

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРИЗОННОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ В СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

А. М. Панкин¹, А. А. Калютик², В. С. Костарев³

^{1,2,3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
¹alpank@niti.ru, ²Kalyutik@yandex.ru, ³slavakostarev@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Надежная работа внутризонных детекторов нейтронов позволяет повысить качество обработки измерительной информации в целях построения полей распределения нейтронов и энерговыделения по объему активной зоны ядерного реактора. *Материалы и методы.* Рассмотрен новый метод контроля технического состояния датчика прямого заряда (ДПЗ), используемого для измерения нейтронного потока в активной зоне ядерного реактора. Метод основан на измерении токовых величин в статических и динамических режимах работы измерительной цепи датчика. Для контроля состояния данного детектора нейтронов предлагается определять не только сопротивление изоляции измерительного кабеля, как это выполняется в традиционных методах, но и генерирующую способность эмиттера датчика. В дополнение к указанным диагностическим параметрам в данной работе введен новый диагностический признак контролируемого объекта в виде емкости измерительной цепи. *Результаты и выводы.* Определение генерирующей способности эмиттера ДПЗ позволяет существенно (на 3–4 порядка) расширить рабочий диапазон датчика по допустимой величине сопротивления изоляции (менее 10^6 Ом). При этом мы получаем новый способ оценки степени выгорания эмиттера электронов под воздействием нейтронного потока и контролируем техническое состояние датчика по величине его чувствительности к этому потоку, что повышает надежность используемого ДПЗ. Определение величины емкости измерительного кабеля электрической цепи датчика позволяет корректно учитывать эту величину при измерениях токового сигнала активационного датчика в целях нахождения нейтронного потока ядерного реактора в переходных режимах его работы.

Ключевые слова: датчик, контроль, ядерный реактор, нейтронный поток, система диагностирования, диагностический признак, электрическая цепь

Для цитирования: Панкин А. М., Калютик А. А., Костарев В. С. Контроль технического состояния внутризонного детектора нейтронов в статических и динамических режимах работы ядерного реактора // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 118–125. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-14

IN-CORE NEUTRON DETECTOR MONITORING UNDER STEADY AND DYNAMIC REACTOR CONDITIONS

A.M. Pankin¹, A.A. Kalyutik², V.S. Kostarev³

^{1,2,3} Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
¹alpank@niti.ru, ²Kalyutik@yandex.ru, ³slavakostarev@yandex.ru

Abstract. *Background.* Reliable operation of in-core neutron detectors improves the quality of measurement data processing and make fields of the neutron and power distributions in the nuclear reactor core more efficient. *Materials and methods.* The article discusses a new method for monitoring the technical condition of self-powered neutron detector (SPND) that is used to measure neutron flux in the nuclear reactor core. The method is based on the measurement of current values of the detector measuring circuit under steady and dynamic conditions. To monitor the state of this neutron detector, it is proposed to determine not only the insulation resistance of the measuring cable, as it is done in traditional methods, but also the generating capacity of the detector emitter. In addition to the given diagnostic parameters, a new diagnostic feature of the controlled object – capacitance of the measuring circuit of the reactor – has been introduced in this article. *Results and conclusions.* Determination of the generating capacity of SPND emitter significantly (by 3–4 orders of magnitude) extends the operating range of the detector by the permissible insulation resistance value (less than 10^6 Ohms). At the same time, we obtain a new method to estimate the degree of electron emitter burnup caused by neutron flux and to monitor the technical condition of detector by the magnitude of its sensitivity to this flux, which increases the reliability of SPND. Determining the capacitance of the measuring cable of the electrical circuit allows you to properly consider this value when measuring the current signal of the activation detector in order to find the reactor neutron flux under the transient modes of operation.

Keywords: detector, monitoring, nuclear reactor, neutron flux, diagnostic system, diagnostic feature, electrical circuit

For citation: Pankin A.M., Kalyutik A.A., Kostarev V.S. In-core neutron detector monitoring under steady and dynamic reactor conditions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):118–125. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-14

Введение

Датчик прямого заряда (ДПЗ) представляет детектор нейтронов, находящийся внутри активной зоны ядерного реактора.

