



УДК 621.039.

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА РБМК-1000 НА ФИЗИЧЕСКОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ГРАДУИРОВКИ ДАТЧИКОВ

Прохоров И.А., ¹Гайдаенко В.Д.

ФГБОУ ВО "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ», Москва, Россия (111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 14, стр.1) e-mail: ¹gaydaenkovladislav@yandex.ru

Реактивность является важной характеристикой, определяющих безопасность реактора РБМК-1000. В связи с этим к контролю реактивности предъявляют высокие требования. Измерения реактивности на реакторе РБМК осуществляют на физических и энергетических уровнях мощности. В работе проводится оценка одной из составляющих неопределенности измерения реактивности на физическом уровне мощности, обусловленная неопределенностью градуировки датчиков.

Ключевые слова: РБМК-1000, реактивность, плотность потока нейтронов, датчики нейтронного потока.

THE UNCERTAINTY OF MEASURING THE REACTIVITY OF THE RBMK-1000 REACTOR AT THE PHYSICAL POWER LEVEL DUE TO THE UNCERTAINTY OF SENSOR CALIBRATION

Prokhorov I.A., ¹Gaidaenko V.D.

"NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY "MOSCOW POWER ENGINEERING INSTITUTE", Moscow, Russia (111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, bld.1) e-mail: ¹gaydaenkovladislav@yandex.ru

Reactivity is an important characteristic that determines the safety of the RBMK-1000 reactor. In this regard, high requirements are made on reactivity control. Reactivity measurements at the RBMK reactor are carried out at physical and energy power levels. The article considers one of the components of the reactivity assessment at the physical power level, due to the uncertainty of detector calibration.

Keywords: RBMK-1000, reactivity, neutron flux density, neutron flux detectors.

Введение

Реактор РБМК-1000 является канальным реактором с графитовым замедлителем и водяным кипящим теплоносителем. В качестве топлива используется диоксид урана UO_2 с добавкой оксида эрбия (Er_2O_3).

На момент написания работы в России эксплуатируется 7 реакторов РБМК на трёх атомных станциях: Ленинградской, Курской и Смоленской.

Безопасность и надежность эксплуатации реакторов РБМК-1000 в значительной степени определяется нейтронно-физическими характеристиками (НФХ).

НФХ реактора подлежат периодическому экспериментальному и расчетному контролю для подтверждения соответствия их значений пределам, установленным в проекте и паспорте РУ.

НФХ реактора РБМК-1000 могут быть рассчитаны по аттестованным в соответствии с в соответствии с Порядком [1] программам для ЭВМ.

Измерения НФХ реактора обеспечивают экспериментальный контроль и подтверждение расчетных оценок этих характеристик.

На основе измерений реактивности реактора РБМК вычисляются следующие НФХ:

- эффективность стержней быстрого снижения мощности (БСМ) (подкритичность реактора);
- эффективность стержней аварийной защиты (АЗ) в критическом и подкритическом состояниях реактора;
- эффективность стержней АЗ без одного наиболее эффективного стержня в критическом состоянии реактора (АЗ-1);
- эффективность отдельных стержней АЗ и БСМ;
- эффективность групп стержней БСМ;
- градуировочные (дифференциальные) характеристики стержней БСМ и АЗ.

Для измерений реактивности на физических уровнях мощности в качестве детекторов потока нейтронов используются 8-12 подвесок ионизационной камеры деления ПИК. Выбор места размещения датчиков ПИК в активной зоне реактора РБМК-1000 осуществляется расчётным путем при использовании аттестованных программных комплексов.

Выходные электрические сигналы тока (нейтронные токи) подвески передаются по внешним линиям связи пары свитых экранированных кабелей на входы измерительной и регистрирующей аппаратуры, преобразуются в цифровой вид и используются для вычисления реактивности по алгоритмам точечной кинетики [2].

Поскольку реактивность является важнейшей характеристикой состояния реакторной установки, на основании которой получают описанные ранее НФХ, к точности контроля этой величины предъявляют высокие требования. В данной работе будет оценена неопределенность, вносимая в оценку реактивности реактора РБМК-1000 на физическом уровне мощности, обусловленная неопределенностью градуировки датчиков.

