

УДК 681.518.3
DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-75-83

Контроль технического состояния датчика прямого заряда водо-водяного ядерного реактора в статических и динамических режимах

В. С. Костарев, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

Надежная работа датчиков прямого заряда, входящих в состав системы внутриреакторного контроля ядерных реакторов, в частности водо-водяных реакторов, позволяет получить точную картину распределения энерговыделения в активной зоне. В связи с этим при контроле состояния активной зоны особое значение имеет оценка технического состояния данных датчиков. Однако существующие методы контроля не всегда позволяют с достаточной точностью определить причину изменения их состояния. В работе рассмотрен метод оптимизации контроля технического состояния датчиков прямого заряда в статических и динамических режимах работы измерительной цепи, основанный на определении емкости измерительной цепи, генерирующей способности эмиттера и сопротивления изоляции измерительного кабеля датчиков на нескольких уровнях мощности реактора. На основе показаний датчиков предложен метод оценки размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности). Представлена математическая модель электрических процессов в датчиках прямого заряда, основанная на уравнениях элементов их электрической цепи в статическом и динамическом режимах работы. Проведены расчеты, которые показали возможность расширения диапазона работоспособности датчиков. Описан алгоритм повышения точности определения диагностических признаков датчиков, основанный на проведении расчетов электрической цепи датчиков при разных уровнях мощности реактора. Представлена возможность оценки величины локальной реактивности в месте установки датчиков прямого заряда во время переходных режимов, сопровождающихся перемещением органов регулирования при помощи метода обращенного решения уравнения кинетики реактора. Предложенная методика позволит повысить точность постановки диагноза о техническом состоянии датчиков и расширить диапазон работоспособности на 3-4 порядка по сопротивлению изоляции. Определение диагностических признаков датчиков на разных уровнях мощности реактора позволит производить уточнение генерирующей способности эмиттера, что важно для последующего использования показаний датчиков с целью оценки величины реактивности.

Ключевые слова: детектор нейтронного потока, контроль технического состояния, ядерный реактор, датчик прямого заряда, диагностический признак, электрическая цепь.

Введение

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 водо-водяных реакторов [1]. ДПЗ предназначены для измерений локального значения плотности потока нейтронов внутри активной зоны ядерных реакторов. Конструктивно датчики состоят из нейтроночувствительного эмиттера, коллектора и изолатора, разделяющего их и линии связи, выполненной из двужильного кабеля с минеральной изоляцией и заканчивающейся гермовводом со стеклянной изоляцией. В основе принципа действий датчиков лежит процесс преобразования нейтронного излучения в величину электриче-

ского тока. Упомянутый процесс преобразования нейтронного излучения в величину электрического тока основан на облучении датчиков нейтронами. В результате процесса электроны, образующиеся при распаде бета-активного изотопа в нейтроночувствительном эмиттере, проходят через изолатор и достигают коллектора. Ток ДПЗ прямо пропорционален активации насыщения и сигнализирует о плотности потока нейтронов в месте расположения ДПЗ [2].

Традиционно контроль технического состояния ДПЗ выполняется путем измерения сопротивления изоляции измерительного кабеля (Патент № 13281U1 Российская Федерация, Н04М 11/00 (2000.01). Система контроля для обнаружения состояний датчика / А. А. Грибов, А. А. Кирьянов, С. И. Сдобнов С. И. Сурначев, В. И. Шарапов). С уменьшением величины 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 [3, 4].

Однако при использовании данного способа диагностирования не ясно, происходит ли уменьшение выходного токового сигнала ДПЗ за счет уменьшения сопротивления изоляции либо за счет выгорания самого эмиттера в результате длительного облучения ДПЗ нейтронами [5, 6], вследствие чего количество ядер нейтроночувствительных элементов, содержащихся в эмиттерах детекторов, уменьшается [7]. Таким образом, показания ДПЗ, используемые для определения нейтронного потока, пересчитываются в дальнейшем в энерговыделение, могут становиться неточными [8, 9].

Как было отмечено выше, одним из параметров, который определяется в процессе эксплуатации ДПЗ традиционными методами, является сопротивление изоляции измерительного кабеля. При уменьшении данного параметра до порогового значения $\approx 10^6$ Ом, датчик считается неисправным и подлежит замене [10].

Для определения данного диагностического признака можно использовать, например, метод, при котором в схему измерительной цепи ДПЗ вводится источник напряжения с ЭДС ≈ 100 мВ [11] и рассматриваются стационарные режимы работы данной цепи с введенным источником и без него.

