлена с использованием регистрационного файла показаний АККМ в двухсуточном энергопуске реактора. Шаг шкалы текущего времени – 1 с. Полная длительность регистрации – 167180 с. Длительность стационарного участка мощности – 162500 с. Средний ток КНК-4 $\sim 3,6 \cdot 10^{-7}$ А при среднем значении мощности на стационаре ~ 195 Вт. Нормировка мощности в условных единицах осуществлена по соотношению $P = 10^6 I_{\text{КНК}}$.

Емкость регистрационного файла АККМ для ВИР-2М значительно превосходит вычислительные и графические возможности использованной в процессе файл-апробации версии *Excel*. Поэтому в качестве апробационного файла была использована часть регистрационного файла ВИР-2М на участке времени от 1 до 50000 с.

ВИР-2М – единственная реакторная установка ВНИИЭФ, оснащенная регулятором реактивности, обеспечивающим длительную работу реактора на выбранном стационарном уровне в автоматиче-

ском режиме. Результаты ОРУК-апробации регистрационного файла, соответствующего стационарной мощности реактора ВИР-2М при ее автоматическом регулировании, в графической форме представлены на рис. 7, 8.

Особенности процедуры автоматического регулирования четко проявляются как на этапе вывода реактора на стационарную мощность (рис. 7), так и на этапе поддержания выбранного уровня стационара (рис. 8). Можно констатировать, что апробируемое техническое решение ОРУК-реактиметра с токовым детектором нейтронов обеспечивает надежный визуальный контроль реактивности и для реактора ВИР-2М с уровня $\sim 5 \cdot 10^{-4} \beta_{\text{эф}}$. Технически реализованный операционный формализм автоматического регулирования мощности реактора ВИР-2М ограничивает ее вариативность во всем интервале проанализированного пуска от +6 % до –3 % от среднего значения за пуск. Наблюдаемая вариативность реактивности относительно состояния запаздывающей критичности $\rho = 0$ в процессе автоматического регулирования мощности составляет $\pm 5 \cdot 10^{-3} \beta_{\text{эф}}$.

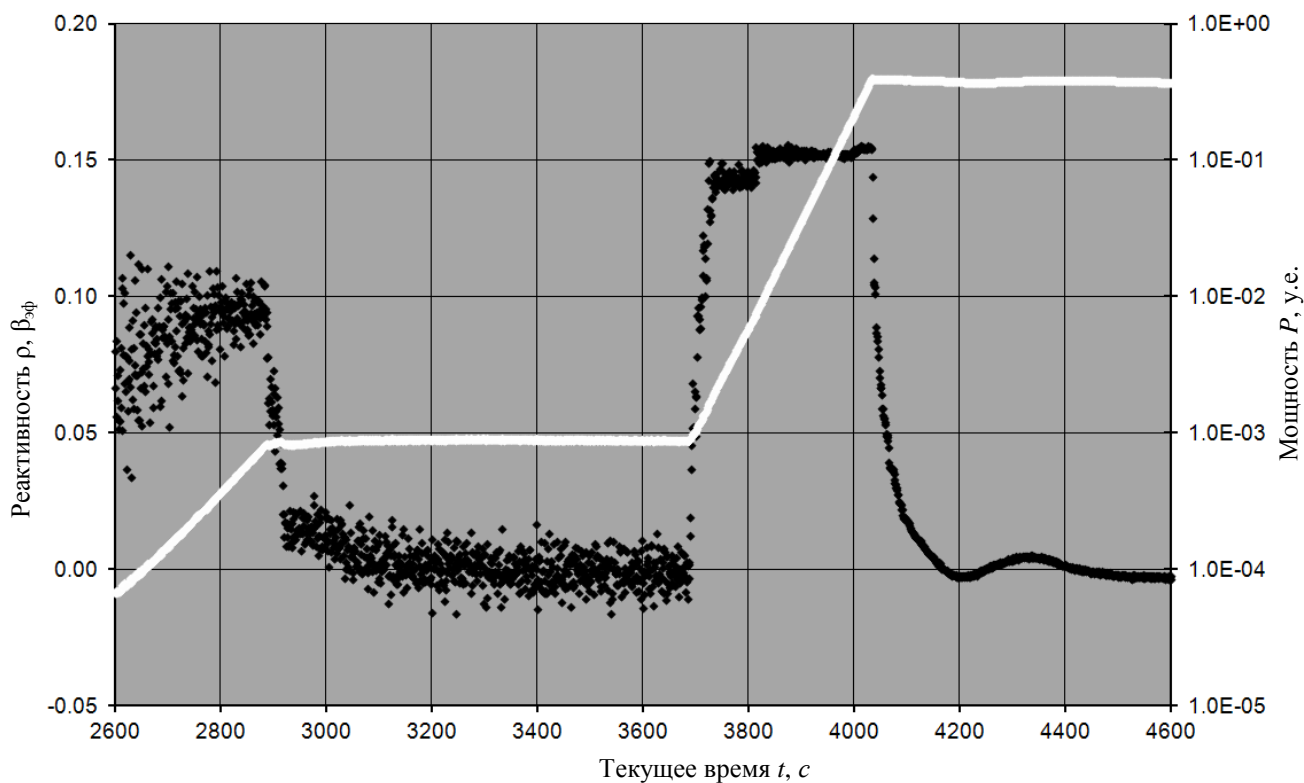


Рис. 7. Реактивность (◆) и мощность (◇) реактора ВИР-2М на участке выхода на стационарную мощность

