

Научная статья

УДК 621.039

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30103>



И.А. Прохоров ✉, *И.Е. Иванов*, *И.Ф. Моисеев*, *В.Е. Дружинин*

АО "ВНИИАЭС", Москва, Россия

✉ prokhorov.igor2202@mail.ru

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ОПЫТОВ ПО ВЗВЕШИВАНИЮ УЧАСТКА СТЕРЖНЕЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОСТИ НА РЕАКТОРЕ РБМК

Аннотация. Обработка опыта по определению эффективности (взвешиванию) стержней автоматического регулятора является одним из этапов оценки парового коэффициента реактивности на реакторных установках РБМК-1000. Паровой коэффициент реактивности является одной из важнейших нейтронно-физических характеристик, определяющих характер обратных связей в реакторе и безопасность при проектных и запроектных авариях. В статье исследуются неопределенности обработки опыта по взвешиванию стержней автоматического регулятора при измерении парового коэффициента реактивности методом внесения возмущений в расход питательной воды. Рассмотрены существующие способы обработки опыта по взвешиванию стержней автоматического регулятора, применяемые на АЭС. На основании исследования результатов обработки измерений парового коэффициента реактивности на Курской, Смоленской и Ленинградской АЭС сделан вывод о предпочтительном варианте обработки опыта по взвешиванию стержней автоматического регулятора. Приведена оценка инструментальной погрешности измерения реактивности на энергетическом уровне мощности.

Ключевые слова: РБМК-1000, реактивность, паровой коэффициент реактивности, сглаживающий сплайн, стандартная неопределенность.

Для цитирования:

Прохоров И.А., Иванов И.Е., Моисеев И.Ф., Дружинин В.Е. Неопределенности обработки опытов по взвешиванию участка стержней автоматического регулятора при измерении парового коэффициента реактивности на реакторе РБМК // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 69–81. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30103>



I.A. Prokhorov ✉, I.E. Ivanov, I.F. Moiseev, V.E. Druzhinin

JSK "VNIIAES", Moscow, Russia

✉ prokhorov.igor2202@mail.ru

UNCERTAINTIES IN PROCESSING THE EXPERIMENT TO DETERMINE THE EFFICIENCY OF THE SECTION OF THE AUTOMATIC REGULATOR RODS WHEN MEASURING THE VOID COEFFICIENT OF REACTIVITY AT THE RBMK REACTOR

Abstract. The article discusses the uncertainties in determining the efficiency of the automatic regulator rods when measuring the void reactivity coefficient by the method of perturbation of feed water flow at the RBMK-1000 reactor. The existing methods for assessing the effectiveness of a rod are considered. Based on the study of the results of processing measurements of the void reactivity coefficient at the Kursk, Smolensk and Leningrad nuclear power plants, a conclusion is made about the preferred option for processing the experience of weighing the rods of an automatic regulator. The estimation of the instrumental error of measuring reactivity at the power energy level is given.

Keywords: RBMK-1000, reactivity, void coefficient of reactivity, smoothing spline, standard uncertainty.

Citation:

I.A. Prokhorov, I.E. Ivanov, I.F. Moiseev, V.E. Druzhinin, Uncertainties in processing the experiment to determine the efficiency of the section of the automatic regulator rods when measuring the void coefficient of reactivity at the RBMK reactor, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 69–81, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30103>

Введение. Паровой коэффициент реактивности (ПКР) является одной из наиболее важных нейтронно-физических характеристик (НФХ) реакторов РБМК-1000 [1–3]. Он определяется соотношением: $\alpha_{\varphi} = dp/d\varphi$, где dp – малое по величине изменение реактивности, вызванное малым изменением паросодержания $d\varphi$. Значения ПКР на реакторах РБМК-1000 не должны выходить за границы эксплуатационного диапазона ($0 - 1 \beta_{эф}$). Измерения ПКР выполняется путем проведения серии специальных опытов с возмущением расхода питательной воды (РПВ) и опыта по определению эффективности участка стержней автоматического регулирования (АР)¹. В случае положительного ПКР увеличение расхода питательной воды через реактор приводит к снижению величины паросодержания, вводу отрицательной реактивности и отработке (частичному извлечению) стержней АР. Обратная ситуация наблюдается при снижении расхода питательной воды: паросодержание увеличивается, что приводит к вводу положительной реактивности и вводу стержней АР в активную зону реактора [4].

Существующий вариант методики проведения и обработки измерений ПКР имеет ряд неопределенностей, таких как:

- неопределенность, связанная с экспертным выбором параметров обработки результатов, таких как расстановка временных меток для срезов исходных данных, на которых выполняются расчеты паросодержания;

¹ РД ЭО 1.1.2.99.1423-2018 «Комплексная методика определения физических и динамических характеристик реакторов РБМК-1000». М. 2018 (далее Методика).

