



## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКА ПРЯМОГО ЗАРЯДА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВЭР-1200 В СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Костарев В.С.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
slavakostarev@yandex.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В работе представлены предложения по оптимизации существующих методов контроля технического состояния датчиков прямого заряда (ДПЗ) системы внутриреакторного контроля (СВРК), применяемых, в частности, на ядерных реакторах ВВЭР-1200, позволяющие увеличить точность постановки диагноза о работоспособности либо неработоспособности таких датчиков. *ЦЕЛЬ.* Провести оценку используемых на текущий момент методов контроля и диагностики датчиков. Представить предложения по оптимизации контроля технического состояния ДПЗ путем увеличения объема диагностической информации. Описать разработанное программное обеспечение, позволяющее определять параметры измерительной цепи ДПЗ для постановки диагноза о техническом состоянии датчика. Представить результаты обработки показаний ДПЗ реактора ВВЭР-1200 Ленинградской АЭС с использованием разработанного программного обеспечения. *МЕТОДЫ.* При решении поставленных задач применялись положения и методы технической диагностики, а также теория электрических цепей и численные методы решения уравнений, реализованные в разработанном ПО при помощи MatLab. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, представлена методика оптимизации контроля технического состояния ДПЗ, основанная на расширении объема используемой диагностической информации. Описанная методика использована в качестве основы для создания специализированного ПО в среде MatLab. Разработанное ПО было использовано для определения сопротивления изоляции измерительной цепи ДПЗ ВВЭР-1200 Ленинградской АЭС. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Использование предложенного метода контроля технического состояния ДПЗ позволяет повысить надежность ДПЗ путем использования расширенного набора информации о техническом состоянии датчика. Результаты расчетов при помощи разработанного ПО на основе данных с ЛАЭС-2 показали, что диапазон работоспособности ДПЗ по сопротивлению изоляции может быть уменьшен на 3-4 порядка. Сравнение измеренного в ходе кампании реактора значения генерирующей способности эмиттера с вычисляемым при помощи программы показало высокую степень точности расчетов.

**Ключевые слова:** ДПЗ; датчик прямого заряда; контроль; электрическая цепь; диагностический признак; ядерный реактор; программное обеспечение.

**Для цитирования:** Костарев В.С. Разработка программного обеспечения для контроля технического состояния датчика прямого заряда ядерного реактора ВВЭР-1200 в статических и динамических режимах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 13-25. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-13-25.

## DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION OF THE SELF-POWERED NEUTRON DETECTORS OF THE VVER-1200 NUCLEAR REACTOR IN STATIC AND DYNAMIC MODES

Kostarev V.S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia  
slavakostarev@yandex.ru

**Abstract:** *RELEVANCE. The paper presents proposals for optimizing the existing methods for monitoring the technical condition of self-powered neutron detectors (SPNDs) of the in-reactor monitoring system (IRMS), used, in particular, at VVER-1200 nuclear reactors, which allow increasing the accuracy of diagnosing the operability or inoperability of such sensors. OBJECTIVE. To evaluate the currently used methods for monitoring and diagnosing sensors. To present proposals for optimizing the monitoring of the technical condition of SPNDs by increasing the volume of diagnostic information. To describe the developed software that allows determining the parameters of the SPNDs measuring circuit to diagnose the technical condition of the sensor. To present the results of processing the SPNDs readings of the VVER-1200 reactor of the Leningrad NPP using the developed software. METHODS. When solving the tasks, the provisions and methods of technical diagnostics were used, as well as the theory of electrical circuits and numerical methods for solving equations implemented in the developed software using MatLab. RESULTS. The article describes the relevance of the topic, presents a methodology for optimizing the monitoring of the technical condition of the SPNDs, based on expanding the volume of diagnostic information used. The described methodology is used as a basis for creating specialized software in the MatLab environment. The developed software was used to determine the insulation resistance of the measuring circuit of the SPNDs of VVER-1200 at the Leningrad NPP. CONCLUSION. Using the proposed method for monitoring the technical condition of the SPNDs allows increasing the reliability of the SPNDs by using an expanded set of information about the technical condition of the sensor. The results of calculations using the developed software based on data from Leningrad NPP-2 showed that the range of operability of the SPNDs in terms of insulation resistance can be reduced by 3-4 orders of magnitude. Comparison of the value of the emitter generating capacity measured during the reactor campaign with the one calculated using the program showed a high degree of accuracy.*

**Keywords:** *SPND; Self-powered neutron detector; control; electrical circuit; diagnostic feature; nuclear reactor; software.*

**For citation:** Kostarev V.S. Development of software for controlling the technical condition of the self-powered neutron detectors of the VVER-1200 nuclear reactor in static and dynamic modes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 13-25. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-13-25.

### **Введение (Introduction)**

Контроль технического состояния элементов активной зоны ядерного реактора необходим для оценки их остаточного ресурса и надежности. Особое значение при решении данной задачи имеет оценка состояния датчиков прямого заряда (ДПЗ), входящих в состав системы внутриреакторного контроля (СВРК) реакторов типа ВВЭР [1, 2]. СВРК представляет собой одну из основных специализированных систем контроля активной зоны реактора, предназначенной для контроля и прогнозирования остаточного ресурса активной зоны ядерного реактора, а также контроля параметров надежности и параметров, связанных с безопасностью эксплуатации реакторной установки [3, 4].

Важной особенностью контроля активной зоны является необходимость мониторинга значений полей энерговыделения, температурных значений, нахождения основных технологических параметров в эксплуатационных пределах при различных режимах работы РУ, в том числе при работе на мощности, наборе мощности, расхолаживании [5, 6]. Параметры нейтронного потока так же фиксируются при нарушении нормальной эксплуатации, что может являться ключевой особенностью при анализе работы активной зоны при нарушениях нормальной эксплуатации и наступлении исходных событий. Именно на основе показаний ДПЗ и может быть построено распределение нейтронного потока по объему активной зоны ядерных реакторов различных типов [7, 8].

В основе принципа действия ДПЗ лежит процесс преобразования нейтронного излучения в величину электрического тока [9]. Конструкция ДПЗ представлена на рисунке 1.