Контроль технического состояния ДПЗ традиционным способом выполняется на основе измерения сопротивления изоляции измерительного кабеля. При уменьшении величины этого сопротивления происходит возрастание тока утечки, как следствие – уменьшение измеряемого тока на выходе измерительной цепи датчика, по величине которого и находится нейтронный поток в месте расположения ДПЗ в активной зоне ядерного реактора, для чего датчик и предназначен.

Сопротивление изоляции измерительного кабеля может определяться разными способами. Одним из них является метод, когда сопротивление тока утечки устанавливается с помощью измерительной схемы с дополнительным источником напряжения с величиной ЭДС ~ 100 мВ. Напомним, что принцип работы самого ДПЗ позволяет рассматривать его в качестве источника электрического тока короткого замыкания [1].

Для определения сопротивления, через которое проходит ток утечки, в известном методе рассматриваются два режима работы измерительной цепи [2].

В качестве недостатка такого способа следует считать отсутствие информации о техническом состоянии основного элемента ДПЗ – эмиттера датчика, который теряет свою генерирующую способность по мере выгорания входящих в него ядер элементов – источников β – частиц (электронов). Это происходит при облучении ядер эмиттера нейтронным потоком в активной зоне ядерного реактора. Следствием этого является уменьшение выходного сигнала детектора в условиях одинакового нейтронного потока. Отметим, что для определения величины этого нейтронного потока и создавался данный детектор. Однако при измерении выходного тока датчика на основе рассматриваемого метода [2] непонятно, за счет изменения каких параметров измерительной цепи датчика происходит уменьшение выходного сигнала: либо за счет уменьшения генерирующей способности эмиттера (уменьшения его чувствительности), либо за счет уменьшения сопротивления изоляции измерительного кабеля, вследствие чего происходит возрастание тока утечки.

Статические режимы контроля работоспособности ДПЗ

Для определения генерирующей способности эмиттера ДПЗ в работе [3] был представлен один из возможных способов. В этом способе в двух статических режимах работы измерительной цепи датчика получается измерительная информация, на основе которой выполняется идентификация двух диагностических признаков электрической цепи ДПЗ: мощности источника электрического тока и проводимости изоляции измерительного кабеля датчика, формирующей ток утечки.

Для этого используется измерительная схема, представленная на рис. 1.

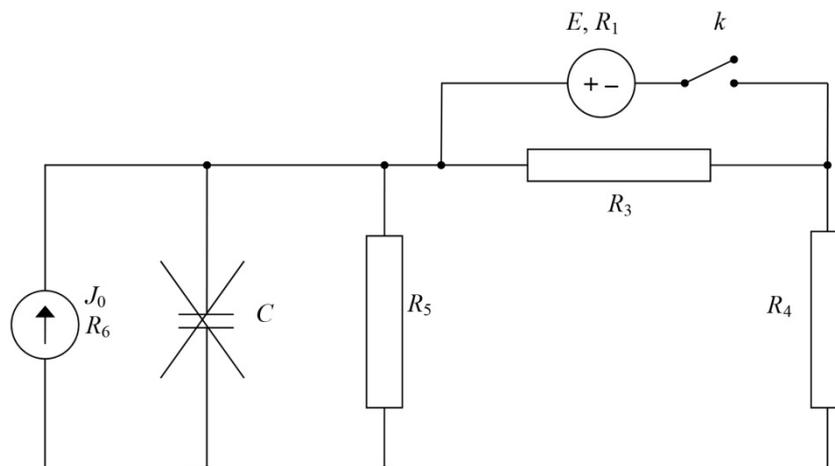


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения измерительной цепи ДПЗ

В рабочем режиме работы ДПЗ не используется дополнительно включаемый источник напряжения. Он нужен только для выполнения диагностирования состояния датчика. В этом случае рассматриваются следующие элементы измерительной цепи: ДПЗ в виде источника тока с параметрами $J_0, R_6; C$ – емкость кабеля измерительной цепи; R_3 – резистор, необходимый для обеспечения диагностического режима работы; R_4 – нагрузочное сопротивление, через которое протекает измеряемый ток датчика; R_5 – сопротивление изоляции кабеля измерительного канала; R_6 – внутреннее сопротивление датчика; J_0 – ток датчика на внутреннем участке цепи, обусловленный основными носителями заряда (β -частицы).

