

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО КАНАЛА КОНТРОЛЯ РЕАКТИВНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА РЕАКТОРЕ БН-600 БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

А.А. Иванов, С.Ю. Митрофанов

Белоярская АЭС, г. Заречный



В статье представлены процедура введения поправки на мертвое время для проведения нейтронно-физических измерений и результаты определения эффективности РО СУЗ с использованием импульсного канала контроля реактивности.

Ключевые слова: импульсный канал, контроль, мертвое время, нейтронно-физические измерения, регулирующий орган, эффективность.

Key words: pulse circuit, monitoring, dead time, neutron measurements, control rod, worth.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на реакторе БН-600 Белоярской АЭС для проведения нейтронно-физических измерений эксплуатируется система контроля реактивности на основе цифровых вычислителей реактивности ЦВР-10.

В состав системы контроля реактивности с ЦВР-10 реактора БН-600 входят цифровой вычислитель реактивности ЦВР-10, ионизационная камера КНК-15-1 (токовый канал) и счетчик СНМ-18-1 (импульсный канал), установленные в блоке ионизационных камер реактора БН-600, кабельные линии связи, преобразователь импульсов для усиления импульсов и передачи их на вход цифрового вычислителя реактивности, персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением для контроля реактивности и подкритичности реактора БН-600 и определения эффективности РО СУЗ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РО СУЗ НА РЕАКТОРЕ БН-600

Эффективность РО СУЗ на реакторе БН-600 определяется в начале и конце микрокампании на уровне мощности $\sim 0,1\% N_{\text{ном}}$ методом сброса стержня по «Рабочей программе 2Ф» [2].

Реактивность реактора с использованием импульсного канала контроля реактивности определяется на основе обращенного решения уравнения кинетики с учетом пространственных эффектов по следующему соотношению:

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{\text{эф}}(t)} = 1 - \sum_{i=1}^M \lambda_i \int_{-\infty}^t a_i(t', t) \frac{\varepsilon(t')}{\varepsilon(t', t)} \cdot \frac{n(t') e^{-\lambda_i(t-t')}}{n(t)} dt' - \frac{S_{\text{эф}}}{n(t)} + \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt} \cdot \frac{\Lambda}{\beta_{\text{эф}}}, \quad (1)$$

где $\rho(t)$ – реактивность реактора; $\rho(t) \equiv (k(t) - 1)/k(t)$; k – коэффициент размножения нейтронов в реакторе; a_i – расчетная относительная доля запаздывающих нейтронов (ЗН) i -ой группы; λ_i – постоянная распада предшественника ЗН i -ой группы ($i = 1-6, 12, M$); $\beta_{\text{эф}}$ – эффективная доля ЗН; Λ – время генерации мгновенных нейтронов в реакторе; $S_{\text{эф}}$ – эффективная интенсивность внешнего источника нейтронов в реакторе – характеристика внешнего источника, детектора и реактора; $n(t)$ – скорость отсчетов детектора нейтронов; $\varepsilon(\vec{r}_d, t', t)$ – эффективность детектора нейтронов; \vec{r}_d – положение центра детектора, t – время для интересующей реактивности; t' – время, предшествующее времени t . Согласно работе [3] ε есть скорость отсчетов детектора, отнесенная к скорости производства ЗН деления, взвешенных их ценностью.

ПРОВЕДЕНИЕ СОВМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РО СУЗ НА РЕАКТОРЕ БН-600

В настоящее время в системе контроля реактивности возможно проведение совместных измерений на токовом и импульсном каналах контроля реактивности. Основными отличиями этих каналов являются разные типы детекторов нейтронов (токовая ионизационная камера КНК-15-1 и счетчик медленных нейтронов СНМ-18-1), разные величины дискретизации сигнала (10 Гц для токового канала и 1 Гц для импульсного канала) и наличие усилителя преобразователя импульсов для импульсного канала контроля реактивности.