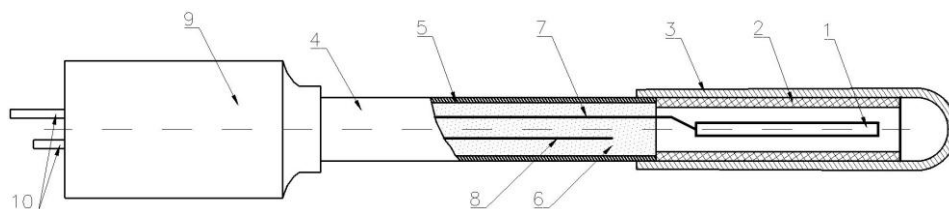


Рис. 1. Конструкция ДПЗ: 1 – эмиттер; 2 – изолятор; 3 – коллектор; 4 – линия связи; 5 – оболочка; 6 – изоляция кабеля; 7 – токовая жила; 8 – фоновая жила; 9 – гермоввод; 10 – токовыводы

Fig. 1. Design of the SPND: 1 – emitter; 2 – insulator; 3 – collector; 4 – communication line; 5 – sheath; 6 – cable insulation; 7 – current core; 8 – background core; 9 – sealed entry; 10 – current terminals

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При этом выходной токовый сигнал ДПЗ, применяемых на реакторах ВВЭР, имеет определенное запаздывание, связанное с тем, что наибольший вклад в него вносит т. н. инерционная токовая составляющая, зависящая от скорости распада ядер эмиттера датчика [10]. Как следствие, в переходных режимах работы реактора, показания ДПЗ перестают быть пропорциональными изменению нейтронного потока в активной зоне [11]. Для устранения данной проблемы показания датчиков необходимо корректировать.

Традиционно, как указано, например, в работах [12-14] для этого применяется фильтр Калмана (являющийся на сегодняшний день стандартным алгоритмом коррекции показаний ДПЗ на действующих АЭС), а также прочие аппаратные и программные методы коррекции. При этом, однако, следует отметить, что алгоритм коррекции, основанный на фильтре Калмана, имеет довольно большую чувствительность к шумам в показаниях датчиков [7], которые при работе реактора на мощности могут возникнуть как из-за токов линии связи, составляющих в выходном токовом сигнале ДПЗ 3-5%, а также при переходных режимах, сопровождающихся большими и резкими перемещениями органов регулирования системы управления и защиты, и, соответственно, большими колебаниями в показаниях датчиков. Помимо этого, фильтр Калмана достаточно сильно чувствителен к периоду измерения токового сигнала ДПЗ, при больших периодах его точность снижается, и, хотя инерционность детекторов уменьшается, быстро и точно восстановить сигнал становится затруднительно. Однако, вышеуказанные недостатки на сегодняшний день устранены, так, для исключения токов линии связи в конструкцию ДПЗ внедрена фоновая жила, а период измерения токовых сигналов в СВРК ВВЭР-1200 может быть настроен необходимым для оператора образом (стандартное значение – одна секунда).

Контроль технического состояния ДПЗ крайне важен для нормального функционирования активной зоны. В настоящее время, в качестве диагностического признака, по которому производят контроль технического состояния ДПЗ, используют величину сопротивления изоляции измерительного кабеля датчика. Уменьшение данного параметра приводит к возрастанию тока утечки в измерительной цепи, а, следовательно, к уменьшению измеряемого тока датчика, что влияет на точность определения нейтронного потока в месте его установки [15]. Однако, используя как основание для постановки диагноза о работоспособности/неработоспособности ДПЗ лишь данный признак, невозможно сделать вывод, уменьшается ли выходной ток за счет сопротивления изоляции (что приводит к росту тока утечки) либо за счет выгорания непосредственно эмиттера (что приводит к уменьшению чувствительности ДПЗ), поскольку информация о техническом состоянии самого эмиттера в данном случае отсутствует [16, 17].

Устранить данный недостаток можно, добавив к диагностическим параметрам ДПЗ, на основе которых ставится диагноз о его техническом состоянии, генерирующую способность эмиттера, а также емкость измерительной цепи ДПЗ, которая имеет значение при выполнении измерений с использованием ДПЗ в динамических режимах реактора [18].

В качестве ещё дополнительных методов контроля технического состояния ДПЗ можно выделить, например, контроль показаний ДПЗ оператором при работе реактора на мощности [19]. Оператор, управляющий энергоблоком имеет on-line доступ к информации по показаниям всех датчиков, находящихся в активной зоне. Поскольку ДПЗ сгруппированы в активной зоне по каналам (в каждом канале находится 7 датчиков), датчики одного канала ведут себя схожим образом (особенно при работе реактора в стационарном режиме). Видя сигнал СВРК о резком изменении/недоверности показаний датчика при отсутствии каких-либо изменений в показаниях остальных

датчиков в канале, оператор может принять решение об исключении данного датчика из расчетов показаний энерговыделения и необходимости его замены в период ближайшего планово-предупредительного ремонта.

Цель исследования заключается в оптимизации контроля технического состояния ДПЗ путем увеличения объема диагностической информации (диагностических признаков ДПЗ) при помощи разработанного специализированного ПО.

Научная значимость исследования состоит в улучшении существующих методов контроля технического состояния ДПЗ. Автором предлагается использовать диагностическую информацию (набор диагностических признаков ДПЗ) на разных стационарных режимах работы реактора. Увеличение объема диагностической информации позволит уточнять значения диагностических признаков ДПЗ, что увеличит точность контроля технического состояния датчиков.

Практическая значимость исследования заключается в разработке ПО для определения параметров измерительной цепи ДПЗ в статических и динамических режимах работы, что позволит оптимизировать процесс расчета интересующих диагностических признаков. При этом можно отметить что, в случае интеграции рассматриваемого ПО в системы контроля и диагностирования АЭС, внесения изменений в их аппаратную часть не потребуется, т.к. созданная программа опирается на уже существующую измерительную инфраструктуру и может получать в качестве входных данных сигналы непосредственно от ДПЗ как для рабочего, так и для диагностического режима работы измерительной цепи.

