


ФГАОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

На правах рукописи



Костарев Вячеслав Сергеевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Специальность 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Институт энергетики, Высшая школа атомной и тепловой энергетики.

- Научный руководитель** – **Панкин Александр Михайлович**, доктор технических наук, доцент, профессор Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
- Официальные оппоненты**
- **Тутнов Игорь Александрович**, доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории исследования старения и продления ресурса ЯЭУ Курчатовского комплекса атомной энергетики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
 - **Русинов Леон Абрамович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации процессов химической промышленности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технологический университет)
- Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

Защита состоится «26» мая 2026 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета https://dissov.guap.ru/defense/kostarev_vs.

Автореферат разослан: «02» апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.02
Кандидат технических наук, доцент



С. А. Назаревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В связи с растущими требованиями к обеспечению безопасности работы ядерных реакторов, а также переходом оператора АЭС России АО «Концерн Росэнергоатом» на систему технического обслуживания и ремонта оборудования и систем по их фактическому состоянию, задачи повышения точности и обеспечения возможности дополнительного контроля элементов активной зоны являются особенно актуальными. Контроль технического состояния изделий атомной техники, включающих, в том числе, и саму активную зону ядерного реактора, связан в первую очередь с обеспечением их надежности и безопасности в течение всего срока службы оборудования АЭС. Для контроля состояния активной зоны используются детекторы нейтронного потока, которые можно разделить на две группы: внезонные детекторы в виде ионизационных камер (ИК), входящие в аппаратуру контроля нейтронного потока (АКНП), находящиеся на периферии активной зоны, и внутризонные – датчики прямого заряда (ДПЗ), входящие в систему внутрореакторного контроля (СВРК), находящиеся в тепловыделяющих сборках в межтвэльном пространстве.

Для оценки технического состояния таких объектов разрабатываются системы технического диагностирования, включающие измерительные приборы и специализированное программное обеспечение. Прямые диагностические измерения не всегда возможны из-за ограничений по номенклатуре измеряемых величин. Поэтому необходимо при разработке алгоритмов диагностирования выходить на косвенное определение (измерение) диагностических признаков контролируемого объекта. Построение математических моделей датчиков прямого заряда позволяет использовать эти датчики для получения измерительной информации, на основе которой могут быть определены характеристики активной зоны в виде локальных коэффициентов реактивности при работе в динамических режимах.

Степень разработанности темы

Вопросы, связанные с диагностикой ДПЗ, рассматривались в ряде работ советских и иностранных ученых на протяжении всего периода использования активационных ДПЗ в составе СВРК ядерных реакторов различного типа, начиная с работ М.Г. Мительмана и последующих работ в НИЦ «Курчатовский институт» и на предприятиях Госкорпорации «Росатом». Эти работы в России и за рубежом связаны с именами В.И. Митина, А.С. Кужиля, В.Ф. Шикалова, Д.И. Конины, А.Ю. Курченкова, В.А. Мильто, А.А. Грибова, В.И. Павелко, В.П. Харина, А.М. Панкина, Н. D. Warren, James Turso, X. Wu и многих других специалистов в области внутрореакторного контроля на основе датчиков прямого заряда.

Однако, в настоящее время преждевременно говорить о создании обобщенной методологии обработки показаний таких детекторов, включающей не только использование экспериментальной информации для контроля состояния активной зоны, но и получение информации для контроля состояния самого детектора нейтронного потока. Для контроля состояния самого ДПЗ необходимо моделировать процессы, происходящие в измерительной цепи датчика с учетом того, что в процессе кампании активной зоны изменяются и параметры элементов, входящих в эту электрическую цепь.

Цель диссертационного исследования

Целью настоящей работы является повышение точности контроля технического состояния элементов активной зоны ядерного реактора путем создания моделей и методик контроля технического состояния детекторов нейтронного потока в виде активационных ДПЗ и твэлов тепловыделяющей сборки (ТВС) активной зоны ядерного реактора, находящихся вблизи этих датчиков.