При проведении совместных измерений эффективности РО СУЗ импульсным и токовым каналами контроля реактивности было отмечено, что показания вычисленной реактивности отличаются между собой из-за различного изменения вход-

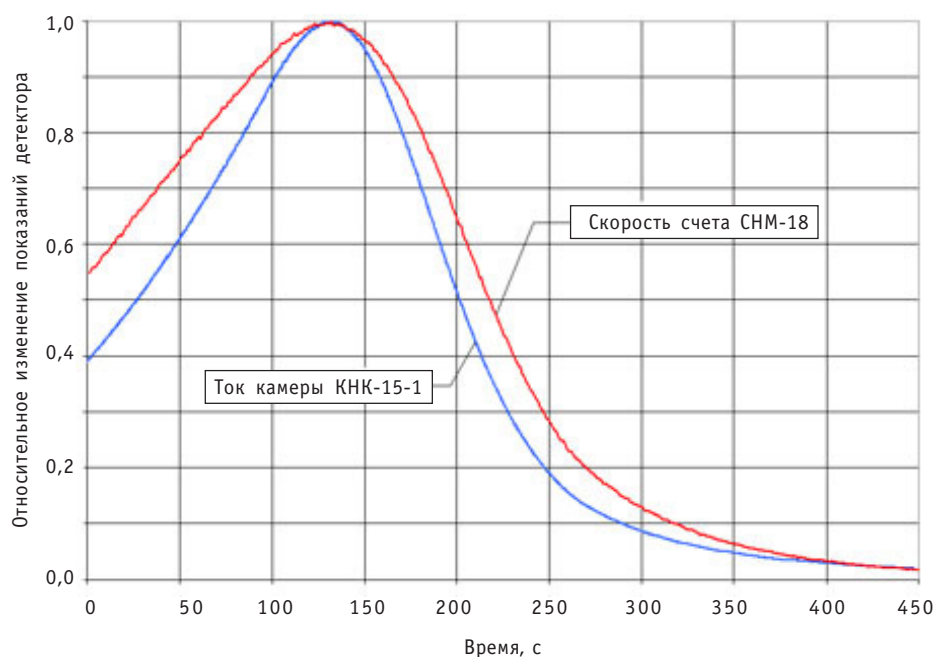


Рис. 1. Относительные изменения показаний токового и импульсного каналов контроля реактивности (КНК-15-1 и СНМ-18-1) при сбросе РО КС-16 в конце 53 МК

ного сигнала, пропорционального нейтронной мощности реактора. Отличия входного сигнала хорошо видны на рис. 1, в котором для сравнения значения тока камеры и скорости счета были отнормированы на собственные максимальные значения.

Очевидно, что отличие токового канала от импульсного канала контроля реактивности, прежде всего, связано с двумя причинами:

- просчеты импульсов на импульсном канале контроля реактивности;
- нескомпенсированный ток камеры от подвески ИК – теневой ток камеры.

Учет поправки, связанной с просчетами импульсов при измерении по импульсному каналу, позволит избежать погрешности измерений по токовому каналу, связанной с теневым током, учет которого – сложная операция, сильно зависящая от состояния активной зоны реактора. Особенно это актуально для стержней с большой эффективностью.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕРТВОГО ВРЕМЕНИ ИМПУЛЬСНОГО КАНАЛА

Для определения мертвого времени импульсного канала (поправки, связанной с просчетами импульсов) предлагается использовать следующую процедуру.

Поскольку в один и тот же момент времени показания детектора должны быть прямо пропорциональны мощности реактора и детекторы располагаются рядом друг с другом относительно активной зоны реактора (т.е. детекторы должны обладать одной и той же эффективностью), то и показания детекторов должны быть прямо пропорциональны друг другу, т.е. если рассматривать показания детекторов при проведении измерений в один и тот же момент времени, то массив данных «ток камеры – скорость счета» должен представлять собой прямую линию, в силу причин, указанных выше.

Для последующего анализа входных данных были сформированы массивы данных «ток камеры – скорость счета». Графики соответствия тока камеры скорости счета счетчика представлены на рис. 2.