Нумерация ветвей схемы измерительной цепи представлена в соответствии с принятым в теоретической электротехнике [4] подходом в предположении, что в дальнейшем в схеме будет введен еще один элемент в виде емкости кабеля измерительной цепи C (динамический режим), который в статических режимах не рассматривается. В статических режимах эта величина представляется как разрыв электрической цепи, что и показано на рис. 1.

На основе законов Кирхгофа и уравнений элементов цепи для 1-го статического режима (рабочего) может быть записана система алгебраических уравнений (1). Эта система используется для определения расчетным путем тока i_4 , который протекает через нагрузочное сопротивление R_4 и может быть измерен в процессе диагностирования:

$$\begin{cases} i_3 + i_5 - i_6 = 0; \\ i_4 + i_5 - i_6 = 0; \\ -u_3 - u_4 + u_5 = 0; \\ u_3 + u_4 + u_6 = 0; \end{cases} \begin{cases} u_3 = R_3 i_3; \\ u_4 = R_4 i_4; \\ u_5 = R_5 i_5; \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6. \end{cases} \quad (1)$$

Используются обозначения:

$$G_3 = 1/R_3; G_4 = 1/R_4; G_5 = 1/R_5; G_6 = 1/R_6; G = G_5 + G_6.$$

После решения системы (1) выражение для измеряемого тока может быть представлено в виде

$$i_4 = G_4 u_4 = \frac{G_3 G_4 J_0}{G_3 G_4 + (G_3 + G_4) G}. \quad (2)$$

Обозначим измеряемый в этом статическом режиме ток как I_1 , т.е. $I_1 = i_4$.

Для создания еще одного статического режима (диагностического) в цепь включается дополнительный источник напряжения.

В соответствии со схемой в цепь датчика в какой-то момент времени путем замыкания ключа k включается источник напряжения, имеющий ЭДС, равную E и внутреннее сопротивление $r_0 = R_1$.

После завершения переходного процесса, обусловленного наличием в цепи датчика реактивных элементов (паразитные емкости кабеля и, возможно, других дополнительных элементов цепи), в электрической цепи диагностического режима установится стационарный (статический) режим. При этом через нагрузочное сопротивление R_4 потечет электрический ток i_4 , имеющий значение, отличное от того, которое было получено для случая схемы основного режима датчика. Это значение так же, как и в основном режиме, должно быть измерено.

Для новой цепи системы алгебраических уравнений, аналогичные ранее представленным в виде (1), запишутся в виде

$$\begin{cases} i_1 - i_3 - i_5 + i_6 = 0; \\ i_4 + i_5 - i_6 = 0; \\ u_1 + u_3 = 0; \\ u_1 - u_4 + u_5 = 0; \\ -u_1 + u_4 + u_6 = 0; \end{cases} \begin{cases} u_1 = i_1 R_1 - E; \\ u_3 = R_3 i_3; \\ u_4 = R_4 i_4; \\ u_5 = R_5 i_5; \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6. \end{cases} \quad (3)$$

Так же, как и в случае системы (1), используем систему (3) для расчетного определения тока i_4 , который протекает через нагрузочное сопротивление R_4 и может быть измерен. Расчетное значение определяется по формуле

$$i_4 = G_4 u_4 = \frac{(G_1 + G_3)G_4 J_0 - G_1 G_4 G E}{(G_1 + G_3)G_4 + (G_1 + G_3 + G_4)G}. \quad (4)$$

При этом: $G_1 = 1/R_1$; $G_3 = 1/R_3$; $G_4 = 1/R_4$; $G_5 = 1/R_5$; $G_6 = 1/R_6$; $G = G_5 + G_6$.