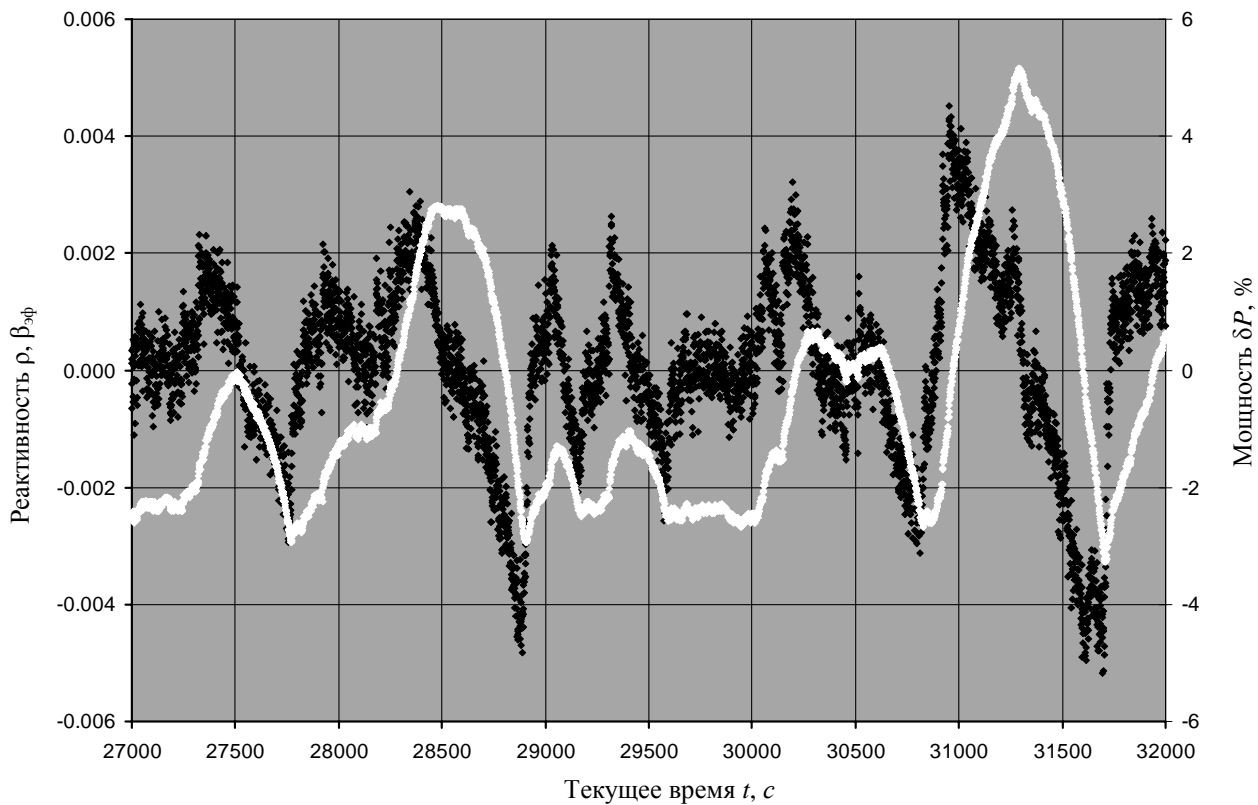


Рис. 8. Изменение реактивности (◆) и мощности (◇) реактора ВИР-2М на избранном участке работы на стационарной мощности

Заключение

Апробация ОРУК-технологии, осуществленная с использованием результатов измерения мощности в длительных статических пусках реакторных установок БР-1М, БР-К1 и ВИР-2М ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», полученных с применением разработанного во ВНИИЭФ аппаратурно-измерительного комплекса с токовым детектором нейтронов типа КНК-4, позволила установить достаточно высокий уровень диагностирования реактивности указанных реакторов в процессе их работы на энергетически значимых уровнях мощности с помощью ОРУК-реактиметра, выполненного на базе действующего аппаратурно-измерительного комплекса с КНК-4 с доработкой программного обеспечения в части реализации ОРУК-формализма в процессе регистрации текущей мощности реактора.

Полученные результаты, на наш взгляд, открывают хорошие перспективы практического использования рассмотренной технической версии ОРУК-реактиметра и как средства непрерывного контроля реактивности в планово осуществляемом энергопуске реактора, и как инструмента для совершенствования приемов ручной и автоматической регулировки реакторных установок ВНИИЭФ в статическом режиме их работы.

Список литературы

1. Пат. № 2522708 РФ, МПК G01T 3\00 (2006.01). Способ регистрации нейтронного потока ядерной установки в широком диапазоне измерений и устройство для его реализации / М. И. Овчинников, Ю. М. Дроздов, Л. Е. Довбыш, О. А. Голубева // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 20.

2. 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. 358–362.

3. Афонин С. Н., Кувшинов М. И., Чередник П. Ф. Применение цифровых реактиметров на быстрых импульсных реакторах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1985, вып. 1, с. 32–39.

4. Кошелев А. С. К выбору параметров запаздывающих нейтронов для импульсных реакторов на быстрых нейтронах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1998, вып. 2, с. 11–19.

5. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1967, 428 с.

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,
ведущий научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
факс: (83130)4-55-69.

Статья поступила в редакцию 05.06.2015.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 4, с. 39–48.