Из графиков видно, что наибольшая нелинейность наблюдается при большой нагрузке (10^5 имп/с) им-

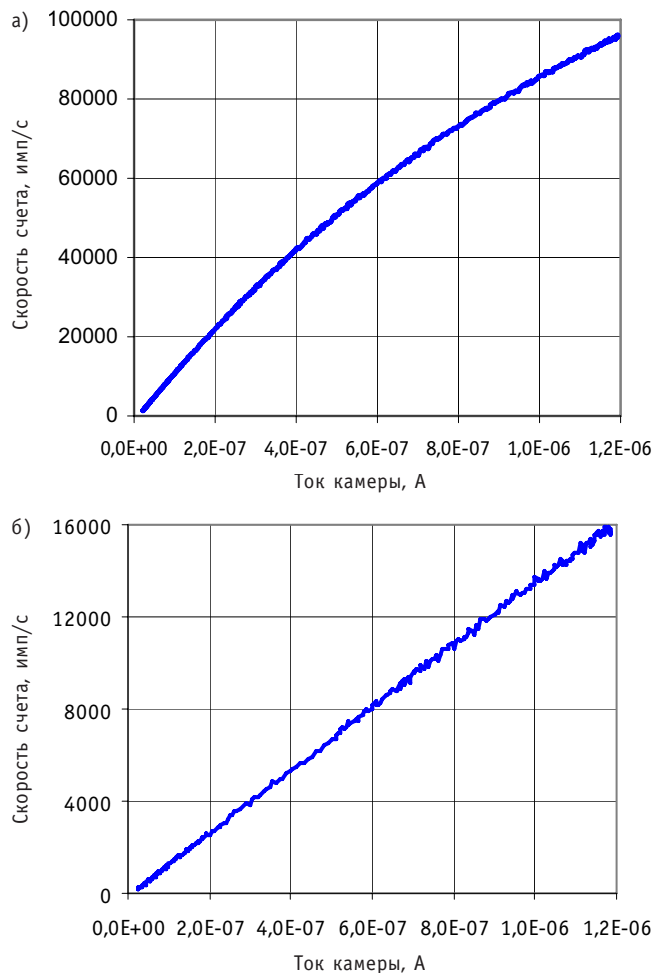


Рис. 2. Графики соответствия тока камеры КНК-15-1 скорости счета СНМ-18-1 при сбросе РО КС-18 (а) и РО КС-4 (б) в конце 53 МК

пульсного канала. При небольшой загрузке импульсного канала нелинейность выражена не так сильно.

Следует отметить, что для измерений, выполняемых импульсным каналом контроля реактивности, наблюдаются значительные флуктуации скорости счета, которые приводят при небольших нагрузках импульсного канала к флуктуациям вычисленной реактивности до 10 центов. Таким образом, для уменьшения влияния флуктуаций скорости счета необходимо применять специальные процедуры сглаживания полученного сигнала. Для измерений, выполняемых токовым каналом контроля реактивности, флуктуации тока носят менее значимый характер.

Поправка на мертвое время (просчеты импульсов) вводилась по следующему соотношению [4]:

$$N = \frac{N_0}{1 - N_0 \cdot \tau}, \quad (2)$$

где N_0 – исходная скорость счета детектора; τ_m – мертвое время; N – скорость счета с поправкой на мертвое время.

После введения поправки на мертвое время производилась оценка полученных данных на принадлежность прямой, т.е. подбиралась такая поправка, при которой полученная скорость счета линейно изменялась бы с ростом тока камеры. При этом предполагалось, что наилучшая поправка приведет к максимальному коэффициенту корреляции и минимальному стандартному отклонению в полученной зависимости скорости счета от тока камеры. Изменение стандартного отклонения и коэффициента корреляции от заданного мертвого времени показано на рис. 3.