При этом важным недостатком этого метода является отсутствие информации о техническом состоянии источника электрического тока ДПЗ – самого эмиттера датчика (в рассматриваемом случае – родиевого). За счет его естественного выгорания показания ДПЗ при одинаковой величине нейтронного потока в месте установки датчика могут уменьшаться [12–14]. Измеряя при помощи описанного метода ток датчика, остается непонятным, происходит ли уменьшение выходного сигнала датчика за счет сопротивления изоляции (его уменьшение приводит к росту тока утечки) либо же за счет уменьшения генерирующей способности самого эмиттера (что приводит к уменьшению чувствительности самого датчика, пороговое значение которого для родиевых ДПЗ, применяемых в составе СВРК ВВЭР-1200, составляет $21 \cdot 10^{-20}$ (А·см²·с)/(м·нейтр)).

Устранить данный недостаток возможно путем выполнения измерений в двух статических режимах работы измерительной цепи ДПЗ, в результате чего могут быть определены два контролируемых параметра этой цепи: мощность

источника электрического тока и сопротивление изоляции измерительного кабеля [15, 16].

К этим двум параметрам можно добавить третий параметр цепи в виде электрической емкости между центральной жилой кабеля и его экраном, что имеет значение при выполнении измерений с использованием ДПЗ в динамических режимах ядерного реактора.

При точном определении генерирующей способности эмиттера появляется возможность использовать показания датчиков не только для расчета энерговыделения в активной зоне, но и для определения технического состояния окружающих их элементов активной зоны (твэлов и ТВС). Показания ДПЗ в данном случае становятся возможным использовать для расчета размножающих свойств активной зоны в местах установки датчика (определения величины локальной реактивности), а также при привлечении дополнительных программных комплексов, рассчитывающих поочечное распределение нейтронного потока, для оценки глубины выгорания топливных сердечников твэлов.

Целью данной работы является улучшение существующих методов контроля технического состояния ДПЗ путем расширения набора рассматриваемых диагностических признаков, а также использования информации о диагностических признаках ДПЗ в разных режимах работы его измерительной цепи (статическом и динамическом) и на разных уровнях мощности реактора, что позволит повысить надежность датчиков.

Определенные таким образом диагностические признаки ДПЗ (генерирующую способность эмиттера) можно использовать для более точной оценки размножающих свойств активной зоны.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим электрическую схему замещения измерительной цепи ДПЗ, приведенную на рисунке 1.

На данной схеме представлены элементы: ДПЗ в виде источника тока с параметрами J_0 , R_6 ; C – емкость кабеля измерительной цепи; R_3 – резистор, вводимый для обеспечения в дальнейшем диагностического режима; R_4 – нагрузочное сопротивление, которое используется для измерения тока, протекающего в цепи датчика; R_5 – сопротивление изоляции кабеля измерительного канала; R_6 – внутреннее сопротивление источника тока; J_0 – генерирующая способность эмиттера (ток датчика на внутреннем участке цепи).

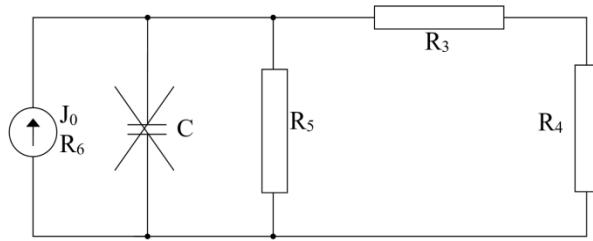


Рис. 1. Схема электрической цепи ДПЗ, используемая в штатном режиме работы ядерного реактора

Fig. 1. Schematic diagram of the electrical circuit of the SPND used in the normal operating mode of a nuclear reactor

В этом режиме реактор считается работающим на стационарном уровне мощности [17], поэтому показанная на рисунке 1 емкость C не принимается во внимание при проведении расчетов параметров цепи.

Нумерация ветвей схемы была представлена в соответствии с принятым в теоретической электротехнике подходом. Предполагается, что в рассматриваемом в дальнейшем диагностическом режиме на схеме будет использоваться дополнительный элемент – емкость измерительной цепи C , которая в статических режимах работы представляется как разрыв электрической цепи.