- неопределенность, связанная с применением цифровой фильтрации (сглаживания) результатов измерений технологических параметров (ТП);
- неопределенность в оценке эффективности участка стержней АР;
- неопределенность использования исходных данных, зарегистрированных с различной частотой;

Эти неопределенности могут привести к снижению достоверности оценки величины ПКР – характеристики, в значительной мере определяющей решения по изменению состава загрузки активных зон реакторов РБМК-1000.

Обработка результатов измерений технологических параметров (ТП) и вычисление значения ПКР осуществляется с использованием уравнений баланса реактивности при проведении серии опытов с возмущением РПВ и опыта по определению эффективности участка стержней АР.

Расчёт ПКР на АЭС с реакторами РБМК-1000 при использовании средств автоматизированной обработки результатов измерений состоит из трёх этапов:

- обработка опыта по определению эффективности участка стержней АР и вычисление значения быстрого мощностного коэффициента реактивности (БМКР);
- обработка опытов с возмущением расходов питательной воды по половинам реактора, где с использованием теплофизических параметров (энтальпия, температура питательной воды, давление в барабане-сепараторе и ряд других) и данных, полученных на первом этапе обработки, вычисляются оценки парового коэффициента реактивности в отдельных опытах;
- итоговая оценка ПКР по методу наименьших квадратов.

Настоящая работа посвящена исследованию неопределенностей измерения ПКР на АЭС с реакторами РБМК, связанных с обработкой опыта по взвешиванию участка стержней АР [5].

Подходы к обработке опыта по взвешиванию участка стержней АР

Характерный вид графика изменения реактивности и мощности при определении эффективности участка стержней АР приведен на рис. 1. На нем следует отметить следующие три особые точки:

- T_0 – момент времени начала движения стержней АР;
- T_1 – момент времени, соответствующий установившемуся значению отклонения нейтронной мощности от исходной;
- T_t – момент времени, соответствующий минимуму реактивности.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}\Delta W_t &= W_t - W_0; \\ \Delta W_1 &= W_1 - W_0,\end{aligned}$$

где W_0 , W_1 , W_t значения нейтронной мощности в моменты времени T_0 , T_1 , T_t соответственно.

Уравнения баланса реактивности в точках T_t и T_1 имеют вид:

$$\begin{cases} \rho_n + \rho_{взв} + \alpha_w \Delta W_t f = \rho_{изм} \\ \rho_n + \rho_{взв} + \alpha_w \Delta W_1 = \rho_{ост} \end{cases}, \quad (1)$$

где:

- ρ_n , $\rho_{ост}$, $\rho_{изм}$ – значения реактивности, измеренной в моменты времени T_0 , T_1 и T_t соответственно;
- $\rho_{взв}$ – реактивность, введенная при погружении в а.з. участка стержней АР;
- f – относительное изменение тепловой мощности по отношению к нейтронной за время ввода стержней T_t .

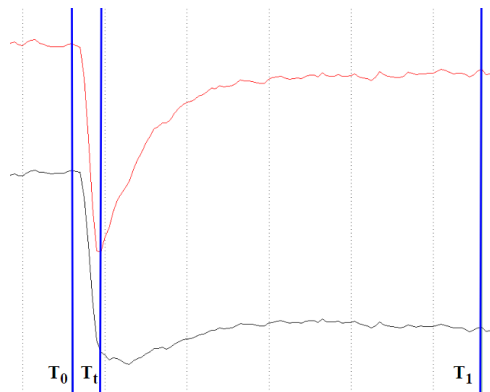


Рис. 1. Характерный вид кривых изменения мощности (черный) и реактивности (красный) в опыте по взвешиванию участка стержней АР

Fig. 1. Typical appearance of the power (black) and reactivity (red) change curves in the experiment to determine the efficiency of automatic regulation rods

Результатом обработки опыта по взвешиванию является вычисление из системы уравнений (1) значения реактивности $\rho_{\text{взв}}$:

$$\rho_{\text{взв}} = \frac{\rho_{\text{изм}}}{1 - \frac{\Delta W_t f}{\Delta W_1}} \quad (2)$$

Изменение реактивности за счет изменения паросодержания в опытах с возмущением РПВ определяется из уравнения баланса реактивности для каждого опыта:

$$\alpha_{\phi} \cdot \Delta \rho_{\text{взв},l} + \alpha_z \cdot \Delta W_l + \rho_{\text{сyz},l} = \rho_{\text{к},l} - \rho_{\text{н},l} \quad (3)$$

где:

- l – номер опыта;
- $\rho_{\text{взв},l}$ – изменение паросодержания, взвешенное с квадратом плотности потока нейтронов в реакторе;
- $\rho_{\text{сyz},l}$ – изменение реактивности за счет перемещения стержней АР. Вычисляется с учетом перемещения стержней АР в опыте с возмущением РПВ и в опыте по «взвешиванию» участка стержней АР на основе $\rho_{\text{взв}}$;
- ΔW_l – изменение мощности в зоне нечувствительности АР;
- $\rho_{\text{к},l}, \rho_{\text{н},l}$ – значения реактивности реактора в момент расчёта паросодержания в возмущенном состоянии и непосредственно перед началом изменения мощности реактора, вызванного возмущением РПВ;
- α_z – доплеровская составляющая быстрого мощностного коэффициента реактивности (заданная величина, равная $-3,3 \cdot 10^{-4} \beta/\text{МВт}$, оцененная по результатам измерений).