Как видно из рис. 3, выбранные крите-

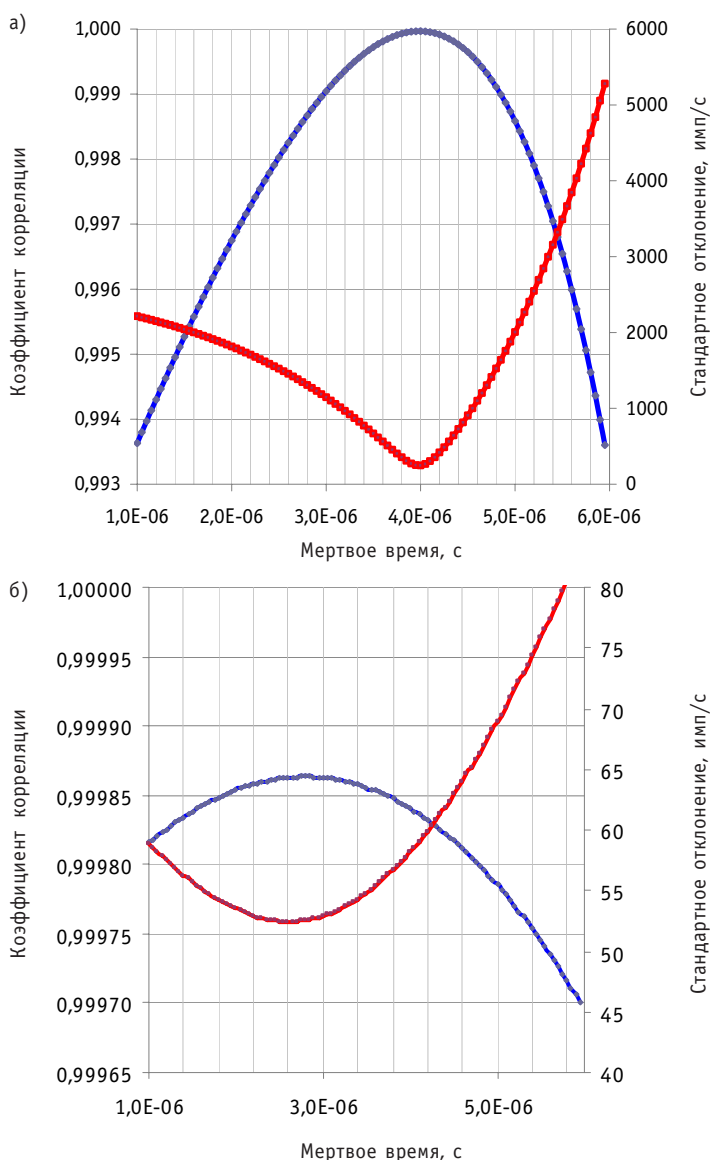


Рис. 3. Изменение стандартного отклонения и коэффициента корреляции от мертвого времени для РО КС-18 (а) и РО КС-4 (б) в конце 53 МК

рии (максимальный коэффициент корреляции и минимальное стандартное отклонение) служат достаточно надежным критерием для определения мертвого времени. Результаты определения мертвого времени (τ_M , с) для различных МК приведены в табл. 1. Здесь же приведены значения максимальной загрузки импульсного канала ($\text{MAX } N_0$, имп/с).

Как видно из табл. 1, мертвое время имеет достаточно большой разброс значений. Очевидно, что чем больше загрузка импульсного канала, тем больше будет мертвое время, и наоборот, с уменьшением загрузки импульсного канала мертвое время уменьшается, но погрешность его определения увеличивается (значитель-

Таблица 1

Результаты определения мертвого времени для различных МК

РО СУЗ	Конец 51 МК		Начало 52 МК		Конец 53 МК		Начало 56 МК	
	τ_M , мкс	$\text{MAX } N_0$ имп/с	τ_M , мкс	$\text{MAX } N_0$ имп/с	τ_M , мкс	$\text{MAX } N_0$ имп/с	τ_M , мкс	$\text{MAX } N_0$ имп/с
КС-1	3,40	28708	—	—	2,98	15229	3,80	88736
КС-2	3,35	28451	—	—	2,65	16202	3,85	92917
КС-3	3,40	28302	—	—	2,95	15807	3,85	93152
КС-4	3,50	28812	—	—	2,28	15815	3,85	94302
КС-5	3,40	30001	—	—	—	—	3,85	94398
КС-6	3,45	29068	—	—	2,50	15451	3,85	94653
КС-7	3,35	28615	3,35	33343	2,53	16169	3,85	94855
КС-8	3,60	52197	3,70	66015	2,55	15325	3,85	96167
КС-9	3,50	29344	3,70	66840	2,83	15650	3,80	90436
КС-10	3,75	62164	3,70	67333	3,85	90727	3,80	93642
КС-11	3,80	74721	3,73	66372	2,20	14714	3,83	93197
КС-12	4,00	92861	3,75	65157	2,50	14616	3,85	92532
КС-13	3,45	28979	3,70	64680	2,50	15844	3,85	91060
КС-14	4,00	96778	3,75	66548	2,40	15479	3,85	92195
КС-15	4,00	93193	3,70	65579	2,78	14971	3,85	92682
КС-16	4,00	92461	3,70	66856	4,10	114700	3,90	93530
КС-17	3,25	29324	3,60	64839	3,90	96344	3,80	91091
КС-18	4,00	95609	3,65	65906	3,90	95851	3,80	92135
КС-Ц	3,38	27637	—	—	2,73	14276	—	—
РС-1	3,33	27152	—	—	—	—	3,55	57847
РС-2	3,10	26811	—	—	2,93	13321	3,85	86932
А3-1	3,95	87823	4,05	103807	3,90	78286	4,10	114350
А3-2	3,85	79371	4,15	115479	3,80	68841	3,75	81897
А3-3	3,85	83502	3,90	90472	3,90	77163	4,25	131208
А3-4	3,90	84059	3,95	92822	3,75	68028	3,45	48371
А3-5	—	—	3,95	91682	3,80	72293	—	—
А3-П	3,95	87645	3,80	71863	—	—	3,85	80966