Для нахождения интересующих диагностических параметров при работе ДПЗ будем измерять величину электрического тока, протекающего через сопротивление R_4 . Обозначим эту величину как i_4 . Найти данную величину возможно, составив две системы уравнений: систему уравнений элементов цепи и систему уравнений на основе законов Кирхгофа, имеющую следующий вид:

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

где i_3 – ток через сопротивление R_3 ; i_4 – ток через сопротивление R_4 ; i_5 – ток через сопротивление R_5 ; i_6 – ток через сопротивление R_6 ; u_3 – напряжение на сопротивлении R_3 ; u_4 – напряжение на сопротивлении R_4 ; u_5 – напряжение на сопротивлении R_5 ; u_6 – напряжение на выводах источника тока J_0 .

Поскольку для определения интересующих диагностических признаков ДПЗ необходимо рассмотреть два статических режима, обозначим измеряемый ток i_4 как $I_1 = i_4$. Решая систему (1), получим уравнение для I_1 :

$$I_1 = i_4 = G_4 u_4 = \frac{G_3 G_4 J_0}{G_3 G_4 + (G_3 + G_4) G}. \quad (2)$$

При этом для удобства был совершен переход от сопротивлений элементов электрической цепи к соответствующим проводимостям:

$$\begin{aligned} G_1 &= 1/R_1; \quad G_3 = 1/R_3; \quad G_4 = 1/R_4; \\ G_5 &= 1/R_5; \quad G_6 = 1/R_6; \quad G = G_5 + G_6. \end{aligned}$$

Второй статический режим (электрическая цепь представлена на рис. 2), в котором используется дополнительный источник напряжения с ЭДС E и внутренним сопротивлением $r_0 = R_1$, устанавливается после замыкания ключа k и завершения переходного процесса, обусловленного наличием в измерительной цепи ДПЗ паразитных емкостей.

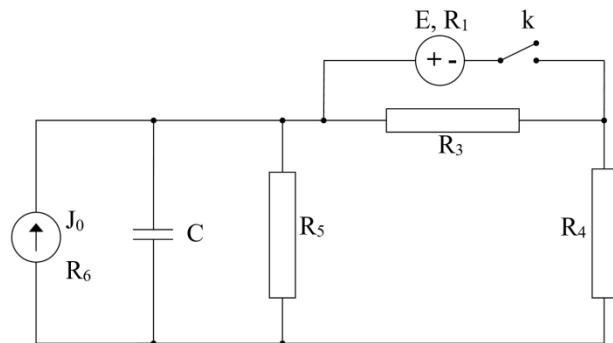


Рис. 2. Электрическая схема измерительной цепи ДПЗ при использовании переходного процесса в цепи датчика

Fig. 2. Electrical diagram of the SPND measuring circuit when using a transient process in the sensor circuit

Интересующий нас ток i_4 , протекающий через нагрузочное сопротивление R_4 , в данном режиме будет иметь значение, отличное от измеренного в предыдущем режиме. Обозначим данный ток как $I_2 = i_4$.

Системы уравнений для данного режима примут вид

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

Аналогично предыдущему режиму, решая систему (3), получим

$$I_2 = i_4 = G_4 u_4 = \frac{(G_1 + G_3) G_4 J_0 - G_1 G_4 G E}{(G_1 + G_3) G_4 + (G_1 + G_3 + G_4) G}. \quad (4)$$

После решения системы двух совместных уравнений (2) и (4) относительно неизвестных величин J_0 и G получим значения этих двух диагностических параметров измерительной цепи ДПЗ.

В качестве третьего диагностического признака ДПЗ рассмотрим величину емкости кабеля измерительной цепи C . Определение этой величины приобретает особое значение при использовании в диагностических целях динамических режимов работы активной зоны ядерного реактора. Для нахождения этой величины в стационарных режимах работы ядерного реактора при организации переходных процессов используем схему, аналогичную представленной на рисунке 2. Замыкание ключа k в данной цепи инициирует переходный процесс, обусловленный наличием емкостного элемента цепи C .

Для определения данной величины потребуется записать систему дифференциально-алгебраических уравнений, полученную по аналогии с системами (1) и (3):

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

где u_2 – напряжение на емкости C ; i_2 – ток через емкость C .

Для нахождения C измеряется тот же ток i_4 во время переходного процесса в электрической цепи, который в этом случае представляет функцию времени $i_4 = i_4(t)$.

Основываясь на полученной зависимости тока i_4 от времени, а также на ранее определенных значениях величин J_0 и G , с учетом интервала дискретизации измеряемой величины находим функции времени $u_2(t)$ и $i_2(t)$ по формулам

$$\begin{aligned} u_2(t) &= i_4(t)(RRR_1 + R_4) + E(1 - RR); \\ i_2(t) &= J_0 - i_4(t)(1 + (RRR_1 + R_4)G) - \\ &\quad - E(1 - RR)G, \end{aligned} \quad (6)$$

где величина RR вычисляется по формуле $RR = R_1/(R_1 + R_3)$.