Таким образом, оценка $\rho_{\text{взв}}$ влияет на $\rho_{\text{сyz},l}$ (3), а, следовательно, и на величину ПКР по совокупности опытов с возмущением РПВ.

При регистрации ТП, необходимых для расчётной обработки измерений ПКР, осуществляется их запись в файл с тактом 500 мс. Однако в ряде случаев параметры «мощность» и «положение стержней АР» записываются в файл с более высокой частотой. Такой файл формируется по апертурному принципу (запись набора параметров осуществляется, когда изменился хотя бы один из них).

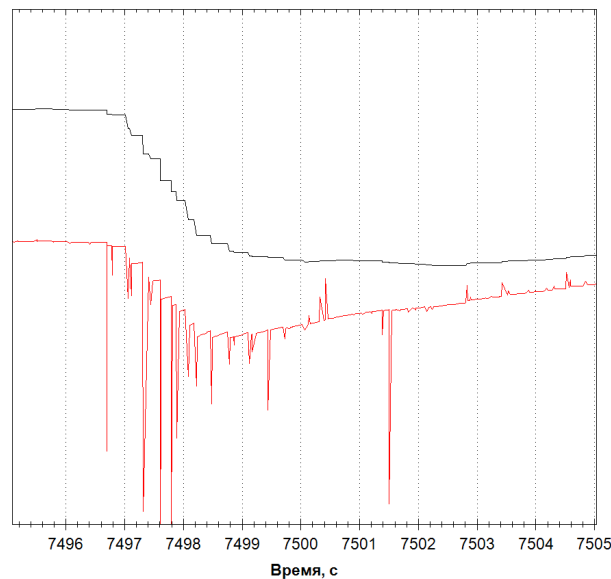


Рис. 2. Характерный вид кривых мощности (черный) и реактивности (красный) в опыте по «взвешиванию» ст. АР. Параметр мощность взят из файла с высокой частотой регистрации ТП

Fig. 2. Typical appearance of the power (black) and reactivity (red) curves in the experiment to determine the effectiveness of automatic regulation rods. The power parameter is taken from a file with a high recording frequency

Стремление использовать файл с высокой частотой регистрации было продиктовано желанием как можно более детально описать поведение мощности в процессе погружения стержней АР в опыте определению $\rho_{\text{взв}}$, весь процесс погружения стержней занимает 1,5–2 с. За этот промежуток времени в файле с таким дискретизацией 500 мс будет отражено 2–3 записи, что, на первый взгляд, кажется недостаточным для описания поведения кривой мощности в опыте с погружением стержней АР (рис. 1).

Однако прямое использование файла с высокой частотой регистрации ТП для определения $\rho_{\text{взв}}$ приводит к неприемлемым результатам ввиду особенностей решения уравнений точечной кинетики в случае, когда функция параметра мощность носит ступенчатый характер (рис. 2). К ступенчатому характеру кривой мощности приводит избыточная дискретизация, а ступенчатый вид исходного параметра с изменением значений на очень коротких временных интервалах дискретизации (среднее значение около 0.05 с) предопределяет оценку реактивности в виде набора отрицательных выбросов, вносящих существенную погрешность в определение $\rho_{\text{взв}}$ [6, 7].

Известно, что при погружении стержней АР кривые мощности и реактивности на участке погружения стержней АР носят гладкий монотонный характер (рис. 1). Отсюда ясно, что прежде, чем подвергать информацию по мощности обработке в соответствии с алгоритмом точечной кинетики [8, 9] необходимо избавиться от ступенчатого вида записи сигнала мощности. Иными словами, необходимо аппроксимировать исходную ступенчатую зависимость какой-либо функцией, достаточно близкой к исходной, при этом функция должна иметь четкий минимум производной.

В качестве модели аппроксимации исходной ступенчатой зависимости по критерию минимума среднеквадратичного отклонения аппроксимирующей функции от зарегистрированных данных был выбран сглаживающий сплайн [10–12].

Сглаживающий кубический сплайн – гладкая функция $s(t)$, которая представляет собой на каждом интервале $[t_i; t_{i+1})$ кубический многочлен вида:

$$s_i(t) = a_i(t-t_i)^3 + b_i(t-t_i)^2 + c_i(t-t_i) + d_i. \quad (4)$$

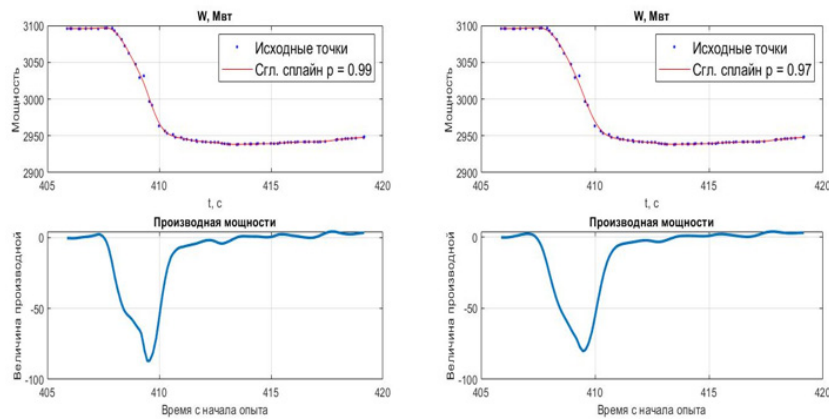


Рис. 3. Вид функций нейтронной мощности и производной от мощности при сглаживающем параметре $p = 0,99$ (слева) и $p = 0,97$ (справа)

Fig. 3. Type of functions of neutron power and derivative of power with a smoothing parameter $p = 0.99$ (left) and $p = 0.97$ (right)

Коэффициенты многочленов a_i, b_i, c_i, d_i находятся из условия минимума функционала:

$$p \sum_i (y_i - s_i(t))^2 + (1-p) \int \frac{d^2s}{dt^2} * dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

где p – параметр сглаживания, y_i – среднее значение сглаживаемой величины на рассматриваемом интервале.

Функционал $\sum_i (y_i - s_i(t))^2$ является взвешенной невязкой экспериментальных данных и сплайна, а величина $\int \frac{d^2s}{dt^2} * dt$ определяет гладкость искомого сплайна.

При минимизации функционала, заданного в (5), получается решение, приближенно удовлетворяющее двум противоречащим требованиям:

- максимальной гладкости
- минимальной невязке сплайна и экспериментальных данных.

Соотношение между этими требованиями определяет сглаживающий параметр p , изменяющийся от 0 до 1. При $p = 1$ информация о гладкости кривой не учитывается, и аппроксимирующая кривая представляет собой интерполяционный кубический сплайн. При уменьшении p гладкость кривой возрастает, но начинает увеличиваться невязка сплайна и экспериментальных данных.

Параметр p следует выбирать максимально близким к 1 среди его значений, обеспечивающих гладкость и четко выраженный минимум производной аппроксимируемой функции мощности.

Варьируя сглаживающий параметр, начиная со значений близких к 1, можно получить, что уже при $p = 0,97$ производная от мощности визуально соответствует характерному виду функции реактивности в опыте по взвизанию стержней АР (рис. 3).

Итоговую оценку ПКР, полученную при аппроксимации сглаживающим кубическим сплайном параметров мощность и положение стержней АР из файла с высокой частотой регистрации, будем считать эталонной.

В работе рассмотрены 3 модели обработки опыта по взвизиванию:

- классический вариант обработки измерений, такт регистрации ТП – 500 мс (рис. 4);

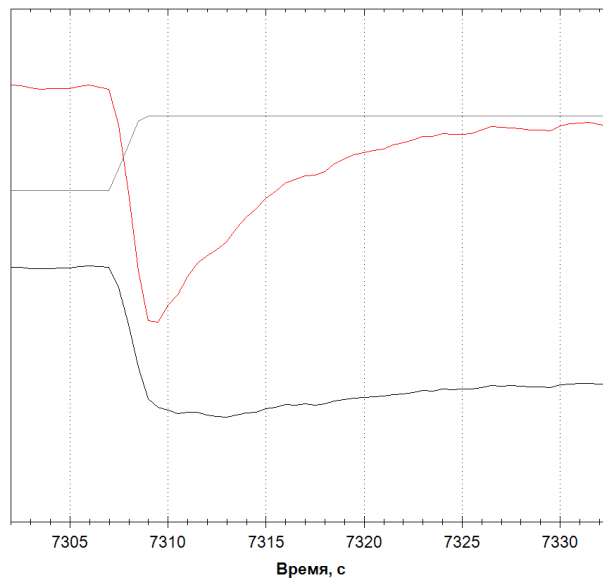


Рис. 4. Характерный вид кривых мощности (чёрный), реактивности (красный) и положение стержней (серый) при обработке опыта по взвешиванию по классическому варианту

Fig. 4. Typical appearance of the curves of power (black), reactivity (red) and position of the rods (gray) when processing the experiment to determine the effectiveness of automatic regulation rods according to the classical version