Объектом исследования являются элементы атомной техники в виде датчиков прямого заряда системы внутрореакторного контроля реактора ВВЭР, отработавшие часть заданного им ресурса и представляемые электрическими цепями.

Предметом исследования являются модели и методики контроля технического состояния элементов активной зоны ядерного реактора.

Задачи исследования

1. Разработка комплексной математической модели описания процессов, происходящих в ДПЗ при его работе, на основе совместного рассмотрения нейтронно-физических процессов в датчике и электрических процессов в его измерительной цепи.

2. Разработка методики контроля технического состояния ДПЗ при повышенном объеме измерительной информации, полученной в стационарных и динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора с целью повышения точности оценки диагностических признаков нейтронного детектора.

3. Разработка методики определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы активной зоны на основе показаний ДПЗ.

Положения, выносимые на защиту

1. **Комплексная математическая модель описания процессов, происходящих в ДПЗ при его работе**, учитывающая совместное описание нейтронно-физических процессов в эмиттере датчика (генераторе β -частиц) и электрических процессов в его измерительной цепи, рассматриваемых при изменяющемся нейтронном потоке в активной зоне ядерного реактора (п. 6 паспорта научной специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»).

2. **Методика контроля технического состояния ДПЗ на основе дополнительной измерительной информации, полученной в стационарных и динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора**, позволяющая повысить точность определения диагностических признаков датчика и элементов его измерительной цепи (п.1 паспорта).

3. **Методика определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы активной зоны на основе показаний ДПЗ**, позволяющая производить расчет локальных коэффициентов реактивности на основе измерительной информации, получаемой от ДПЗ (п.3 паспорта).

Научная новизна работы

1. Представлена **комплексная математическая модель, описания процессов, происходящих в ДПЗ при его работе**, отличающаяся тем, что на основе созданной модели определяются диагностические признаки ДПЗ в виде электрических параметров измерительной цепи, а один из них (генерирующая способность эмиттера) позволяет связать процессы образования электрического тока с нейтронно-физическими характеристиками эмиттера датчика. Такой подход позволяет уточнить значение нейтронного потока вблизи поверхности ДПЗ на момент выгорания активной зоны и, как следствие, повысить точность нахождения чувствительности датчика в режиме кампании активной зоны.

2. Представлена **методика контроля технического состояния ДПЗ на основе дополнительной измерительной информации, полученной в стационарных и динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора**, отличающаяся тем, что предлагается проводить диагностические измерения не только в статических, но и в динамических режимах работы ядерного реактора, что дает возможность существенно повысить объем измерительной информации для нахождения величин диагностических признаков и, следовательно, повысить точность их определения.

3. Представлена **методика определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы активной зоны на основе показаний ДПЗ**, отличающаяся тем, что предлагается использовать измерительную информацию, получаемую от ДПЗ, для оценки размножающих свойств активной зоны ядерного реактора в зоне работы данных датчиков, в виде расчета коэффициентов реактивности на основе метода обращенного решения уравнения кинетики ядерного реактора (ОРУК) по откорректированным токовым сигналам.

Практическая значимость работы

1. Применение **комплексной математической модели описания процессов, происходящих в ДПЗ при его работе**, позволяет увеличить время работоспособности датчика на

30-40 % путем расширения его диапазона использования по величине сопротивления изоляции измерительного кабеля на 3-4 порядка в сторону ее уменьшения.

2. **Методика контроля технического состояния ДПЗ на основе получения дополнительной измерительной информации в стационарных и динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора** позволяет повысить точность определения диагностических признаков ДПЗ ~ в 2 раза.

3. **Методика определения размножающих свойств активной зоны на основе локальных коэффициентов реактивности, вычисленных по показаниям ДПЗ в динамических режимах работы активной зоны** позволяет обеспечить дополнительный контроль величины реактивности активной зоны при изменении положения органов регулирования системы управления и защиты путем использования для этого показаний ДПЗ, как датчиков, размещаемых независимо от ионизационных камер системы управления и защиты.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использованы положения технической диагностики, физики ядерных реакторов, положения теории электрических цепей с сосредоточенными параметрами, теории ошибок измерений, численные методы решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений; основным математическим аппаратом при построении моделей диагностируемых объектов и идентификации их параметров является аппарат теории матриц.