Для внедрения описываемого программного обеспечения в эксплуатацию на действующих АЭС, однако, потребуется проведение его верификации и валидации. Со стороны авторов при анализе полученных данных с действующей АЭС и сравнения их с расчетными было определено, что программа обладает достаточно высокой точностью в определении диагностических параметров ДПЗ (более подробно описано в разделе «Результаты и обсуждение»), при этом проведение независимой верификации и валидации потребует привлечения специалистов НИЦ «Курчатовский институт» (как разработчика системы СВРК) и специалистов эксплуатации АЭС с целью проведения таких мероприятий как анализ на синтезированном наборе сигналов с заранее заданными значениями диагностических параметров, ретроспективный анализ архивных данных с энергоблоков, проведения дальнейших испытаний на работающем реакторе и т.д., что может быть возможно на дальнейших этапах исследований.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Как уже было сказано выше, к диагностическим признакам, на основе которых возможно производить контроль технического состояния измерительной цепи, можно отнести генерирующую способность эмиттера ДПЗ (в данном случае Rh-104), а также сопротивление изоляции измерительного кабеля. Подробно способ диагностирования, основанный на определении данных величин, ранее был описан в работах автора [16, 18]. Для понимания дальнейших рассуждений далее опишем его кратко.

Рассмотрим эквивалентную электрическую схему замещения измерительной цепи ДПЗ в двух статических (рабочем и диагностическом), а также динамическом режиме работы. На рисунке 2 представлена измерительная цепь ДПЗ в статических режимах работы.

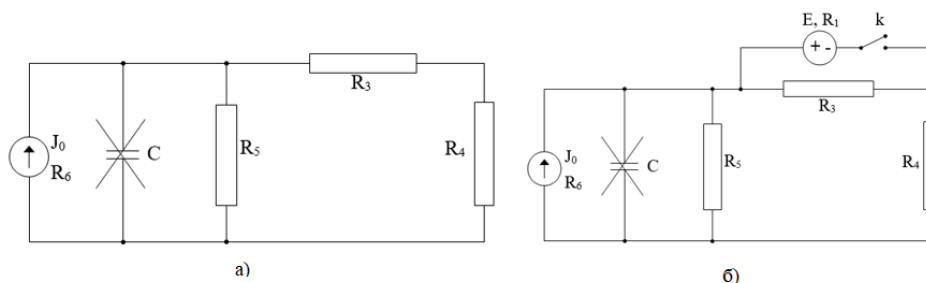


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема замещения измерительной цепи ДПЗ в статических режимах работы: а) – рабочий режим, б) – диагностический режим

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На схеме представлены: источник тока с параметрами  $J_0$ ,  $R_6$  (ДПЗ),  $C$  – емкость

кабеля измерительной цепи (в данном режиме не принимается во внимание, поскольку реактор предполагается работающим на стационарном уровне мощности);  $R_3$  – резистор, вводимый для обеспечения диагностического режима;  $R_4$  – нагрузочное сопротивление;  $R_5$  – сопротивление изоляции кабеля измерительного канала;  $R_6$  – внутреннее сопротивление источника тока;  $J_0$  – генерирующая способность эмиттера (ток датчика на внутреннем участке цепи), ключ  $k$ , источник напряжения, имеющий ЭДС  $E \sim 100$  мВ и внутреннее сопротивление  $r_0=R_1$ .

Для нахождения интересующих диагностических параметров при работе ДПЗ будем измерять величину электрического тока, протекающего через сопротивление  $R_4$ . Обозначим эту величину как  $i_4$ . Рассмотрим первый статический (рабочий) режим работы цепи ДПЗ. Система уравнений для определения тока  $i_4$  будет записываться следующим образом:

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

где  $i_3, i_4, i_5, i_6, u_3, u_4, u_5, u_6$  – токи и напряжения на представленных на рисунке 1 сопротивлениях.

Второй статический (диагностический) режим устанавливается после замыкания ключа  $k$  и завершения переходного процесса, обусловленного наличием в измерительной цепи ДПЗ паразитных емкостей. Запишем системы уравнений для рассматриваемой в данном режиме цепи:

$$\begin{cases} i_1 - i_3 - i_5 + i_6 = 0 \\ i_4 + i_5 - i_6 = 0 \\ u_1 + u_3 = 0 \\ u_1 - u_4 + u_5 = 0 \\ -u_1 + u_4 + u_6 = 0 \end{cases}; \begin{cases} u_1 = i_1 R_1 - E \\ u_3 = R_3 i_3 \\ u_4 = R_4 i_4 \\ u_5 = R_5 i_5 \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6 \end{cases}. \quad (2)$$

Основываясь на измеренных значениях токов  $i_4$  для обоих рассматриваемых режимов становится перейти к определению интересующих значений диагностических признаков ДПЗ  $J_0$  и  $G$ , выразив ток  $i_4$  из систем (1) и (2).

Для динамического режима работы цепи ДПЗ рассмотрим в качестве диагностического признака емкость кабеля  $C$ , величина которой может оказывать влияние на выходной токовый сигнал.

Схема замещения для динамических режимов работы представлена на рисунке 3.

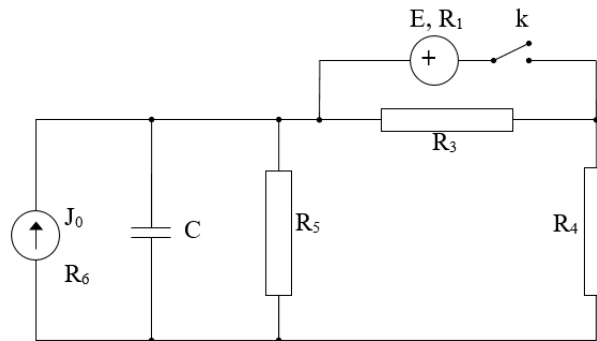


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема замещения измерительной цепи ДПЗ в динамических режимах работы Fig. 3. Equivalent electrical circuit of the SPND measuring circuit in dynamic operating modes

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Система уравнений в данном режиме по своему виду будет схожа с системами (1) и (2), однако ввиду того что рассматривается реактивный элемент цепи в виде емкости, она примет вид системы алгебраически-дифференциальных уравнений (3), а измеряемая величина электрического тока станет функцией от времени ( $i_4=i_4(t)$ ).