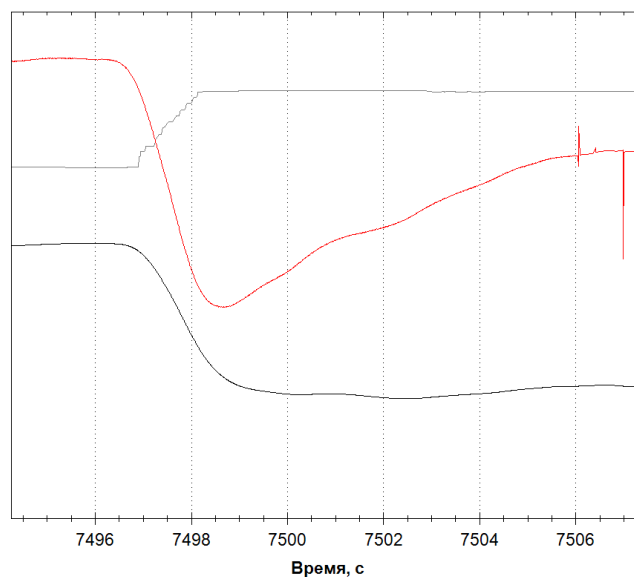


Рис. 5. Характерный вид кривых мощности (чёрный), реактивности (красный) и положение стержней (серый) при обработке опыта по взвешиванию по эталонному варианту

Fig. 5. Typical appearance of the curves of power (black), reactivity (red) and position of the rods (gray) when processing the experiment to determine the effectiveness of the automatic regulation rod according to the reference version

— эталонный вариант обработки измерений. Для обработки измерений ПКР используется файл с тактом 500 мс, но с параметрами мощность и положение стержней из файла с высокой частотой регистрации ТП (аппроксимация сглаживающим сплайном). Характерный вид кривых мощности, реактивности и положения стержней при использовании этого варианта представлен на рис. 5;

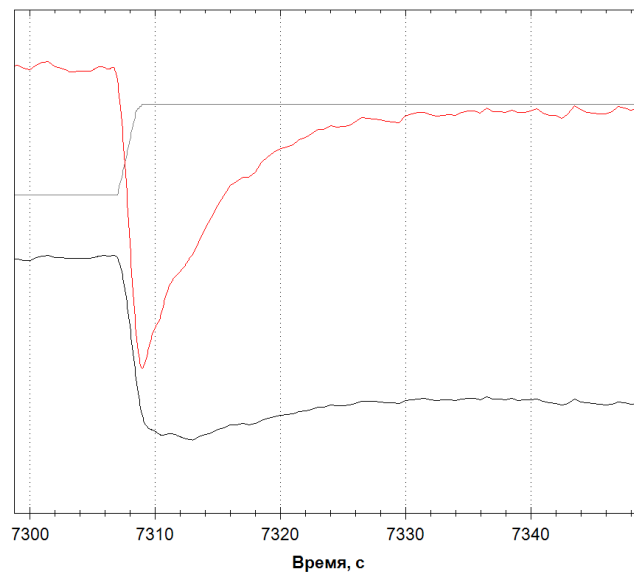


Рис. 6. Характерный вид кривых мощности (чёрный), реактивности (красный) и положение стержней (серый) при обработке опыта по взвешиванию с помощью файла с тактом 500 мс (параметр мощность аппроксимирован)

Fig. 6. Typical appearance of the curves of power (black), reactivity (red) and position of the rods (gray) when processing the experiment to determine the effectiveness of the automatic regulation rod using a file with a clock cycle of 500 ms (the power parameter is approximated)

— для обработки измерений ПКР используется файл с тактом 500 мс, но в опыте по взвешиванию участка стержней АР параметр мощность аппроксимирован сглаживающим сплайном (рис. 6);

Результаты исследования

При использовании для аппроксимации исходных данных сглаживающего сплайна (при разной частоте записи в файл (γ) аппроксимированной функции) для обработки опыта по определению $\rho_{\text{взв}}$ и БМКР было проведено сравнение оценок $\rho_{\text{взв}}$ на основе исходных данных из файлов с высокой и низкой (2 Гц) частотой регистрации ТП на представительном наборе измерений ПКР на реакторах Курской АЭС, Ленинградской и Смоленской АЭС. Для файла с тактом регистрации 500 мс использовались данные по мощности как со сглаживанием, так и без сглаживания. Результаты сравнения содержатся в табл. 1–3. Также в таблицах представлены отклонения оценок $\rho_{\text{взв}}$ и ПКР в различных вариантах обработки опыта по определению эффективности стержней АР от классического варианта обработки (такт 500 мс).

Близость оценок ПКР в случае аппроксимации ступенчатой функции мощности из файла с высокой частотой записи ТП (табл. 2) с различной γ дополнительно свидетельствует о корректном выборе модели аппроксимации [13, 14]. При этом очевидно, что чем выше частота записи аппроксимирующей функции в файл, тем точнее модель.