Оценка неопределенности измерения реактивности, обусловленная неопределенностью градуировки датчиков

При измерении реактивности реактора на вход программы, вычисляющей реактивность на основании решения обращенного уравнения точечной кинетики, подается суммарный сигнал детекторов, который отражает поведение интегральной по объему реактора плотности потока нейтронов (ППН). Однако связь между токовым сигналом отдельного детектора и ППН в месте его расположения зависит от индивидуального коэффициента преобразования, определяющего «чувствительность» детектора.

Значение суммарного тока детекторов в упрощенном виде может быть представлено:

$$J_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n K_i * J_i, \quad (1)$$

где K_i – градуировочный коэффициент коррекции индивидуальной чувствительности детектора;

J_i – нейтронный ток, регистрируемый i -м детектором.

Для детекторов ПИК в описании типа средства измерения указана величина предела относительной погрешности коэффициента преобразования ППН в выходной сигнал

детектора $\pm 30\%$. Датчики ПИК поставляются на АЭС после проведения заводской калибровки на исследовательском реакторе, с указанием коэффициента относительной индивидуальной чувствительности (градуировки), использование которого снижает неопределенность показаний детекторов. Однако погрешность калибровки датчиков ПИК в паспортах изделий не указывается. Для снижения неопределенности показаний детекторов ПИК предусмотрена их градуировка на остановленном реакторе перед выполнением измерений реактивности на физических уровнях мощности.

Консервативно, повышением точности оценки реактивности вследствие использования индивидуальных для каждого датчика градуировочных коэффициентов можно пренебречь.

Для набора датчиков ПИК, применяемого для выполнения измерений реактивности на физическом уровне мощности, характер распределения коэффициентов K_i не подтвержден. В этом случае согласно [3] принято считать, что распределение случайных величин носит равномерный характер, т.е. значения коэффициентов K_i распределены равномерно в диапазоне 0,7—1,3.

Оценку неопределенности измерений реактивности, обусловленную неопределенностью коэффициентов калибровки ПИК, можно получить из сравнения результатов расчета реактивности по интегральному току всех датчиков ПИК (соотношение (1)), выполненных при случайном розыгрыше значений K_i при их равномерном распределении в диапазоне 0,7—1,3 (Рисунок 1) и результатов расчетов реактивности без учета этих коэффициентов (т.е. при $K_i \equiv 1,0$) для представительного набора измерений реактивности.

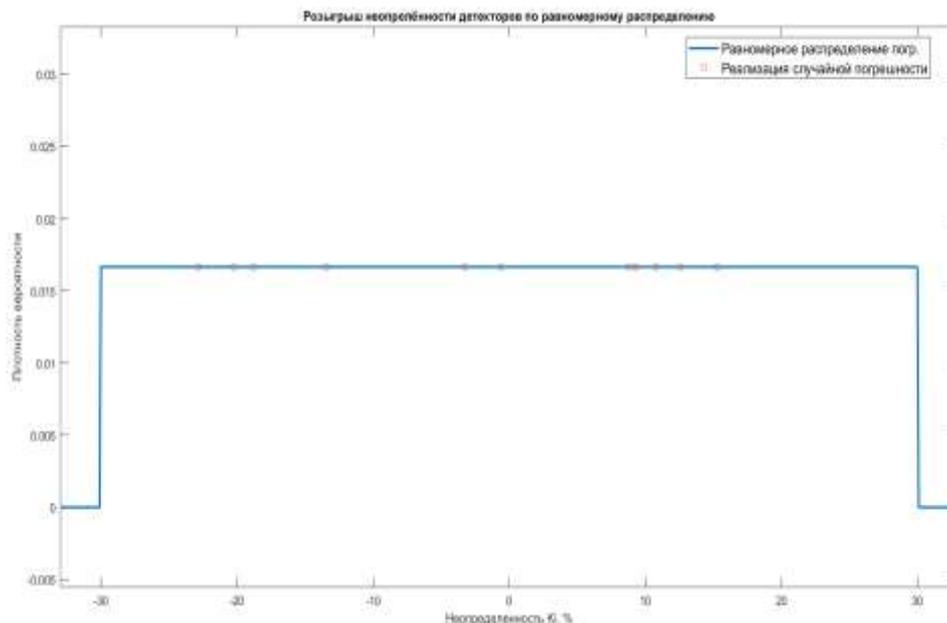


Рисунок 1 – Пример случайного розыгрыша коэффициентов K_i при равномерном распределении