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью применяемого математического аппарата, непротиворечивостью ранее известным положениям, совпадением с экспериментальными результатами измерений, выполненными другими измерительными средствами, а также результатами практической апробации.

Апробация результатов работы

Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и представлялись на международных конференциях и симпозиумах:

- Международный симпозиум «Надежность и качество» (г. Пенза, 2022, 2023, 2024 гг.);
- Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли «Команда» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.);
- Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и электроника» (г. Москва, 2024 г.);
- Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Новые энергетические технологии» – Даниловские чтения (г. Екатеринбург, 2024 г.);
- Физика. Технологии. Инновации. XI Международная молодежная научная конференция, посвященная 75-летию основания Физико-технологического института (г. Екатеринбург, 2024 г.).

Внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены в деятельность АО «Атомэнергопроект», а также используются в учебном процессе ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого в г. Санкт-Петербурге при подготовке студентов в Высшей школе атомной и тепловой энергетики, что подтверждено соответствующими актами.

Личное участие автора в проведении исследований и полученных результатах

Результаты диссертационной работы получены автором лично. Постановка задачи идентификации параметров объекта, представляемого электрической цепью с сосредоточенными параметрами, принадлежит А.М. Панкину.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них: 4 статьи, в том числе 2 без соавторов, в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.2.8, 2 статьи в прочих изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент на изобретение РФ, 3 свидетельства о государственной

регистрации программы для ЭВМ РФ, 6 работ в материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов. Личный вклад автора в каждой работе, опубликованной в соавторстве, составляет не менее 60%.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования, и пяти приложений. Содержание работы изложено на 147 стр. (9.19 п.л.) машинописного текста, включая 25 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, обозначены объект и предмет исследований, определена цель и сформулированы основные направления исследований, определяющие практическую направленность и логическую связь разделов диссертационной работы.

В первом разделе выполнен обзор существующих методов контроля технического состояния систем и оборудования АЭС. Особое внимание обращено на использование основных понятий и определений технической диагностики. Такой подход позволит связать изменение работоспособности контролируемого изделия с изменением его структурных параметров в процессе отработки заданного ресурса, а также прогнозировать наступление предельного состояния, что особенно важно для изделий атомной техники.

Во втором разделе представлена комплексная математическая модель описания процессов, происходящих в ДПЗ при его работе, а также методика контроля технического состояния ДПЗ на основе получения дополнительной измерительной информации в стационарных и динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора.

К числу параметров, на основе которых выполняется контроль технического состояния измерительной цепи ДПЗ относятся сопротивление изоляции цепи ДПЗ, а также генерирующая способность эмиттера датчика. Для нахождения данных параметров используется способ, при котором в двух статических режимах работы измерительной цепи (рабочем и диагностическом, представленным на рисунке 1) получают информацию, на основе которой выполняется определение величины генерирующей способности эмиттера J_0 и величины сопротивления изоляции измерительной цепи R_5 , которая способствует уменьшению полезного тока через нагрузочное сопротивление R_4 .

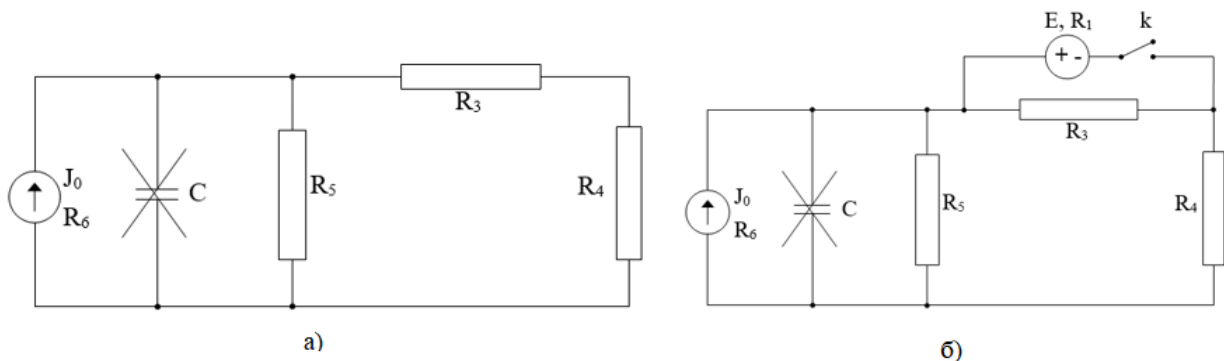


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема замещения измерительной цепи ДПЗ.