После этого становится возможным определять интересующую величину емкости, которая в результате получения зависимости $i_4 = i_4(t)$ записывается в виде выражения

$$C(t_i) = \frac{i_2(i+1) + i_2(i)}{2} \sqrt{\frac{u_2(i+1) - u_2(i)}{t(i+1) - t(i)}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Вычислив все диагностические признаки ДПЗ, при помощи значения генерирующей способности эмиттера, а также по величине нейтронного потока в месте установки рассматриваемого конкретного датчика, возможно определить коэффициент его чувствительности: $S = J_0/\Phi$ [18], а также, перейдя от проводимости G обратно к сопротивлению R , произвести оценку тока утечки на основе данной величины. После чего, учитывая погрешность измерения тока через нагрузочный резистор Δi_4 , можно сделать вывод о техническом состоянии датчика, сравнивая вычисленные значения диагностических признаков ДПЗ с пороговыми значениями (коэффициент чувствительности для родиевых ДПЗ – $21 \cdot 10^{-20} (\text{A} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с})/(\text{м} \cdot \text{нейтр})$, сопротивление изоляции – 10^6 Ом). Минимально допустимое значение емкости измерительной цепи при этом подлежит дальнейшему определению, поскольку ранее при диагностировании ДПЗ данный диагностический признак не рассматривался.

При этом следует учитывать ограниченную возможность получения измерительной информации для определения емкости C (связано это с величиной n в формуле (7)) 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 системы регистрации внутриреакторного контроля (СВРК), поскольку одновременно этой системой может регистрироваться большое количество измерительных каналов [19]. Поэтому избыточность информации за счет повышения частоты дискретизации измеряемого сигнала не требуется на действующем энергетическом реакторе типа ВВЭР в штатном режиме использования активационных датчиков прямого заряда, 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, как было указано выше, 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

$$J_0(t) = C(R_3 + R_4) \frac{di_4(t)}{dt} + i_4(t) \left(1 + (R_3 + R_4)(R_5 + R_6) / (R_5 R_6) \right). \quad (8)$$

После определения диагностических параметров на новом уровне мощности реактора находятся уточненные значения параметров измерительной цепи

$$G = (G_1 + G_2)/2 \text{ и } C = (C_1 + C_2)/2,$$

где G_1, C_1 – параметры измерительной цепи ДПЗ, определяемые при работе реактора на первом уровне мощности; G_2, C_2 – параметры измерительной цепи ДПЗ, определяемые при работе реактора на втором уровне мощности.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные по системам (1), (3), (5) расчеты показали, что диапазон работоспособности ДПЗ возможно расширить и снять часть ограничений по сопротивлению изоляции измерительной цепи датчика (рис. 3). 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.

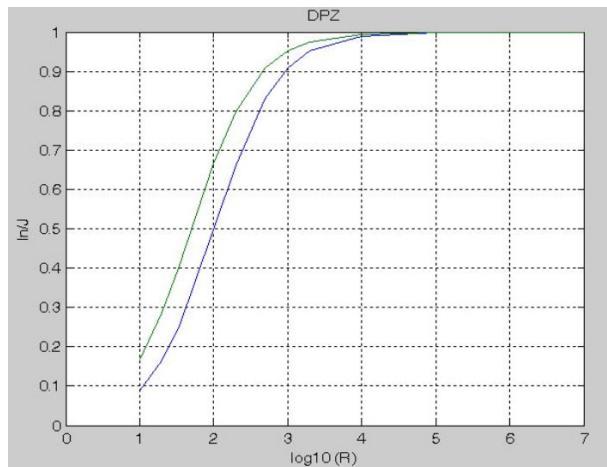


Рис. 3. Зависимость отношения измеряемого тока i_4 к величине генерирующей способности эмиттера ДПЗ J_0 к сопротивлению тока утечки R : верхняя кривая соответствует рабочему режиму, нижняя – диагностическому

Fig. 3. 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

Увеличивая объем диагностической информации путем проведения измерений на разных стационарных состояниях реактора, становится возможным уточнять значения всех введенных диагностических признаков в виде величин C, R и J_0 . Как следствие, уточняется и величина чувствительности датчика S . При этом необходимо заметить, что 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 [20]. В результате этого получается откорректированная временная зависимость $\hat{J}_0(t)$, пропорциональная нейтронному потоку в месте расположения данного 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 Φ_1 , Φ_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.