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 - i_3 + i_4 = 0 \\ i_2 + i_4 + i_5 - i_6 = 0 \\ u_1 + u_3 = 0 \\ -u_1 - u_2 + u_4 = 0 \\ -u_2 + u_5 = 0 \\ u_2 + u_6 = 0 \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} u_1 = i_1 R_1 - E \\ i_2 = C \frac{du_2}{dt} \\ u_3 = R_3 i_3 \\ u_4 = R_4 i_4 \\ u_5 = R_5 i_5 \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6 \end{array} \right. \quad (3)$$

После нахождения всех интересующих величин (вычисления проводятся аналогично таковым для статических режимов) емкость измерительной цепи, при применении численных методов решения дифференциальных уравнений, возможно определить по формуле (4):

$$C(t_i) = \frac{i_2(i+1) + i_2(i)}{2} \bigg/ \frac{u_2(i+1) - u_2(i)}{t(i+1) - t(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Далее, зная величину нейтронного потока в месте установки датчика, по формуле (5) возможно определить коэффициент чувствительности ДПЗ:

$$S = J_0 / \Phi \quad (5)$$

а также произвести оценку тока утечки при помощи сопротивления изоляции измерительной цепи ДПЗ, на основе чего возможно сделать окончательный вывод о целесообразности использования датчика.

При этом, следует учитывать ограниченную возможность получения измерительной информации для определения емкости  $C$  (связано это с величиной  $n$  в формуле (4)) в переходном процессе при включении дополнительного источника напряжения  $E$  (основным источником ЭДС является генератор тока  $J_0$ ). Для повышения объема этой информации можно использовать повышение частоты регистрации токового сигнала, однако, при этом в значительной степени возрастают объемы информации в основном штатном режиме регистрации при работе ядерного реактора в стационарном режиме.

Это является проблемой для СВРК, поскольку одновременно этой системой может регистрироваться большое количество измерительных каналов. Поэтому избыточность информации за счет повышения частоты дискретизации измеряемого сигнала не требуется на действующем энергетическом реакторе типа ВВЭР в штатном режиме использования активационных датчиков, к которым относятся и родиевые ДПЗ. В то же время следствием уменьшения объема статистической информации в переходном процессе является понижение точности при определении третьего диагностического признака  $C$  – емкости измерительной цепи датчика.

Зная генерирующую способность эмиттера ДПЗ возможно перейти к решению задачи контроля технического состояния окружающих ДПЗ твэл и ТВС. Однако поскольку при переходных процессах, связанных с перемещением органов регулирования системы управления и защиты ВВЭР-1200 мощность реактора может значительно меняться (особенно во время пусков и остановов), необходимо как можно более точно определять величину  $J_0$ . С точки зрения нейтронно-физических процессов, происходящих в реакторе, она будет зависеть от величины нейтронного потока в месте установки датчиков, величина которого при работе реактора на разных уровнях мощности будет существенно отличаться, что подводит к необходимости увеличения объема диагностической информации в зависимости от уровня мощности.

Для устранения указанного выше недостатка предлагается к существующему объему информации добавить измерительную информацию, получаемую в статических режимах при работе на другом уровне мощности ядерного реактора. Это позволит, за счет повышения объема измерений уточнить величину сопротивления изоляции измерительного кабеля и генерирующей способности эмиттера.

Одновременно путем организации дополнительных переходных процессов на новом стационарном уровне мощности можно получить дополнительную информацию для уточнения величины емкости  $C$  в динамическом режиме работы активной зоны.

Регистрация токовой информации  $i_4 = i_4(t)$  при выключенном источнике дополнительного напряжения (ключ  $k$  разомкнут) в динамическом режиме работы активной зоны позволяет вычислить функцию  $J_0(t)$  по формуле (6).

$$J_0(t) = C(R_3 + R_4) \frac{di_4(t)}{dt} + i_4(t)(1 + (R_3 + R_4) * (R_5 + R_6) / (R_5 R_6)) \quad (6)$$

После определения диагностических параметров на новом уровне мощности реактора, находятся уточненные значения сопротивления изоляции и емкости измерительной цепи ДПЗ  $G = (G_1 + G_2) / 2$  и  $C = (C_1 + C_2) / 2$ , где  $G_1$ ,  $C_1$  – искомые проводимость и емкость, определяемые при работе реактора на первом уровне мощности;  $G_2$ ,  $C_2$  – проводимость и емкость, определяемые при работе реактора на втором уровне мощности.

При переходе ядерного реактора на новый стационарный уровень мощности путем перемещения органов регулирования, изменяется и нейтронный поток в месте расположения датчика и, как следствие, генерирующая мощность эмиттера ДПЗ как источника электрического тока. Поэтому для определения величины чувствительности датчика  $S$  необходима информация о величине нейтронного потока в месте расположения ДПЗ на рассматриваемых уровнях мощности. Эта информация должна быть получена на основе расчетов или непосредственных измерений нейтронного потока.

Функцию  $J_0(t)$  необходимо подвергнуть корректировке для устранения инерционности датчика. В результате этого получается откорректированная временная зависимость  $\hat{J}_0(t)$ , пропорциональная нейтронному потоку в месте расположения данного детектора нейтронного потока (ДПЗ), т.е.  $\Phi(t) \sim \hat{J}_0(t)$ . При этом определяются откорректированные значения генерирующей способности эмиттера  $\hat{J}_0^1$  и  $\hat{J}_0^2$  на двух стационарных уровнях мощности ядерного реактора  $N_1$  и  $N_2$  (в начале и в конце динамического режима).

По откорректированным значениям генерирующей способности эмиттера  $\hat{J}_0^1$ ,  $\hat{J}_0^2$  для двух стационарных уровней мощности и значениям нейтронного потока вблизи поверхности ДПЗ  $F_1$ ,  $F_2$  находятся откорректированные значения коэффициентов чувствительности датчика  $S_1 = \hat{J}_0^1 / F_1$  и  $S_2 = \hat{J}_0^2 / F_2$ , которые затем усредняются.