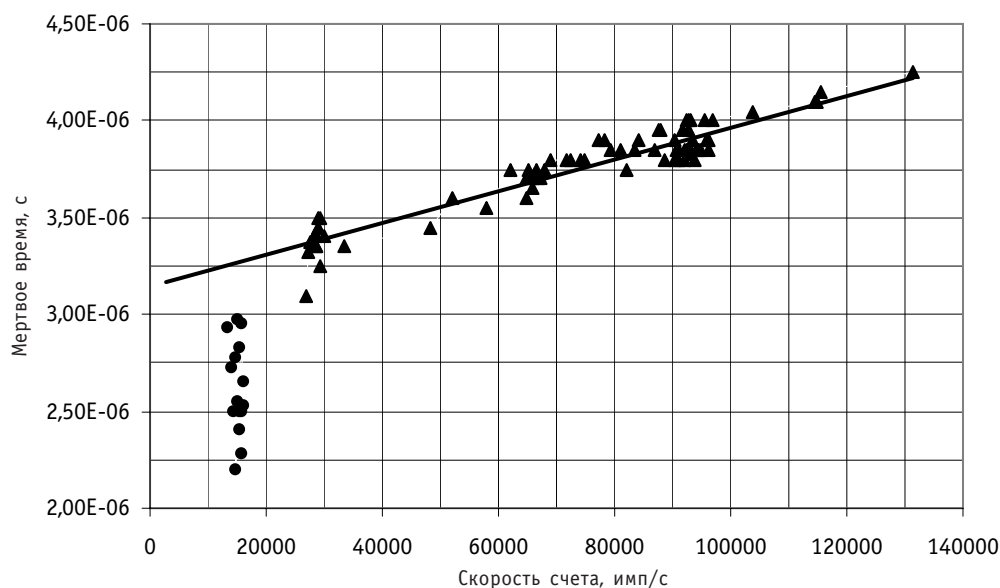


Рис. 4. Зависимость мертвого времени от максимальной скорости счета

ную роль начинает играть относительная случайная погрешность измерения скорости счета, которая увеличивается с уменьшением скорости счета). На рис. 4 приведен график зависимости мертвого времени от максимальной загрузки импульсного канала.

Из рис. 4 следует, что при нагрузках импульсного канала более $2 \cdot 10^4$ имп/с зависимость мертвого времени от скорости счета можно описать линейной функцией. Коэффициент достоверности аппроксимации данных составит в этом случае $R^2 = 0,9$, а погрешность – $1,4 \cdot 10^{-7}$ с при доверительной вероятности $P=0,95$. При нагрузке импульсного канала менее $2 \cdot 10^4$ имп/с наблюдается большой разброс значений, который связан с малой нагрузкой импульсного канала и соответ-