Обозначим измеряемый во втором статическом режиме ток как I_2 , т.е. $I_2 = i_4$.

Решение системы двух совместных уравнений (2) и (4) относительно неизвестных величин J_0 и G , как это выполнено в работе [3], позволяет определить эти диагностические признаки на основе измерений, выполненных в рассмотренных статических режимах.

Контроль параметров измерительной цепи датчика в динамических режимах

Дополнительная диагностическая информация может быть получена в динамических режимах работы измерительной цепи контролируемого ДПЗ. В качестве динамического режима предлагается использовать переходный процесс в измерительной цепи датчика по схеме, представленной на рис. 2, который создается при включении источника ЭДС путем замыкания ключа k .

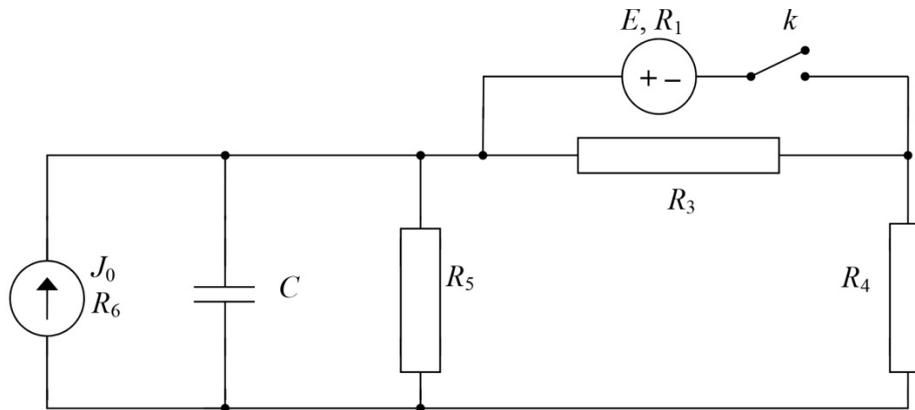


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения измерительной цепи датчика при использовании переходного процесса (динамический режим)

По измерительной информации, снимаемой с нагрузочного сопротивления R_4 в динамическом режиме, предлагается определять емкость кабеля измерительной цепи C . При недопустимом изменении этой величины в процессе работы ядерного реактора может иметь место пробой изоляции измерительного кабеля и потеря работоспособности данного детектора нейтронов.

Для определения величины C может быть записана система алгебраических и дифференциальных уравнений, полученная по аналогии с системами (1) и (3):

$$\begin{cases} i_1 - i_3 + i_4 = 0; \\ i_2 + i_4 + i_5 - i_6 = 0; \\ u_1 + u_3 = 0; \\ -u_1 - u_2 + u_4 = 0; \\ -u_2 + u_5 = 0; \\ u_2 + u_6 = 0; \end{cases} \begin{cases} u_1 = i_1 R_1 - E; \\ i_2 = C \frac{du_2}{dt}; \\ u_3 = R_3 i_3; \\ u_4 = R_4 i_4; \\ u_5 = R_5 i_5; \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6. \end{cases} \quad (5)$$

В эту систему входит измеряемая как функция от времени в переходном процессе величина тока $i_4 = i_4(t)$. Для нахождения величины C необходимо на основе системы (6) найти величины $u_2 = u_2(t)$ и $i_2 = i_2(t)$:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{G_3 G_4 J_0}{G_3 G_4 + (G_3 + G_4)G}; \\ I_2 = \frac{(G_1 + G_3)G_4 J_0 - G_1 G_4 G E}{(G_1 + G_3)G_4 + (G_1 + G_3 + G_4)G}. \end{cases} \quad (6)$$

Для этих величин были получены формулы:

$$\begin{aligned} u_2(t) &= i_4(t)(RR * R_1 + R_4) + E(1 - RR); \\ i_2(t) &= J_0 - i_4(t)(1 + (RR * R_1 + R_4)G) - E(1 - RR)G, \end{aligned} \quad (7)$$