В сравнении оценок «веса» участка стержней АР и величины ПКР при использовании эталонной модели («Сгл. FULL, $\gamma = 100$ Гц» табл. 1) и классической («RGG» табл. 1) не было обнаружено существенных отличий между оцениваемыми параметрами, что свидетельствует о достаточности записи ТП с тактом 500 мс. Исходя из этого, можно сделать вывод об отсутствии необходимости в использовании файла с детальным поведением параметров «мощность» и «положение стержней» при обработке результатов измерений парового коэффициента реактивности как в опыте по взвешиванию участка стержней АР, так и в опытах с возмущением РПВ, ведь даже при определении эффективности АР (кратковременный скачкообразный процесс изменения мощности

Таблица 1

Результаты оценок веса участка ст. АР и ПКР на Курской АЭС

Table 1

Results of assessments of the efficiency of the automatic regulation rod and the void reactivity coefficient at the Kursk nuclear power plant

АЭС, блок	Вариант	$\rho_{взв}, \beta$	ПКР, β	Отклонение $\rho_{взв}, \%$	Отклонение ПКР, %
Курская, 4	RGG-файл	-0,04295	0,788 ± 0,09	—	—
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,04273	0,784 ± 0,09	+0,51	-0,51
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,04246	0,782 ± 0,08	+1,15	-0,76
	Сгл. FULL, $\gamma = 100$ Гц	-0,04230	0,783 ± 0,09	+1,51	-0,63
	Сгл. FULL, $\gamma = 20$ Гц	-0,04289	0,786 ± 0,09	+0,13	-0,25
	Сгл. FULL, $\gamma = 2$ Гц	-0,04294	0,787 ± 0,09	+0,02	-0,13
Курская, 3	RGG-файл	-0,02726	0,494 ± 0,11	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,02757	0,498 ± 0,11	-1,13	+0,81
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,02747	0,496 ± 0,11	-0,77	+0,40
	Сгл. FULL, $\gamma = 100$ Гц	-0,02788	0,490 ± 0,15	-2,27	-0,81
	Сгл. FULL, $\gamma = 20$ Гц	-0,02807	0,493 ± 0,15	-2,86	-0,20
	Сгл. FULL, $\gamma = 2$ Гц	-0,02816	0,495 ± 0,15	-3,30	-0,20

Примечание: γ – частота записи в файл аппроксимирующей функции, FULL – файл с высокой частотой регистрации ТП, RGG – файл с тактом записи ТП 500 мс

Таблица 2

Результаты оценок веса участка ст. АР и ПКР на Ленинградской АЭС

Table 2

Results of assessments of the efficiency of the automatic regulation rod and the void reactivity coefficient at the Leningrad nuclear power plant

АЭС, блок	Вариант	$\rho_{взв}, \beta$	ПКР, β	Отклонение $\rho_{взв}, \%$	Отклонение ПКР, %
ЛАЭС, 3	RGG-файл	-0,05378	0,561 ± 0,13	—	2014
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,05402	0,564 ± 0,13	-0,45	+0,53
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,05408	0,564 ± 0,13	-0,56	+0,53
ЛАЭС, 4	RGG-файл	-0,03969	0,815 ± 0,08	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,04006	0,823 ± 0,08	-0,93	+1,0
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,04034	0,830 ± 0,08	-1,64	+1,8

Примечание: γ – частота записи в файл аппроксимирующей функции, RGG – файл с тактом записи ТП 500 мс

(рис. 1), для описания которого требуется минимальный такт регистрации технологических параметров) наблюдается близость оценок ПКР при использовании классического и эталонного вариантов обработки опыта по взвешиванию. Максимальная разность оценок ПКР при

Таблица 3

Результаты оценок веса участка ст. участка ст. АР и ПКР на Смоленской АЭС

Table 3

Results of assessments of the efficiency of the automatic regulation rod and the void reactivity coefficient at the Smolensk nuclear power plant

АЭС, блок	Вариант	$\rho_{взв}, \beta$	ПКР, β	Отклонение $\rho_{взв}, \%$	Отклонение ПКР, %
САЭС, 1	RGG-файл	-0,01931	$0,634 \pm 0,12$	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,01974	$0,647 \pm 0,12$	-2,22	+2,05
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,01969	$0,646 \pm 0,12$	-1,97	+1,89
САЭС, 2	RGG-файл	-0,03785	$0,635 \pm 0,08$	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,03795	$0,635 \pm 0,08$	-0,26	0
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,03790	$0,635 \pm 0,08$	-0,13	0
САЭС, 3	RGG-файл	-0,03756	$0,475 \pm 0,07$	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,03771	$0,477 \pm 0,07$	-0,40	+0,42
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,03771	$0,477 \pm 0,07$	-0,40	+0,42

Примечание: γ – частота записи в файл аппроксимирующей функции, RGG – файл с тактом записи ТП 500 мс

использовании классического и эталонного вариантов не превышает $\pm 0,005 \beta_{эф}$, что на порядок ниже инструментальной составляющей погрешности измерения ПКР [15], представленной в Методике.

Сравнение результатов цифровой обработки идеализированного (файл с тактом регистрации 500 мс, параметр мощность аппроксимирован) и реального (файл с тактом регистрации 500 мс) электрических сигналов позволяет сделать вывод об инструментальной составляющей погрешности оценки веса участка стержней АР ($\rho_{взв}$) при выполнении опытов по измерению БМКР и ПКР. Согласно приведенным данным (табл. 1–3), различие результатов цифровой обработки идеализированного и реального электрических сигналов составляет $\sim 1,1\%$. Характер различий имеет вид нормального распределения с математическим ожиданием $\sim -0,5\%$ и случайной составляющей характеризующейся СКО $\sim 1,0\%$.