С целью автоматизации вычислений, осуществляемых в рамках описанной выше математической модели, представляется целесообразным разработать и внедрить специализированное программное обеспечение. Такое ПО должно быть ориентировано на практическое применение модели и обеспечивать определение значений, описываемых в данной работе диагностических признаков ДПЗ. Данное программное обеспечение было реализовано с использованием программного пакета Matlab. На разработанную программу было получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [20].

Созданная при помощи MatLab Live Editor программа сочетает в себе возможности моделирования как статических, так и динамических режимов работы измерительной цепи ДПЗ, а также включает методы диагностики ее параметров на основе экспериментальной и расчетной информации. Программа представляет собой набор функций, направленных на обработку входных данных и приведения их к необходимому формату для дальнейших вычислений, расчет параметров электрической цепи при помощи численных методов решения уравнений (метод Рунге-Кутты), а также вывод результатов в виде численных массивов данных и графиков. ПО не имеет графического интерфейса, ввод исходных данных производится при помощи командной строки MatLab. Изменение констант (задаваемых параметров цепи ДПЗ) производится непосредственно в коде программы.

Входными данными для программы служат массивы токовых сигналов, регистрируемых с ДПЗ и передаваемых из системы внутриреакторного контроля. Программа позволяет обрабатывать данные как по одному каналу, так и по нескольким каналам одновременно, что расширяет её применимость. При анализе входных данных особое внимание уделяется временным интервалам, в которых наблюдаются резкие изменения величины тока относительно предыдущих значений. Такие изменения могут свидетельствовать о потенциально некорректной работе датчика. Для выявления этих аномалий в программный алгоритм внедрена функция сравнения текущего значения тока с усредненным значением двух предшествующих точек. Если наблюдается относительное изменение более чем на 1%, данная временная точка классифицируется как потенциально аномальная и заносится в память системы для последующего анализа.

После обработки исходных данных и определения аномальных точек, программа приступает к моделированию электрической цепи ДПЗ. Моделируемая цепь аналогична

такowym, представленным на рисунках 1 и 2: задаются известные параметры элементов цепи такие как сопротивления элементов и ЭДС.

При проведении моделирования рассматриваются как статические, так и динамические режимы функционирования цепи. В статическом режиме программа производит расчет всех токов и напряжений на отдельных участках схемы, принимая во внимание параметры, заданные исходно. Особое внимание при этом уделяется току утечки, представляющему собой часть общего тока, поступающего от источника, но проходящего через его внутреннее сопротивление. Вычитая ток утечки из общего тока, можно получить значение полезного тока, реально поступающего в измерительную цепь. Напряжения в различных точках цепи рассчитываются с использованием методов анализа узловых потенциалов и через определение проводимостей элементов. При расчете цепи в динамическом режиме работы для определения емкости кабеля измерительной цепи используются численные методы решения дифференциальных уравнений.

Важной диагностической процедурой является проверка цепи при отключенном источнике ЭДС. В этом режиме программа рассчитывает новое распределение токов и напряжений, что позволяет: выделить влияние только источника тока, проверить симметрию цепи, обнаружить паразитные параметры, а также провести раздельную диагностику элементов цепи. При этом токи в ветвях пересчитываются с учетом новых условий.

По результатам расчета режимов цепи программа определяет рассматриваемые в данной работе диагностические признаки ДПЗ: сопротивление изоляции кабеля, емкость измерительной цепи и генерирующую способность эмиттера. Результаты расчетов выводятся таблиц и графиков, содержащих значения всех токов и напряжений в ветвях цепи для каждого момента времени. Программа реализована с учетом возможности изменения задаваемых параметров цепи, что позволяет рассматривать различные режимы работы цепи для ДПЗ различного типа.

В качестве среды для разработки был выбран Matlab, поскольку ранее в рамках комплексного исследования возможности определения размножающих свойств активной зоны (реактивности, традиционно определяемой при помощи ионизационных камер [21]) на основе показаний ДПЗ, автором в той же среде разработки уже были созданы и зарегистрированы расчетные программы, позволяющие определять при помощи метода обращенного решения уравнения кинетики значения реактивности, основываясь на выходных токовых сигналах ДПЗ [22]. Применение одной среды разработки позволит создать комплексный программный продукт, позволяющий производить диагностирование ДПЗ по вышеописанным признакам, осуществлять сравнение вычисленных диагностических признаков с предельно допустимыми значениями и включать в дальнейшие расчеты только работоспособные датчики, исключая те, показания которых недостоверны. При этом, однако, стоит отметить, что в случае внедрения разработанного ПО на АЭС России, безусловно требуется конвертация ПО с языка программирования MatLab на языки C/C++ (что можно сделать, например, при помощи собственных инструментов MatLab, таких как MatLab Coder). Однако, поскольку подобная конвертация потребует значительных затрат в связи с необходимостью повторной верификации ПО уже на языках C/C++, данный вопрос на текущий момент не рассматривался.

#### ***Результаты и обсуждение (Results and discussions)***

После определения при помощи вышеописанного ПО значений интересующих диагностических признаков ДПЗ, постановка диагноза о возможности использовании датчика должна проводиться путем сравнения полученных значений искомых величин с предельно допустимыми, заданными производителем ДПЗ. При этом, поскольку ДПЗ находятся непосредственно в активной зоне реактора, окончательная постановка диагноза о техническом состоянии датчика и его замена на сегодняшний день возможна только в период останова энергоблока при проведении планово-предупредительного ремонта, когда уровень активности спадает.

Для коэффициента чувствительности в случае родиевых ДПЗ предельно допустимое значение составляет  $21 \cdot 10^{-20}$  (А·см<sup>2</sup>·с)/(м·нейтр), а для сопротивления изоляции измерительной цепи –  $10^6$  Ом. Минимально допустимое значение емкости измерительной цепи при этом подлежит дальнейшему определению, поскольку ранее при диагностировании ДПЗ данный диагностический признак не рассматривался.