где G – величина проводимости, равная $G = G_5 + G_6$, а величина RR находится по формуле $RR = R_1 / (R_1 + R_3)$. Остальные величины были определены выше. После этого величина емкости C находится по формуле $C = \frac{i_2}{du_2/dt}$, которая в случае проведения численных расчетов по результатам измерения тока i_4 в моменты времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, t_{n+1}$, т.е. получения зависимости $i_4 = i_4(t_i)$, записывается в виде выражения

$$C(t_i) = \frac{i_2(i+1) + i_2(i)}{2} \bigg/ \frac{u_2(i+1) - u_2(i)}{t(i+1) - t(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Таким образом, на основе знания измеренных значений токовых величин и некоторых параметров измерительной цепи датчика в статическом и динамическом режимах могут быть идентифицированы структурные параметры электрической цепи, отнесенные к разряду диагностических признаков ДПЗ.

Постановка диагноза о техническом состоянии датчика

После того, как получены численные значения диагностических признаков ДПЗ, задача диагностирования решается на основе допускового контроля. При этом полученные значения сравниваются с предельно допустимыми значениями, определенными конструктором данного изделия для области работоспособных состояний. Так, например, для случая источника тока величина тока, проходящего по цепи нагрузки, должна быть заметной на фоне токов, обусловленных источниками помех.

Для определения допустимых значений параметров измерительной цепи ДПЗ предлагается использование расчетов по совместной системы уравнений (1), (3), (5). При этом может быть снят ряд ограничений, введенных ранее в традиционных методах контроля ДПЗ [2].

В качестве примера можно рассматривать изменение допустимых ограничений по параметру G сопротивления изоляции измерительной цепи. Проведенные расчеты по указанным системам уравнений показывают, что прежнее ограничение по параметру G ($\sim 10^6$ Ом) можно существенно изменить в сторону допустимого уменьшения этой величины, что значительно расширяет область работоспособности датчика (\sim на 3–4 порядка).

Оставшееся ограничение для этого параметра будет связано лишь с требуемой точностью измерения величины полезного тока i_4 через нагрузочное сопротивление R_4 . Объясняется это тем, что основным контролируемым параметром является величина тока J_0 , генерируемого эмиттером ДПЗ, которая не зависит (в отличие от тока i_4) от параметров схемы линии связи.

На рис. 3 представлено отношение измеряемого тока i_4 к величине тока J_0 в зависимости от сопротивления для тока утечки $R = 1/G$. Две представленные на графике кривые относятся к двум статическим режимам измерительной цепи датчика: рабочему и диагностическому.

Определение нейтронного потока в активной зоне ядерного реактора

В данной статье предлагается метод, позволяющий расширить круг диагностических признаков технического объекта в виде измерительной цепи детектора, включающей, помимо отдельных элементов схемы, и его основную часть – эмиттер β -частиц. Основным диагностическим параметром детектора следует считать чувствительность датчика к потоку нейтронов в месте расположения датчика. Эту характеристику предлагается определять на основе вычисления генерирующей способности эмиттера J_0 по экспериментальным данным.