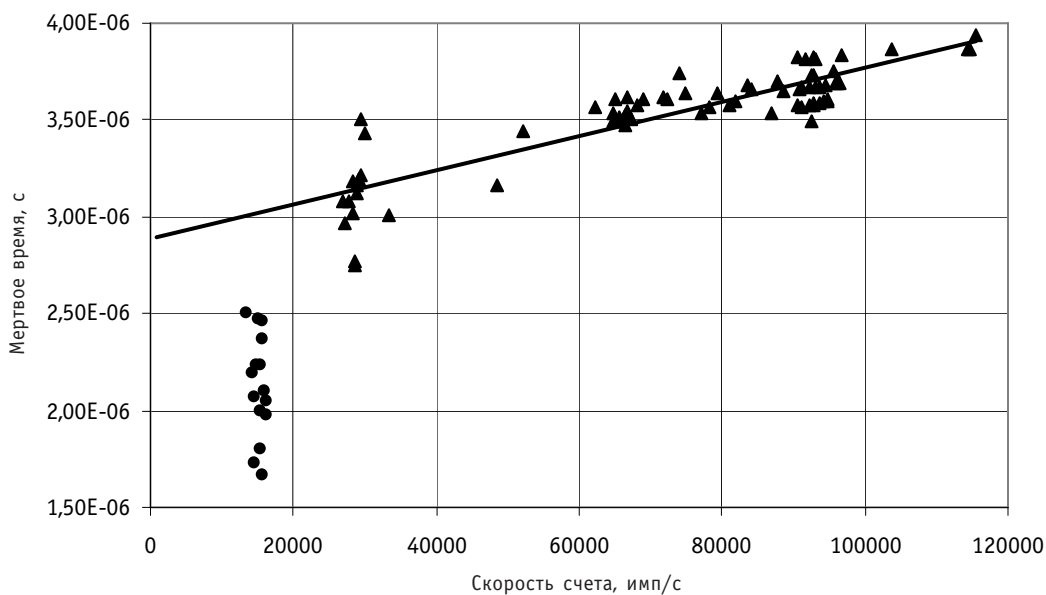


Рис. 5. Зависимость мертвого времени от максимальной скорости счета

ственно с большим влиянием случайной погрешности. Также следует отметить, что все данные, которые выпадают из предложенной линейной модели, были записаны при измерениях в конце 53 МК, т.е. для подтверждения полученных результатов требуется проведение дополнительных измерений с малой загрузкой импульсного канала.

В соотношении (2) принимается, что мертвое время является некоторой постоянной величиной для любой скорости счета. Из рис. 4 видно, что мертвое время непостоянно и зависит от скорости счета. Для предположения, что мертвое время зависит от скорости счета линейно, были проведены вычисления мертвого

Таблица 2

Результаты определения мертвого времени как линейной функции от скорости счета для различных МК

РО СУЗ	Конец 51 МК		Начало 52 МК		Конец 53 МК		Начало 56 МК	
	$\tau_{\text{мр}}$ мкс	MAX $N_{\text{ср}}$ имп/с	$\tau_{\text{мр}}$ мкс	MAX $N_{\text{ср}}$ имп/с	$\tau_{\text{мр}}$ мкс	MAX $N_{\text{ср}}$ имп/с	$\tau_{\text{мр}}$ мкс	MAX $N_{\text{ср}}$ имп/с
КС-1	2,77	28708	—	—	2,47	15229	3,65	88736
КС-2	3,19	28451	—	—	2,04	16202	3,58	92917
КС-3	3,02	28302	—	—	2,37	15807	3,67	93152
КС-4	3,12	28812	—	—	1,67	15815	3,60	94302
КС-5	3,43	30001	—	—	—	—	3,68	94398
КС-6	3,20	29068	—	—	1,99	15451	3,60	94653
КС-7	2,75	28615	3,01	33343	1,97	16169	3,60	94855
КС-8	3,44	52197	3,50	66015	2,24	15325	3,69	96167
КС-9	3,50	29344	3,62	66840	2,46	15650	3,57	90436
КС-10	3,57	62164	3,50	67333	3,66	90727	3,67	93642
КС-11	3,64	74721	3,52	66372	1,73	14714	2,74	93197
КС-12	3,74	92861	3,61	65157	2,07	14616	3,50	92532
КС-13	3,17	28979	3,54	64680	2,10	15844	3,57	91060
КС-14	3,83	96778	3,48	66548	1,80	15479	3,58	92195
КС-15	3,82	93193	3,52	65579	2,23	14971	3,59	92682
КС-16	3,73	92461	3,55	66856	3,86	114700	3,59	93530
КС-17	3,21	29324	3,49	64839	3,69	96344	3,67	91091
КС-18	3,75	95609	3,50	65906	3,69	95851	3,67	92135
КС-Ц	3,08	27637	—	—	2,19	14276	—	—
РС-1	3,10	27152	—	—	—	—	2,97	57847
РС-2	3,08	26811	—	—	2,51	13321,1	3,54	86932
А3-1	3,69	87823	3,87	103807	3,57	78286	3,87	114350
А3-2	3,64	79371	3,94	115479	3,61	68841	3,60	81897
А3-3	3,68	83502	3,82	90472	3,54	77163	3,78	131208
А3-4	3,66	84059	3,82	92822	3,58	68028	3,16	48371
А3-5	—	—	3,82	91682	3,61	72293	—	—
А3-П	3,70	87646	3,62	71863	3,43	81481	3,58	80966