Рассмотрим в качестве примера возможность снятия части ограничений по сопротивлению изоляции измерительной цепи датчика на основе экспериментальных данных, полученных с реактора Ленинградской АЭС.



В качестве входных данных из архива СВРК для одного из датчиков, которому впоследствии был поставлен диагноз о неработоспособности, были получены массивы токовых сигналов с устраненной инерционностью одного из ДПЗ в канале активной зоны при стационарном режиме работы реактора (нейтронный поток оставался постоянным) для статических режимов работы измерительной цепи, описываемых в статье. Также со станции были получены данные о значении генерирующей способности эмиттера рассматриваемого датчика (для сравнения ее с вычисляемой в разработанном ПО). Поскольку на рассматриваемом интервале времени реактора выгорание эмиттера ДПЗ незначительно, величина  $J_0$  считалась постоянной. Полученные данные представлены на рисунке 4.

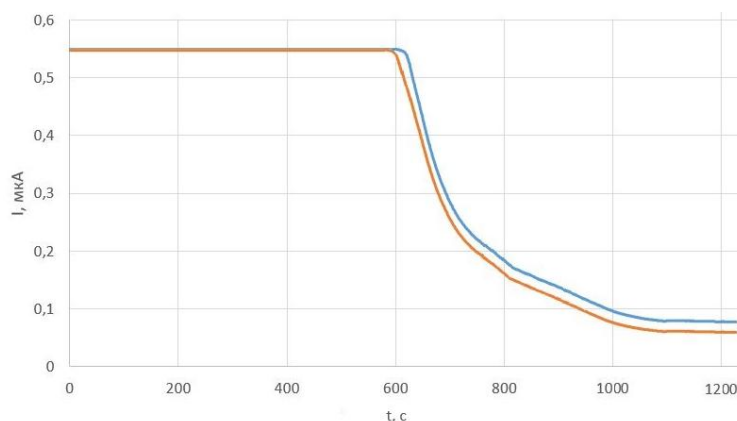


Рис. 4. Зависимость измеряемого тока  $i_4$  от времени по архивам СВРК. Верхняя кривая соответствует рабочему режиму, нижняя – диагностическому

Fig. 4. Dependence of the measured current  $i_4$  on time according to the IRMS archives. The upper curve corresponds to the operating mode, the lower one – to the diagnostic mode

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 4 видно, что несмотря на то, что реактор находился в стационарном режиме работы (нейтронный поток оставался постоянным), показания ДПЗ в обоих режимах в определенный момент (около 600 секунд) стали изменяться, что может указывать на возрастание тока утечки и служить признаком потенциальной неисправности датчика.

Поскольку величина генерирующей способности эмиттера на рассматриваемом временном промежутке была постоянной (ее значение составляло  $J_0=0,549$  мкА), изменения в выходном токовом сигнале ДПЗ могли происходить только за счет роста тока утечки, к которому приводит уменьшение сопротивления изоляции в измерительной цепи.

Для определения величины сопротивления изоляции рассматриваемого датчика при помощи рассматриваемого в работе ПО были приведены расчеты, результаты которых представлены на рисунке 5 в виде зависимости отношения  $i_4/J_0$  к сопротивлению изоляции измерительной цепи  $R$ .

Из рисунков 4 и 5 видно, что на начальном этапе отношение  $i_4/J_0$  для обоих режимов оставалось постоянным и равным, ток утечки, следовательно, был равен нулю. При этом при достижении ранее предельно допустимого предела  $10^6$  Ом ток утечки в измерительной цепи зафиксирован не был, поскольку отношение  $i_4/J_0$  оставалось постоянным и равным единице, отклонения в показаниях ДПЗ стали отмечаться лишь при величине сопротивления изоляции  $\sim 10^3$ - $10^4$  Ом.

Таким образом, диапазон работоспособности ДПЗ возможно расширить и снять часть ограничений по сопротивлению изоляции измерительной цепи датчика. Так, данную величину становится возможным уменьшить на 3-4 порядка, а оставшееся ограничение будет связано лишь с необходимой точностью измерения тока, протекающего через нагрузочное сопротивление.

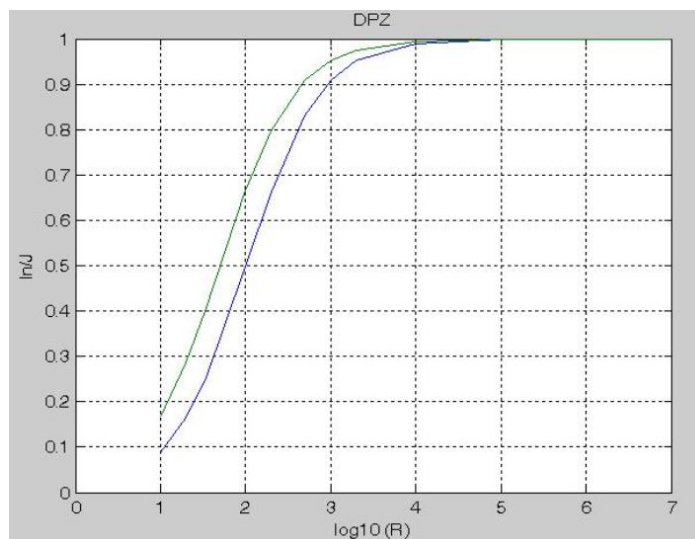


Рис. 5. Зависимость отношения измеряемого тока  $i_4$  к величине генерирующей способности эмиттера ДПЗ  $J_0$  к сопротивлению тока утечки  $R$ . Верхняя кривая соответствует рабочему режиму, нижняя – диагностическому

Fig. 5. Dependence of the ratio of the measured current  $i_4$  to the value of the generating capacity of the emitter of the SPND  $J_0$  to the resistance of the leakage current  $R$ . The upper curve corresponds to the operating mode, the lower one – to the diagnostic mode

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В ходе вычислений также было проведено сравнение расчетной величины генерирующей способности эмиттера с фактической. Величина генерирующей способности эмиттера, определенная в ходе расчетов при помощи разработанной программы, оказалась равна 0,5458 мкА, что довольно близко к значению, полученному на работающем реакторе, благодаря чему можно судить о корректности представленной модели.