Среднеквадратичное отклонение (СКО) результатов вычисления реактивности при розыгрыше коэффициентов градуировки от опорных значений ($K_i \equiv 1$) было рассчитано из соотношения:

$$СКО = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \rho_{on})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где ρ_i – реактивность, рассчитанная при розыгрыше неопределенности градуировочных коэффициентов (K_i) по равномерному распределению;

ρ_{on} – опорные значения реактивности;

$i = 1 \dots n$ – количество розыгрышей.

Результаты оценки неопределенности реактивности приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение результатов вычисления реактивности при случайном розыгрыше значений K_i и при $K_i \equiv 1$.

НФХ	Реактивность $\beta_{эф}$		СКО, %
	Диапазон значений при случайном разбросе значений K_i	При $K_i \equiv 1$	
Эффективность БСМ	5,95 - 6,14	6,06	1,03
Эффективность БСМ	6,01 - 6,20	6,12	1,12
Эффективность АЗ-1	2,06 - 2,14	2,11	1,25
Эффективность БСМ	6,14 - 6,22	6,20	0,49
Эффективность БСМ	6,46 - 6,53	6,50	0,56
Эффективность БСМ	6,17 - 6,27	6,23	0,56
Эффективность БСМ	5,98 - 6,05	6,0	0,46
Эффективность АЗ-1	2,24 - 2,29	2,27	0,72

Примечание: Значение неопределенности для каждого датчика разыгрывались 7-15 раз

По данным таблицы 1 неопределенность вычисления реактивности, обусловленная неопределенностью градуировочных коэффициентов детекторов, характеризуется значением СКО, не превышающим 1,25 %.

Заключение

Таким образом, неопределенность измерения реактивности реактора РБМК-1000 на физическом уровне мощности, обусловленная неопределенностью градуировки датчиков составляет 1,25 %.

Полученная оценка неопределенности является консервативной по следующим причинам:

- повышение точности градуировочных коэффициентов при их калибровке на исследовательском реакторе не учитывалось;
- градуировочные коэффициенты разыграны по равномерному распределению.

Оцененная в работе неопределенность измерения реактивности на физическом уровне мощности, несмотря на свою консервативность, мала по сравнению с инструментальной неопределенностью вычисления реактивности, представленному в свидетельстве [4].

Список литературы

1. Об утверждении Порядка проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии: Приказ Ростехнадзора от 04.04.2023 № 141// СПС «КонсультантПлюс» (дата обращения: 01.03.2024).
2. Абрамов Б. Д. О методе ОРУК определения реактивности //Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2004. – №. 3. – С. 19-31
3. ГОСТ 34100.3-2017 Неопределенность измерения, часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения
4. Каналы системы контроля подкритичности широкодиапазонные ШК СКП-К// ALL-Pribors.ru: [сайт].– URL: <https://all-pribors.ru/> (дата обращения: 14.03.2024).

References

1. On Approval of the Procedure for the Examination of programs for electronic computers used to Build computational models of processes Affecting the Safety of Nuclear Energy Facilities and (or) Activities in the Field of Atomic Energy Use: Rostekhnadzor Order No. 141 dated 04.04.2023// SPS "ConsultantPlus" (date of application: 03/01/2024).
 2. Abramov B. D. On the ORC method for determining reactivity //News of higher educational institutions. Nuclear power engineering. - 2004. – No. 3. – pp. 19-31
 3. GOST 34100.3-2017 Measurement uncertainty, Part 3. Guidelines for expressing measurement uncertainty
 4. Channels of the subcritical control system wide-range SHK UPC-K// ALL-Pribors.ru : [website].– URL: <https://all-pribors.ru/> (date of access: 03/14/2024).
-