Таблица 3

**Результаты расхождений в эффективности
РО СУЗ**

РО СУЗ	Конец 51 МК	Начало 52 МК	Конец 53 МК	Начало 56 МК
	$\Delta R(\tau_n), \%$	$\Delta R(\tau_n), \%$	$\Delta R(\tau_n), \%$	$\Delta R(\tau_n), \%$
КС-1	5,7	—	3,6	2,1
КС-2	-5,3	—	-0,9	-0,1
КС-3	2,9	—	2,9	-1,6
КС-4	-2,7	—	-0,2	0,1
КС-5	-2,6	—	—	0,4
КС-6	4,8	—	1,9	1,6
КС-7	1,2	0,5	-0,5	-1,4
КС-8	1,6	-0,7	2,1	-0,9
КС-9	0,0	-1,7	0,3	-1,1
КС-10	-3,3	0,8	0,5	-4,2
КС-11	-0,4	0,2	1,1	6,7
КС-12	-3,2	-0,5	-0,4	1,0
КС-13	-1,9	-1,1	-2,3	1,5
КС-14	-1,6	-1,3	0,0	1,6
КС-15	0,9	-0,3	-0,2	-0,5
КС-16	-0,2	0,0	-0,2	0,6
КС-17	0,6	0,0	0,7	2,7
КС-18	-2,6	-1,4	-0,3	0,5
КС-Ц	5,5	—	2,8	—
РС-1	-0,7	—	—	2,1
РС-2	-1,4	—	-0,3	0,9
АЗ-1	-2,7	-1,9	1,3	-0,9
АЗ-2	-2,5	-4,0	-1,0	-0,6
АЗ-3	-2,2	-0,6	1,8	5,3
АЗ-4	-1,0	-0,4	-0,1	-0,6
АЗ-5	—	0,6	-0,2	—
АЗ-П	-2,4	-0,3	—	1,6
Среднее	-0,5	-0,7	0,5	0,7

времени как линейной функции от скорости счета (результаты представлены в табл. 2).

График полученной зависимости мертвого времени от максимальной загрузки импульсного канала приведен на рис. 5.

Коэффициент достоверности аппроксимации данных составит в этом случае $R^2 = 0,8$, а погрешность – $2,4 \cdot 10^{-7}$ с при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Предлагается для определения мертвого времени при проведении измерений с использованием импульсного канала вводить поправку на мертвое время в со-

ответствии с соотношением (2) и учитывать, что мертвое время зависит от загрузки импульсного канала следующим образом:

$$\tau_m = N_0 \cdot 8.775 \cdot 10^{-12} + 2.890 \cdot 10^{-6}. \quad (3)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РО СУЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО КАНАЛА КОНТРОЛЯ РЕАКТИВНОСТИ