#### Заключение (Conclusions)

Описанные автором предложения по оптимизации контроля технического состояния датчиков прямого заряда, а также разработанное на их основе программное обеспечение, позволяют расширить диапазон работоспособности ДПЗ с  $10^6$  до  $10^3$ - $10^4$  Ом по величине сопротивления изоляции измерительной цепи датчика.

Разработанное в среде MatLab ПО позволяет автоматизировать процесс расчета по описанной в работе математической модели и впоследствии при условии конвертации на языки C/C++ и проведения независимой верификации и валидации может быть интегрировано в применяемые на АЭС системы диагностирования. Сравнение расчетного значения генерирующей мощности эмиттера (0,5458 мкА) с действительным (0,549 мкА) показывает довольно высокую достоверность описанной математической модели и точность проводимых в программе расчетов.

Включение в диагностические признаки ДПЗ генерирующей способности эмиттера позволит контролировать техническое состояние датчика в зависимости от изменения его чувствительности к нейтронному потоку в месте установки, что даст возможность четко понимать зависит ли уменьшение величины выходного токового сигнала ДПЗ от выгорания эмиттера либо же от других причин, что, в свою очередь, позволит повысить надежность ДПЗ.

Использование данных по диагностическим признакам ДПЗ, зафиксированных на различных уровнях мощности реактора, позволит увеличить точность постановки диагноза о работоспособности/неработоспособности датчиков, поскольку увеличивается объем измерительной информации о емкости кабеля измерительной цепи  $C$  и сопротивления изоляции  $R$ . При этом планируется получение экспериментальных данных от Ленинградской АЭС для подтверждения данной гипотезы.

#### Литература

1. Абагян А.А., Дмитриев В.М., Клебанов Л.А., и др. Система контроля и диагностики режимов работы энергоблока АЭС // Атомная энергия. 1987. Т. 63, №5. С. 311-315.
2. Асмолов В.Г., Гусев И.Н., Казанский В.Р., и др. Головной блок нового поколения – особенности проекта ВВЭР-1200 // Известия высших учебных заведения. Ядерная энергетика. 2017.

№3. С. 5-21.

3. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. М.: Наука, 2019. 398 с.

4. Tingyu W., Luo S., Cai L., et al. Simulation and experimental verification for Rh-SPND burnup effect // *Annals of Nuclear Energy*. 2024. Vol. 205. pp. 1-6.

5. Мительман М.Г. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. М.: Энергоиздат, 1982. 78 с.

6. Мительман М.Г., Дубовский В.Г., Любченко В.Ф., и др. Детекторы для внутриреакторных измерений энерговыделения. М.: Атомиздат, 1977. 151 с.

7. Цимбалов С.А. Характеристики родиевого детектора ДПЗ-1М. М.: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1984. 17 с.

8. Калинушкин А.Е., Курченков А.Ю., Марков Д.С., и др. Детектор прямого заряда с эмиттером из металлического гафния в реакторах ВВЭР // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 2023. №2. С. 17-19.

9. Мусихин А.М., Мильто Н.В., Курченков А.Ю., и др. Анализ показаний фоновых жил внутриреакторных детекторов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 2022. №5. С. 102-105.

10. Шикалов В.Ф., Козлова Л.В., Капитанова Л.О. Исследование характеристик детекторов прямого заряда повышенной чувствительности // *Вопросы атомной науки и техники. Серия : Физика ядерных реакторов*. 2023. №2. С. 5-11.

11. Wu X., Cai L., Zhang X., et al. Analysis of signal cable noise currents in nuclear reactors under high neutron flux irradiation // *Nuclear Engineering and Technology*. 2023. Vol. 55. pp. 4628-4636.

12. Turso J., Carvajal J.V., Stafford S.C., et al. Toward the implementation of self-powered, wireless, real-time reactor power sensing // *Annals of Nuclear Energy*. 2020. Vol. 139. pp. 1-10.

13. Mishra A.K., Sairam K.N.V., Shimjith S.R., et al. Comparative Study of Performance of Adaptive Kalman Filtering Applied to Vanadium and Rhodium SPNDs // *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55(1). pp.321-326.

14. Khoshahval F., Zhang P., Lee D. Analysis and comparison of direct inversion and Kalman filter methods for self-powered neutron detector compensation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2020. Vol. 969. pp. 1360-1368.

15. Грибов А.А., Кирьянов А.А., Сдобнов С.И., и др. Система контроля для обнаружения состояний датчика. Патент РФ на изобретение №13281U1. 27.03.2000.

16. Панкин А.М., Калютик А.А., Костарев В.С. Контроль технического состояния внутризонного детектора нейтронов в статических и динамических режимах // *Надежность и качество сложных систем*. 2023. №1(41). С. 118-125.

17. Панкин А.М., Калютик А.А., Коровкин Н.В. Способ контроля технического состояния датчика прямого заряда системы внутриреакторного контроля ядерного реактора. Патент РФ на изобретение №2783505C1. 14.11.2022.

18. Панкин А.М., Калютик А.А., Костарев В.С. Контроль состояния датчиков прямого заряда системы внутриреакторного контроля ядерного реактора в динамических режимах // *Контроль. Диагностика*. 2023. Т. 26. №3. С. 50-55.

19. Semenikhin A.V., Saunin Yu.V., Zhuk M.M. Testing of the ICMS input data diagnostic system at unit 1 of Novovoronezh NPP II // *Nuclear Energy and Technology*. 2017. Vol. 3. Iss. 4. pp. 297-301.

20. Костарев В.С., Панкин А.М., Калютик А.А. Программа для определения параметров измерительной цепи датчика прямого заряда ядерного реактора в диагностических целях на основе экспериментальной и расчетной информации. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024688511. 28.11.2024.

21. Куликов В.И., Попыкин А.И., Смирнова А.А., и др. Метод расчета реактивности при сбросе ОР СУЗ с использованием показаний ионизационных камер в реакторе типа ВВЭР-1000 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2023. №4. С. 43-52.