Величину инструментальной погрешности измерений малых значений реактивности (доли $\beta_{эф}$) при определении $\rho_{взв}$ на энергетическом уровне мощности можно оценить примерно в 1,0 %.

Кроме того, ввиду близости оценок $\rho_{взв}$ и ПКР (см. табл. 1–3) для реального и идеализированного сигналов (среднее отклонение ПКР $-0,76\%$, среднее отклонение $\rho_{взв} - 0,84\%$), можно сделать вывод об отсутствии необходимости аппроксимации параметра “мощность” в исходном файле с частотой регистрации 2 Гц.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) Такт дискретизации в 500 мс, соответствующий частоте в 2 герца, является достаточным для однозначного дискретного представления всех технологических параметров реактора и их последующей корректной обработки. Разница в оценках ПКР с использованием эталонного и классического вариантов обработки не превышает $\pm 0,005 \beta_{эф}$.

2) Инструментальная погрешность оценки веса участка стержней АР на основании сравнения исходного (файл с частотой регистрации ТП, равной 2 Гц) и идеализированного (файл с тактом регистрации 500 мс, параметр мощность аппроксимирован) сигналов составляет 1%.

3) На основании близости оценок ПКР и $\rho_{\text{взв}}$ показано, что нет необходимости в дополнительной аппроксимации параметра мощность из исходного файла с частотой регистрации ТП 2 Гц.

Таким образом, проблемы неопределенностей использования при обработке измерений ПКР (включая оценку веса участка стержней АР) данных, зарегистрированных с различной частотой, достаточно просто решаются регламентацией приемов обработки. В связи с этим в обновленном варианте Методики предлагается использовать только файл с тактом регистрации ТП 500 мс для расчётной обработки результатов измерений парового коэффициента реактивности [15].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Алимов Ю.В. и др.** НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РБМК // Атомная энергия. – 2017. – Т. 123. – № 5. – С. 266–269.

[2] **Асмолов В.Г.** Обеспечение безопасности и повышение эффективности атомной энергетики России // Тезисы докладов девятой Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – 2014. – С. 4. Драгунов Ю.Г. и др. Модернизация и продление сроков эксплуатации энергоблоков с РБМК // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 1. – С. 6–13.

[3] **Балыгин А.А., Краюшкин А.В.** Изменение реактивности и мощности РБМК при измерении парового коэффициента реактивности // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – № 3. – С. 171–172.

[4] **Качур С.А., Бутович Э.В., Зозулин А.А.** Определение влияния стержней регулирования на форму энерговыделения активной зоны реактора на основе статистических методов // Энергетические установки и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 31–37.

[5] **Camley R.E. et al.** High-frequency signal processing using magnetic layered structures // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2009. – Т. 321. – № 14. – С. 2048–2054.

[6] **Reigosa D. et al.** SPMSMs sensorless torque estimation using high-frequency signal injection // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Т. 56. – № 3. – С. 2700–2708.

[7] **Житарев В.Е. и др.** Поправка к результатам измерения реактивности методом ОРУК // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2019. – № 3. – С. 4–12.

[8] **Абрамов Б.Д.** О методе ОРУК определения реактивности // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2004. – № 3. – С. 19–31.

[9] **Воскобойников Ю.Е., Боева В.А.** Метод L-кривой для оценивания оптимального параметра сглаживающего кубического сплайна // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 11–1 (113). – С. 6–13.

[10] **Лавров А.В., Сизиков В.С.** Способ разделения большого числа линий зашумленного непрерывного спектра с использованием сглаживающих сплайнов // Уравнения типа свертки в науке и технологиях (ECTST–2019). – 2019. – С. 39–40.

[11] **Репина Е.Ю. и др.** К вопросу оптимизации параметров сглаживающего сплайна // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 3-7 декабря 2018 г., г. Томск.—Томск, 2019. – 2019. – С. 116–117.

[12] **Тимофеев А.Л., Сулганов А.Х.** Влияние шума и частоты дискретизации на погрешность дискретного представления изображений // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 5 (114). – С. 33–39.

[13] **Wang L., Lowther D. A.** Selection of approximation models for electromagnetic device optimization // IEEE Transactions on Magnetics. – 2006. – Т. 42. – № 4. – С. 1227–1230.

[14] **Hu Y., Schennach S.M.** Instrumental variable treatment of nonclassical measurement error models // Econometrica. – 2008. – Т. 76. – № 1. – С. 195–216.

[15] Молчанов А.С. Исследование характеристик линейного разрешения и разрешающей способности цифровых аэрофотосистем с использованием теоремы Котельникова-Найквиста-Шеннона // Инженерные решения. – 2019. – № 2. – С. 8–14.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПРОХОРОВ Игорь Александрович – инженер, АО "ВНИИАЭС", без степени.

E-mail: prokhorov.igor2202@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4965-6792>

ИВАНОВ Илья Евгеньевич – ведущий научный сотрудник, АО "ВНИИАЭС", канд. физ.-мат. наук.