После нахождения усредненных величин диагностических признаков ДПЗ становится возможным сделать вывод о дальнейшем использовании датчика.

Поскольку генерирующая величина эмиттера ДПЗ чувствительна к нейтронному потоку, после ее корректировки и усреднения по расчетам на двух стационарных уровнях мощности реак-

тора становится возможным сделать переход к определению локальной реактивности в месте установки конкретных ДПЗ, например, при помощи метода обращенного решения уравнения кинетики:

$$\frac{\rho}{\beta} = \Lambda/\beta \frac{1}{\hat{J}_0(t)} \frac{d\hat{J}_0(t)}{dt} + \frac{1}{\hat{J}_0(t)} \int_{-\infty}^t \sum_{i=1}^M \alpha_i \hat{J}_0(t') \exp[-\lambda_i(t-t')] dt', \quad (9)$$

где $\frac{\rho}{\beta}$ – отношение реактивности к эффективной доле запаздывающих нейтронов; Λ – время генерации мгновенных нейтронов; $\hat{J}_0(t)$ – откорректированная усредненная генерирующая способность эмиттера ДПЗ; λ_i – постоянная распада i -й группы ядер – предшественников запаздывающих нейтронов, α_i – нормировочный коэффициент для i -й группы запаздывающих нейтронов, M – число групп запаздывающих нейтронов.

В качестве примера определение реактивности подобным способом можно проиллюстрировать, рассмотрев измерительный канал СВРК с установленными в нем семью датчиками ДПЗ, находящийся в одной тепловыделяющей сборке с перемещающимся стержнем управления и защиты (рис. 4).

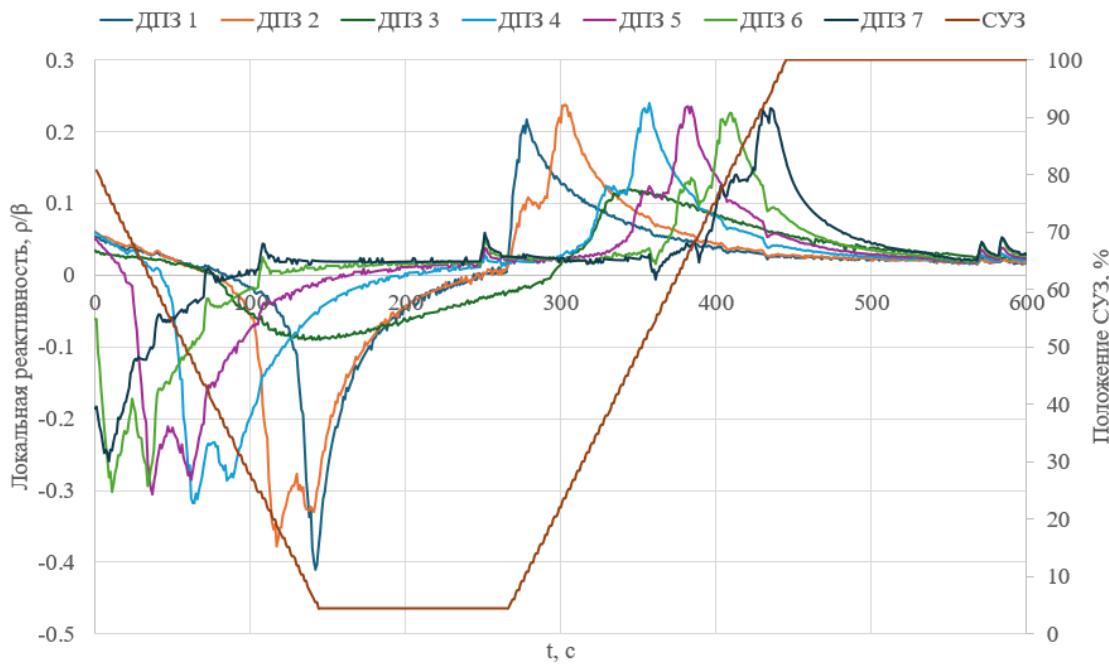


Рис. 4. Зависимость величины реактивности в месте установки измерительного канала с ДПЗ от положения стержня управления и защиты реактора

Fig. 4. Dependence of the reactivity value at the installation site of the measuring channel with the SPND on the position of the reactor control and protection rod

ДПЗ в зависимости от своего расположения в измерительном канале (снизу-вверх, ДПЗ 1 соответствует самому нижнему датчику, ДПЗ 7 – самому верхнему) реагируют на движения стержня. Как следствие, от этого меняется и величина реактивности (что видно на рисунке). В зависимости от того, в какой момент времени стержень при своем движении в активной зоне находится в плоскости конкретного датчика, реактивность в данной точке зоны будет меняться либо быстрее, либо медленнее.