22. Костарев В.С., Панкин А.М., Калютик А.А. Программа для обработки результатов внутриреакторных измерений по датчикам прямого заряда. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024665402. 12.07.2024.

#### Авторы публикации

**Костарев Вячеслав Сергеевич** – аспирант Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6475-6454>, [slavakostarev@yandex.ru](mailto:slavakostarev@yandex.ru)

## References

1. Abagyan AA, Dmitriev VM, Klebanov LA, et al. Sistema kontrolya i diagnostiki rezhimov raboty energobloka AES. *Atomnaya energiya*. 1987; 63(5):311-315. (In Russ).
2. Asmolov VG, Gusev IN, Kazanskii VR, et al. Golovnoi blok novogo pokoleniya – osobennosti proekta VVER-1200. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniya. Yadernaya energetika*. 2017; 3:5-21. (In Russ).
3. Arkadov GV, Pavelko VI, Finkel' BM. *Sistemy diagnostirovaniya VVER*. Moscow: Nauka, 2019. (In Russ).
4. Tingyu W, Luo S, Cai L, et al. Simulation and experimental verification for Rh-SPND burnup effect. *Annals of Nuclear Energy*. 2024; 205:1-6. doi: 10.1016/j.anucene.2024.110580
5. Mitel'man MG. *Zaryadovye detektory ioniziruyushchikh izlucheni*. Moscow: Energoizdat, 1982. (In Russ).
6. Mitel'man MG, Dubovskii VG, Lyubchenko VF, et al. *Detektory dlya vnutrireaktornykh izmerenii energovydeleniya*. Moscow: Atomizdat, 1977. (In Russ).
7. Tsimbalov SA. *Kharakteristiki rodievogo detektora DPZ-1M*. Moscow: Institut atomnoi energii im. I.V. Kurchatova, 1984. (In Russ).
8. Kalinushkin AE, Kurchenkov AYU, Markov DS, et al. Detektor pryamogo zaryada s emitterom iz metallichesкого gafniya v reaktorakh VVER. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*. 2023; 2:17-19. (In Russ).
9. Musikhin AM, Mil'to NV, Kurchenkov AYU, et al. Analiz pokazanii fonovykh zhil vnutrireaktornykh detektorov. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*. 2022; 5:102-105. (In Russ).
10. Shikalov VF, Kozlova LV, Kapitanova LO. Issledovanie kharakteristik detektorov pryamogo zaryada povyshennoi chuvstvitel'nosti. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*. 2023; 2:5-11. (In Russ).
11. Wu X, Cai L, Zhang X, et al. Analysis of signal cable noise currents in nuclear reactors under high neutron flux irradiation. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023; 55:4628-4636. doi: 10.1016/j.net.2023.08.044
12. Turso J, Carvajal JV, Stafford SC, et al. Toward the implementation of self-powered, wireless, real-time reactor power sensing. *Annals of Nuclear Energy*. 2020; 139: 1-10. doi: 10.1016/j.anucene.2019.107252
13. Mishra AK, Sairam KNV, Shimjith SR, et al. Comparative Study of Performance of Adaptive Kalman Filtering Applied to Vanadium and Rhodium SPNDs. *IFAC-PapersOnLine*. 2022; 55(1):321-326. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.04.053
14. Khoshahval F, Zhang P, Lee D. Analysis and comparison of direct inversion and Kalman filter methods for self-powered neutron detector compensation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2020; 969:1360-1368. doi: 10.1016/j.nima.2020.164097
15. Gribov AA, Kir'yanov AA, Sdobnov SI, et al. *Sistema kontrolya dlya obnaruzheniya sostoyanii datchika*. Patent RUS №13281U1. 27.03.2000. (In Russ).
16. Pankin AM, Kalyutik AA, Kostarev VS. Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya vnutrizonnogo detektora neutronov v staticheskikh i dinamicheskikh rezhimakh. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*. 2023; 1(41):118-125. (In Russ).
17. Pankin AM, Kayutik AA, Korovkin NV. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya datchika pryamogo zaryada sistemy vnutrireaktornogo kontrolya yadernogo reaktora*. Patent RUS №2783505C1. 14.11.2022. (In Russ).
18. Pankin AM, Kalyutik AA, Kostarev VS. Kontrol' sostoyaniya datchikov pryamogo zaryada sistemy vnutrireaktornogo kontrolya yadernogo reaktora v dinamicheskikh rezhimakh. *Kontrol'. Diagnostika*. 2023; 26(3):50-55. (In Russ).
19. Semenikhin AV, Saunin YuV, Zhuk MM. Testing of the ICMS input data diagnostic system at unit 1 of Novovoronezh NPP II. *Nuclear Energy and Technology*. 2017. 3(4):297-301. doi: 10.1016/j.nucet.2017.11.004
20. Kostarev VS, Pankin AM, Kalyutik AA. *Programma dlya opredeleniya parametrov izmeritel'noi tsepi datchika pryamogo zaryada yadernogo reaktora v diagnosticheskikh tselyakh na osnove eksperimental'noi i raschetnoi informatsii*. Certificate of state registration of computer programs RUS №2024688511. 28.11.2024. (In Russ).
21. Kulikov VI, Popykin AI, Smirnova AA, et al. Metod rascheta reaktivnosti pri sbrose OR SUZ s ispol'zovaniem pokazanii ionizatsionnykh kamer v reaktore tipa VVER-1000. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty*. 2023; 4:43-52. (In Russ).
22. Kostarev VS, Pankin AM, Kalyutik AA. *Programma dlya obrabotki rezul'tatov vnutrireaktornykh izmerenij po datchikam pryamogo zaryada*. Certificate of state registration of computer

© Костарев В.С.

programs RUS №2024665402. 12.07.2024. (In Russ).

### **Authors of the publication**

**Vyacheslav S. Kostarev** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-6475-6454>, [slavakostarev@yandex.ru](mailto:slavakostarev@yandex.ru)

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды*

**Получено** **07.07.2025 г.**

**Отредактировано** **05.10.2025 г.**

**Принято** **15.10.2025 г.**