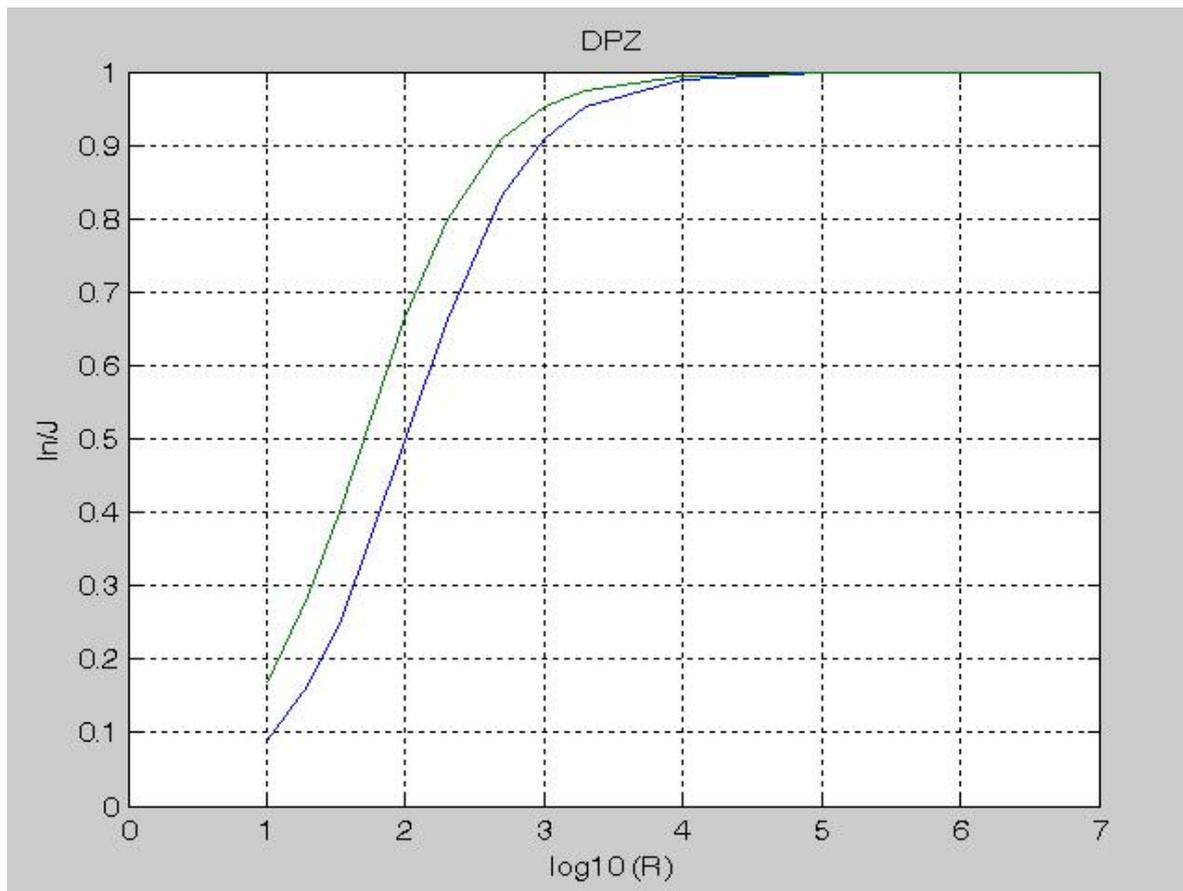


Рис. 3. Отношение измеряемого тока i_4 к величине тока J_0 в зависимости от сопротивления для тока утечки R

Для нахождения чувствительности детектора к нейтронному потоку необходимо после нахождения токового сигнала определить величину нейтронного потока, при котором этот сигнал был получен. Для этого в активной зоне ядерного реактора проводятся измерения с использованием активационных индикаторов, после обработки которых определяется абсолютное значение нейтронного потока вблизи датчика. При этом чувствительность датчика определяется по формуле $S = J_0 / \Phi$, где J_0 – ток эмиттера датчика; Φ – поток нейтронов в месте расположения датчика.

Известно, что измерения абсолютных значений физических величин представляют достаточно трудоемкие процедуры, поэтому в данном способе предполагается расчетно-экспериментальное определение относительных значений нейтронного потока в предположении, что для начала кампании реактора известно абсолютное значение нейтронного потока в месте расположения датчика, которое может быть определено по известной (номинальной) чувствительности датчика с невыгоревшим эмиттером в начале кампании активной зоны ядерного реактора [5].

При проведении повторных диагностических измерений в процессе кампании ядерного реактора с использованием расчетных программ находится относительное изменение величины потока нейтронов по сравнению с первоначальным значением. Таким образом, в процессе эксплуатации датчика контролируется изменение его чувствительности, а также выполняется оценка запаса работоспособности датчика при его приближении к предельному состоянию, после которого эксплуатация ДПЗ должна быть прекращена [6].

Заключение

Представленный алгоритм позволяет при диагностировании использовать более расширенный список диагностических параметров по сравнению с ранее представленными в работе [3].