E-mail: IEIvanov@vniiaes.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2780-4896>

МОИСЕЕВ Игорь Фёдорович – руководитель проекта, АО "ВНИИАЭС", канд. физ.-мат. наук.

E-mail: mif898@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6220-0177>

ДРУЖИНИН Владимир Евгеньевич – руководитель департамента, АО "ВНИИАЭС", канд. техн. наук.

E-mail: dve@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4029-7699>

REFERENCES

[1] Yu.V. Alimov i dr., NEYTRONNO-FIZICHESKIE KhARAKTERISTIKI I YaDERNAYa BEZOPASNOST RBMK // Atomnaya energiya. – 2017. – Т. 123. – № 5. – С. 266–269.

[2] V.G. Asmolov, Obespecheniye bezopasnosti i povysheniye effektivnosti atomnoy energetiki Rossii // Tezisy dokladov devyatoy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Bezopasnost, effektivnost i ekonomika atomnoy energetiki». – 2014. – С. 4. Dragunov Yu.G. i dr. Modernizatsiya i prodleniye srokov ekspluatatsii energoblokov s RBMK // Atomnaya energiya. – 2012. – Т. 113. – № 1. – С. 6–13.

[3] A.A. Balygin, A.V. Krayushkin, Izmeneniye reaktivnosti i moshchnosti RBMK pri izmerenii parovogo koeffitsiyenta reaktivnosti // Atomnaya energiya. – 2006. – Т. 100. – № 3. – С. 171–172.

[4] S.A. Kachur, E.V. Butovich, A.A. Zozulin, Opredeleniye vliyaniya sterzhney regulirovaniya na formu energovydeleniya aktivnoy zony reaktora na osnove statisticheskikh metodov // Energeticheskiye ustanovki i tekhnologii. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 31–37.

[5] R.E. Camley et al., High-frequency signal processing using magnetic layered structures // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2009. – Т. 321. – № 14. – С. 2048–2054.

[6] D. Reigosa et al., SPMSMs sensorless torque estimation using high-frequency signal injection // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Т. 56. – № 3. – С. 2700–2708.

[7] V.Ye. Zhitarev i dr., Popravka k rezultatam izmereniya reaktivnosti metodom ORUK // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov. – 2019. – № 3. – С. 4–12.

[8] B.D. Abramov, O metode ORUK opredeleniya reaktivnosti // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika. – 2004. – № 3. – С. 19–31.

[9] Yu.Ye. Voskoboynikov, V.A. Boyeva, Metod L-krivoy dlya otsenivaniya optimalnogo parametra sglazhivayushchego kubicheskogo splayna // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. – 2021. – №. 11-1 (113). – С. 6–13.

[10] **A.V. Lavrov, V.S. Sizikov**, Sposob razdeleniya bolshogo chisla liniy zashumlennogo nepreryvnogo spektra s ispolzovaniyem sglazhivayushchikh splaynov // Uravneniya tipa svertki v nauke i tekhnologiyakh (ECTST–2019). – 2019. – S. 39–40.

[11] **Ye.Yu. Repina i dr.**, K voprosu optimizatsii parametrov sglazhivayushchego splayna // Molodezh i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii: sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, 3-7 dekabrya 2018 g., g. Tomsk. – Tomsk, 2019. – 2019. – S. 116–117.

[12] **A.L. Timofeyev, A.Kh. Sultanov**, Vliyaniye shuma i chastoty diskretizatsii na pogreshnost diskretnogo predstavleniya izobrazheniy // Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy. – 2021. – № 5 (114). – S. 33–39.

[13] **L. Wang, D.A. Lowther**, Selection of approximation models for electromagnetic device optimization // IEEE Transactions on Magnetics. – 2006. – T. 42. – № 4. – S. 1227–1230.

[14] **Y. Hu, S.M. Schennach**, Instrumental variable treatment of nonclassical measurement error models // Econometrica. – 2008. – T. 76. – № 1. – S. 195–216.

[15] **A.S. Molchanov**, Issledovaniye kharakteristik lineynogo razresheniya i razreshayushchey sposobnosti tsifrovyykh aerofotosistem s ispolzovaniyem teoremy Kotelnikova-Naykvista-Shennona // Inzhenernyye resheniya. – 2019. – № 2. – S. 8–14.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Igor A. PROKHOROV – JSK "VNIIAES".

E-mail: prokhorov.igor2202@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4965-6792>

Илья Е. IVANOV – JSK "VNIIAES".

E-mail: IEIvanov@vniiAES.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2780-4896>

Igor F. MOISEEV – JSK "VNIIAES".

E-mail: mif898@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6220-0177>

Vladimir E. DRUZHININ – JSK "VNIIAES".

E-mail: dve@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4029-7699>

Поступила: 17.11.2023; Одобрена: 18.12.2023; Принята: 18.12.2023.

Submitted: 17.11.2023; Approved: 18.12.2023; Accepted: 18.12.2023.