Для определения эффективности РО СУЗ данные измерений скорости счета при сбросе стержней СУЗ были поправлены на мертвое время и была определена их эффективность. Результаты отличий в эффективности РО СУЗ с учетом поправки на мертвое время ($\Delta R(\tau_m)$) от данных, полученных по токовому каналу, представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, введение поправки на мертвое время приводит к хорошему совпадению эффективностей РО СУЗ, полученных по токовому и импульсному каналам. Среднее отличие эффективностей РО СУЗ не превышает 0,7% для всех четырех серий измерений, причем без введения поправки на мертвое время среднее отличие в эффективностях РО СУЗ для конца 51 МК составило 14,5%, а для начала 52–15,8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определена процедура вычисления мертвого времени импульсного канала и рекомендовано соотношение для определения поправки на мертвое время при проведении нейтронно-физических измерений с использованием импульсного канала контроля реактивности.
2. Разработана программа для определения мертвого времени и формирования файлов данных для импульсного канала контроля реактивности.
3. Для снижения погрешности при определении эффективности РО СУЗ (особенно с большой эффективностью) рекомендуется проводить измерения эффективности РО СУЗ параллельно с использованием токового и импульсного каналов.

Литература

1. Инструкция по эксплуатации аппаратуры каналов контроля реактивности и проведению физических измерений на реакторе БН-600 блока №3 Белоярской АЭС. 2008.
2. Шокодько А.Г. Строгое уравнение кинетики ядерного реактора//Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика и техника ядерных реакторов». – 1988. – Вып. 4.
3. Юдин М.Ф. и др. Измерение активности радионуклидов. Справочное пособие. – СПб., 1997.

Поступила в редакцию 14.04.2009

(Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 4 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

For nearly 30-year history of the Beloyarsk NPP BN600 reactor operation a complex of the calculational and experimental measures to monitor the neutron characteristics of the reactor core has been worked through. Nevertheless undoubtedly the development of the acceptable methods of the monitoring of neutron characteristics is an important task for ensuring the reliable and safe operation of the BN600 reactor.

This paper presents the rationale of the additional method of the determination of the anticipated position of shimrod KS1-18 under the critical conditions after reload of the core components on the basis of the experimental data for the period from cycle 39 to cycle 56. In combination with the existing method the above-mentioned method allows one to reliably determine the position of shimrod KS1-18 under the critical conditions, improve safety and efficiency of the BN600 reactor operation.

УДК 621.039.56

Determination of the worth of the Beloyarsk NPP BN600 reactor control rods taking into account the power reactivity effect/A.A. Ivanov, S.Yu. Mitrofanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 4 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 3 titles.

The article presents both the results of the determination of the worth of the control rods taking into account the power reactivity effect as of the beginning of cycle 56 and the influence of the power reactivity effect on the integral characterization of the bank of the shimrod rods.

УДК 621.039.56

Use of the Pulse Circuit of the Reactivity Monitoring during the Beloyarsk NPP BN-600 Reactor Neutron Measurements/A.A. Ivanov, S.Yu. Mitrofanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 3 tables, 5 illustrations. – References, 3 titles.

The article presents both the procedure of introducing the dead time correction for fulfilment of the neutron measurements and the results of the determination of the control rod worth using the pulse circuit of the reactivity monitoring.

УДК 621.039.526: 621.039.51

Simplified Methodology of the Calculation of the Physical Characteristics of the Irradiated BN-600 Reactor Europium Control Rods/A.I. Karpenko, V.I. Ogleznev, A.M. Tuchkov, I.A. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 4 titles.

On the basis of the experience of the calculation of the physical characteristics of the spent control rods with the europium absorbers of the BN600 reactor the simplified methodology for the quick evaluation of the main characteristics of these rods has been developed. This methodology can be applied for the evaluation of the physical characteristics of the europium control rods not only of the BN600 reactor but also other fast reactors (including those under design).

УДК 621.039.564

The System of the Recording of the Position of the Control Rods without the use of the Selsyns/N.N. Oshkanov, O.A. Potapov, Yu.V. Nosov, M.T. Telichko, A.P. Yuzhakov, I.S. Pomortsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 1 title.

The design of the system of the recording of the control rod position without use of the selsyns, its technical characteristics as well as the monitoring of the system operation are presented. The accuracy of the measurements is evaluated. The forms and ways of the presentation of the information on the control rod positions are shown. The results of the trial operation for two years show the possibility to use the existing modification of the system.