Рассчитанная таким образом величина локальной реактивности может использоваться оператором энергоблока при переходных процессах в дополнение к традиционно используемым при расчете реактивности показаниям ионизационных камер, которые в силу своего расположения за пределами активной зоны имеют меньшую чувствительность к процессам, происходящим в местах установки ДПЗ.

Выводы

Описанный в статье алгоритм позволяет использовать расширенный список диагностических параметров ДПЗ по сравнению с рассматриваемыми в традиционных методах контроля датчиков прямого заряда, входящих в систему внутриреакторного контроля ВВЭР-1200. Использование данных по диагностическим признакам ДПЗ, зафиксированным 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 .

Проведенные расчеты показали, что часть использующихся в традиционных методах контроля ДПЗ ограничений может быть снята. Так, допустимая величина сопротивления изоляции измерительной цепи R может быть пересмотрена в сторону уменьшения на 3-4 порядка, что расширит допустимый диапазон работоспособности ДПЗ.

Определение генерирующей способности эмиттера ДПЗ J_0 контролировать техническое состояние датчика в зависимости от изменения его чувствительности к нейтронному потоку в месте установки позволит четко понимать, зависит ли уменьшение величины выходного токового сигнала ДПЗ от выгорания эмиттера либо же от других причин, что, с вою очередь, позволит повысить надежность ДПЗ.

Уточнение генерирующей способности эмиттера за счет ее корректировки и последующего усреднения по итогам расчетов на разных

стационарных уровнях мощности реактора позволит производить более точное определение размножающих свойств активной зоны в местах установки конкретных ДПЗ.

Библиографические ссылки

1. Мительман М. Г., Розенблум Н. Д. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. М. : Энергоиздат, 1982. 78 с.
2. Мительман М. Г., Розенблум Н. Д., Ерофеев Р. С. Преобразование энергии короткоживущих радиоактивных изотопов // Атомная энергия. 1961. Т. 10, № 1. С. 72.
3. Панкин А. М., Коровкин Н. В. Диагностические признаки при контроле технического состояния ДПЗ ядерного реактора // Атомная энергия. 2017. Т. 122, № 4. С. 235–238.
4. 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 (41). С. 118–125. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-1-14
5. Контроль размножающих свойств активной зоны реактора ВВЭР на основе датчиков прямого заряда / А. М. Панкин, В. С. Костарев, А. А. Калютик, Р. Ю. Легких // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27, № 2 (308). С. 48–55. DOI: 10.14489/td.2024.02. pp.048-055
6. Разработка программного обеспечения для обработки показаний датчиков прямого заряда системы внутриреакторного контроля в переходных режимах / А. М. Панкин, В. С. Костарев, А. А. Калютик, Р. Ю. Легких // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2023. № 3 (33). С. 38–49. DOI: 10.52069/2414-5726_2023_3_33_38
7. 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. DOI: 10.14489/td.2023.03. pp.050-055
8. Курченков, А. Ю. Выгорание родиевого ДПЗ в ВВЭР-1000. Методика определения линейного энерговыделения по показаниям ДПЗ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2010. № 3. С. 16–25.
9. Анализ показаний фоновых жил внутриреакторных детекторов / А. М. Мусихин, Н. В. Мильто, А. Ю. Курченков, Д. Н. Скороходов, Д. А. Каравеев, А. И. Верещака, Д. С. Марков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2022. № 5. С. 102–105.
10. Те С. В., Загребаев А. М. Предиктивная диагностика датчиков контроля в ядерном реакторе // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2023. Т. 12, № 2. С. 103–113. DOI: 10.26583/vestnik.2023.243