Определение генерирующей способности эмиттера ДПЗ не только существенно расширяет область работоспособности датчика (на 3–4 порядка по допустимой величине сопротивления изоляции), но также позволяет перейти на принципиально иной метод определения степени выгорания эмиттера электронов под воздействием нейтронного потока. В результате этого контролируется

техническое состояние датчика по величине его чувствительности к этому потоку, что повышает надежность используемого ДПЗ [7].

Созданная в программной среде MATLAB расчетная программа может быть использована при контроле технического состояния нейтронных детекторов указанного типа в статических и динамических режимах работы ядерного реактора. На данный метод в 2022 г. был получен патент на изобретение РФ.

Список литературы

1. Мительман М. Г. [и др]. Детекторы для внутриреакторных измерений энерговыделения. М. : Атомиздат, 1997.
2. Патент 13281 РФ. Система контроля для обнаружения состояний датчика / Грибов А. А., Кирьянов А. А. № 99122231/20 ; заявл. 13.10.1999 ; опубл. 27.03.00.
3. Панкин А. М., Коровкин Н. В. Диагностические признаки при контроле технического состояния ДПЗ ядерного реактора // Атомная энергия. 2017. Т. 122, вып. 4. С. 235–238.
4. Башарин С. А., Федоров В. В. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля : учеб. пособие. М. : Академия, 2004. 304 с.
5. Михеев А. М., Семочкина И. Ю. Интеллектуальная геоинформационная система мониторинга и контроля состояний пространственно распределенных технически сложных объектов // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 3. С. 48–51.
6. Абрамов О. В. Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4. С. 51.
7. Маркелов В. В., Власов А. И., Зотьева Д. Е. Автоматизация методов входного статистического контроля при управлении качеством изделий электронной техники в среде MATLAB // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 3. С. 38–43.

References

1. Mitel'man M.G. et al. *Detektory dlya vnutrireaktornykh izmereniy energovydeleniya = Detectors for in-reactor measurements of energy release*. Moscow: Atomizdat, 1997. (In Russ.)
2. Patent 13281 Russian Federation. *Sistema kontrolya dlya obnaruzheniya sostoyaniy datchika = Control system for detecting sensor states*. Gribov A.A., Kir'yanov A.A. No. 99122231/20; appl. 13.10.1999; publ. 27.03.00. (In Russ.)
3. Pankin A.M., Korovkin N.V. Diagnostic signs when monitoring the technical condition of the DPZ of a nuclear reactor. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2017;122(4):235–238. (In Russ.)
4. Basharin S.A., Fedorov V.V. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Teoriya elektricheskikh tsepey i elektromagnitnogo polya: ucheb. posobie = Theoretical foundations of electrical engineering. Theory of electric circuits and electromagnetic field : textbook*. Moscow: Akademiya, 2004:304. (In Russ.)
5. Mikheev A.M., Semochkina I.Yu. Intelligent geoinformation system for monitoring and controlling the states of spatially distributed technically complex objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(3):48–51. (In Russ.)
6. Abramov O.V. Control and forecasting of the technical condition of systems of responsible purpose. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(4):51. (In Russ.)
7. Markelov V.V., Vlasov A.I., Zot'eva D.E. Automation of input statistical control methods for quality management of electronic equipment products in the MATLAB environment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(3):38–43. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Михайлович Панкин

доктор технических наук, доцент,
профессор Высшей школы атомной
и тепловой энергетики,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: alpank@niti.ru

Aleksandr M. Pankin

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of Higher School of Nuclear
and Thermal Power Engineering,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Александр Антонович Калютик

кандидат технических наук,
директор Высшей школы атомной
и тепловой энергетики,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: Kalyutik@yandex.ru

Вячеслав Сергеевич Костарев

аспирант,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: slavakostarev@yandex.ru

Aleksandr A. Kalyutik

Candidate of technical sciences,
director of the Higher School of Nuclear
and Thermal Power Engineering,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Vyacheslav S. Kostarev

Postgraduate student,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, Saint Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 21.02.2023

Принята к публикации/Accepted 17.02.2023