11. Аркадов Г. В., Павелко В. И., Финкель Б. М. Системы диагностирования ВВЭР. М. : Наука, 2019. 398 с.
12. 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.
13. Цимбалов С. А. Характеристики родиевого детектора ДПЗ-1М. М. : Институт атомной энергии имени И. В. Курчатова, 1984. 17 с.
14. Цимбалов С. А. Устранение запаздывания показаний бета-эмиссионного детектора в реакторе ВВЭР-1000. М. : Институт атомной энергии имени И. В. Курчатова, 1994. 21 с.
15. Практические возможности и перспективы развития нейтронно-шумовой диагностики активных зон ВВЭР / Г. В. Аркадов, В. И. Павелко, В. П. Поваров, М. Т. Слепов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2022. № 1. С. 74–82.
16. Детектор прямого заряда с эмиттером из металлического гафния в реакторах ВВЭР / А. Е. Калинушкин, А. Ю. Курченков, Д. С. Марков, И. А. Сергеев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2023. № 2. С. 17–19.
17. Экспериментальное исследование гамма-составляющей в сигнале родиевого ДПЗ / В. Н. Кочкин, А. Ю. Курченков, Е. Н. Позырев, Ю. М. Семченков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2023. № 2. С. 12–16.
18. Тепловая мощность ВВЭР, измеренная по показаниям ДПЗ / А. Ю. Курченков, А. И. Ковель, В. А. Мильто, Н. В. Мильто, Д. Н. Скороходов, Н. В. Липин, Д. В. Воробьева // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2018. № 5. С. 63–73.
19. Расчет по программам MCU-PD и ТВС-М показаний детекторов прямой зарядки / А. С. Бикеев, А. Ю. Курченков, Д. А. Шкаровский, В. В. Шкитырь // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 4. С. 55–66. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-4-55-66
20. Математическая модель родиевых ДПЗ и алгоритмы коррекции их инерционности / В. И. Бурьян, Л. В. Козлова, А. С. Кужиль, В. Ф. Шикалов // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2005. № 1 (13). С. 3–9.
- nuclear reactor's SPND]. *Atomnaya energiya*, vol. 122, no. 2, pp. 235–238 (in Russ.).
4. Pankin A.M., Kalyutik A.A., Kostarev V.S. (2023) [Monitoring the technical condition of the intra-zone neutron detector in static and dynamic modes of operation of a nuclear reactor]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system*, no. 1 (41), pp. 118–125. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-1-14 (in Russ.).
5. Pankin A.M., Kostarev V.S., Kalyutik A.A., Legkikh R.Yu. (2024) [Monitoring the breeding properties of the VVER reactor core based on self-powered neutron detectors]. *Kontrol'. Diagnostika*, vol. 27, no. 2 (308), pp. 48–55. DOI: 10.14489/td.2024.02.pp.048-055 (in Russ.).
6. Pankin A.M., Kostarev V.S., Kalyutik A.A., Legkikh R.Yu. (2023) [Development of software for processing readings from self-powered neutron detectors of the in-reactor control system in transient modes]. *Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok*, no. 3 (33), pp. 38–49. DOI: 10.52069/2414-5726_2023_3_33_38 (in Russ.).
7. Pankin A. M., Kalyutik A.A., Kostarev V.S. (2023) [Monitoring the state of self-powered neutron detectors of the in-reactor control system of a nuclear reactor in dynamic modes]. *Kontrol'. Diagnostika*, vol. 26, no. 3, pp. 50–55. DOI: 10.14489/td.2023.03. pp.050-055 (in Russ.).
8. Kurchenkov A.Yu. (2010) [Burnout of rhodium SPND in VVER-1000. Methodology for determining linear energy release based on SPND readings]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, no. 3, pp. 16–25 (in Russ.).
9. Musikhin A.M., Mil'to N.V., Kurchenkov A.Yu., Skorokhodov D.N., Karasev D.A., Vereshchaka A.I., Markov D.S. (2022) [Analysis of background readings of in-reactor detectors]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, no. 5, pp.102-105 (in Russ.).
10. Ten S.V., Azagrebaev A.M. (2023) [Predictive diagnostics of control sensors in a nuclear reactor]. *Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI*, vol. 12, no. 2, pp. 103–113. DOI: 10.26583/vestnik.2023.243 (in Russ.).
11. Arkadov G.V., Finkel' B.M. (2019) *Sistemy diagnostirovaniya VVER* [VVER diagnostic systems]. Moscow: Nauka Publ., 398 p. (in Russ.).
12. Shikalov V.F., Kozlova L.V., Kapitanova L.O. (2023) [Study of the characteristics of high-sensitivity self-powered neutron detectors]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, no. 2, pp. 5–11 (in Russ.).
13. Tsimbalov S.A. (1984) *Kharakteristiki rodievogo detektora DPZ-IM* [Characteristics of the rhodium detector DPZ-1M]. Moscow, Kurchatov Institute, 17 p. (in Russ.).
14. Tsimbalov S.A. (1994) *Ustranenie zapazdyvaniya pokazanii beta-emissionnogo detektora v reaktore VVER-1000* [Elimination of beta emission detector reading delay in VVER-1000 reactor]. Moscow, Kurchatov Institute, 21 p. (in Russ.).

References

1. Mitel'man M.G. (1982) *Zaryadovye detektory ioniziruyushchikh izluchenii* [Charge detectors of ionizing radiation]. Moscow: Energoizdat Publ., 78 p. (in Russ.).
2. Mitel'man M.G., Rozenblyum N.D., Erofeev R.S (1961) [Energy conversion of short-lived radioactive isotopes]. *Atomnaya energiya*, vol. 10, no. 1, pp. 72 (in Russ.).
3. Pankin A.M., Korovkin N.V (2017) [Diagnostic signs when monitoring the technical condition of the

15. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., Slepov M.T. (2022) [Practical possibilities and prospects for the development of neutron-noise diagnostics of WWER active zones]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty*, no. 1, pp. 74-82 (in Russ.).
16. Kalinushkin A.E., Kurchenkov A.Yu., Markov D.S., Sergeev I.A. (2023) [Self-powered neutron detector with hafnium metal emitter in VVER reactors]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, no. 2, pp. 17-19 (in Russ.).
17. Kochkin V.N., Kurchenkov A.Yu., Pozyrev E.N., Semchenkov Yu.M (2023) [Experimental study of the gamma component in the signal of the rhodium SPND]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, no. 2, pp. 12-16 (in Russ.).
18. Kurchenkov A.Yu., Kovel' A.I., Mil'to V.A., Mil'to N.V., Skorokhodov D.N., Lipin N.V., Vorob'eva D.V. (2018) [Thermal power of the VVER measured by the readings of the SPND]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, no. 5, pp. 63-73 (in Russ.).
19. Bikeev A.S., Kurchenkov A.Yu., Shkarovskii D.A., Shkityr' V.V. (2019) [Calculation of self-powered neutron detector readinds using MSU-PD and TVS-M software]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty*, no. 4, pp. 55-66. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-4-55-66 (in Russ.).
20. Bur'yan V.I., Kozlova L.V., Kuzhil' A.S., Shikalov V.F. (2005) [Mathematical model of rhodium SPNDs and algorithms for correcting their inertia]. *Yadernye izmeritel'no-informatsionnye tekhnologii*, no. 1 (13), pp. 3-9 (in Russ.).

Monitoring the Technical Condition of the Self-Powered Neutron Detector of a Water-Cooled Nuclear Reactor in Static and Dynamic Modes

V.S. Kostarev, Postgraduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Reliable operation of self-powered neutron detectors (SPND) included in the in-reactor monitoring system of nuclear reactors, in particular, VVER-1200 water-cooled reactors, allows obtaining an accurate picture of the energy release distribution in the core. In this regard, when monitoring the state of the core, the technical condition assessment of these sensors is important. However, existing monitoring methods do not allow the assessment with sufficient accuracy. The paper considers a method for optimizing the monitoring of the SPND technical condition in static and dynamic modes of the measuring circuit operation, based on determining its capacitance, the emitter generating capacity and the insulation resistance of the sensors measuring cable at several reactor power levels. Based on the sensor readings, a method for assessing the multiplying properties of the core (local reactivity) is proposed. A mathematical model of electrical processes in SPNDs is proposed, based on the equations of their electric circuit elements in static and dynamic operation modes. Based on the proposed model, calculations were performed that showed the possibility of expanding the sensors operability range. An algorithm for increasing the accuracy of determining the sensors diagnostic features is described, based on calculating the sensors electrical circuit at different reactor power levels. The possibility of estimating the local reactivity value at the installation site of SPNDs during transient modes accompanied by the movement of control rods is presented using the method of inverted solution of the reactor kinetics equation. The proposed technique will improve the accuracy of the sensors technical condition diagnosis and expand the range operability by 3-4 orders of magnitude in insulation resistance. Determining the sensors diagnostic features at different reactor power levels will allow refining the emitter generating capacity, which is important for the subsequent use of sensor readings to estimate the reactivity value.

Keywords: neutron flux detector, technical condition monitoring, nuclear reactor, self-powered neutron detector, diagnostic feature, electrical circuit.

Получено 06.05.2025

Образец цитирования

Костарев В. С. Контроль технического состояния датчика прямого заряда водо-водяного ядерного реактора в статических и динамических режимах // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 3. С. 75–83. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-75-83

For Citation

Kostarev V.S. (2025) [Monitoring the Technical Condition of the Self-Powered Neutron Detector of a Water-Cooled Nuclear Reactor in Static and Dynamic Modes]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 3, pp. 75-83. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-75-83 (in Russ.).