а) – рабочий режим, б) – диагностический режим

Введены следующие обозначения: J_0 , R_6 – мощность и внутреннее сопротивление источника тока; R_3 – резистор, необходимый для обеспечения измерительного процесса; R_4 – сопротивление нагрузки, с которого снимается выходной сигнал детектора; R_5 – сопротивление изоляции измерительного кабеля; C – емкость кабеля измерительной цепи, которая в статических режимах представляется как разрыв в электрической цепи.

На основе законов Кирхгофа и уравнений элементов цепи составляется система уравнений

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

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

Для решения задачи диагностирования ДПЗ будем рассматривать протекающий через резистор R_4 ток i_4 , который может быть измерен. Уравнение для определения тока i_4 , записывается следующим образом

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

Для создания еще одного статического режима используется цепь b . Этот режим создается, когда в цепь детектора в определенный момент времени при замыкании ключа k подключается дополнительный источник напряжения, имеющий ЭДС, равную E и внутреннее сопротивление R_1 .

Система уравнений цепи для данного режима будет иметь вид, аналогичный системе (1)

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

Уравнение для определения тока i_4 для данной цепи

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

Подставив в уравнения (1) и (2) измеренные значения тока I_1 и I_2 и решив их совместно, становится возможным найти искомые диагностические признаки J_0 и G в статических режимах работы измерительной цепи ДПЗ при работе ядерного реактора на постоянном уровне мощности.

Поскольку генерирующая способность эмиттера ДПЗ зависит от нейтронного потока Φ в месте установки каждого датчика, включение параметра J_0 в рассматриваемые диагностические признаки позволяет говорить о том, что системы уравнений (1) и (3) являются частью комплексной математической модели описания процессов, происходящих в ДПЗ. Такой подход позволяет учитывать как электрические процессы в измерительной цепи ДПЗ, так и нейтронно-физические процессы, происходящие непосредственно в эмиттере датчика, который выгорает под воздействием нейтронного потока.

Введение комплексной модели описания процессов в нейтронном детекторе позволяет производить уточнение величины электрического тока в цепи детектора, обусловленного непосредственно нейтронным потоком в месте установки ДПЗ на момент проведения диагностических измерений. Следствием такого подхода может быть повышение точности нахождения величины чувствительности датчика S , которая определяется по формуле (5) и меняется с выгоранием активной зоны и выгоранием материала эмиттера датчика.

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

Для проведения расчетов электрической цепи ДПЗ было создано программное обеспечение, расчеты в котором показали, что благодаря использованию представленной математической модели, может быть снят ряд ограничений, введенных ранее в традиционных методах контроля ДПЗ, в частности, для сопротивления изоляции измерительной цепи датчика.

На рисунке 2 представлено отношение измеряемого тока i_4 к величине тока J_0 в зависимости от сопротивления для тока утечки $R=1/G$. Верхняя кривая соответствует диагностическому статическому режиму работы измерительной цепи датчика, нижняя – рабочему статическому.

Результаты расчетов показали, что прежнее ограничение по параметру $R \approx 10^6$ Ом можно уменьшить на 3-4 порядка, что значительно расширяет область работоспособности датчика по этому параметру. Время работоспособности датчика при этом увеличится на 30-40 %. Поскольку ток J_0 , генерируемый эмиттером ДПЗ, не зависит от параметров линий связи, оставшееся ограничение для сопротивления изоляции будет связано лишь с необходимой точностью измерения тока i_4 через нагрузочное сопротивление R_4 .

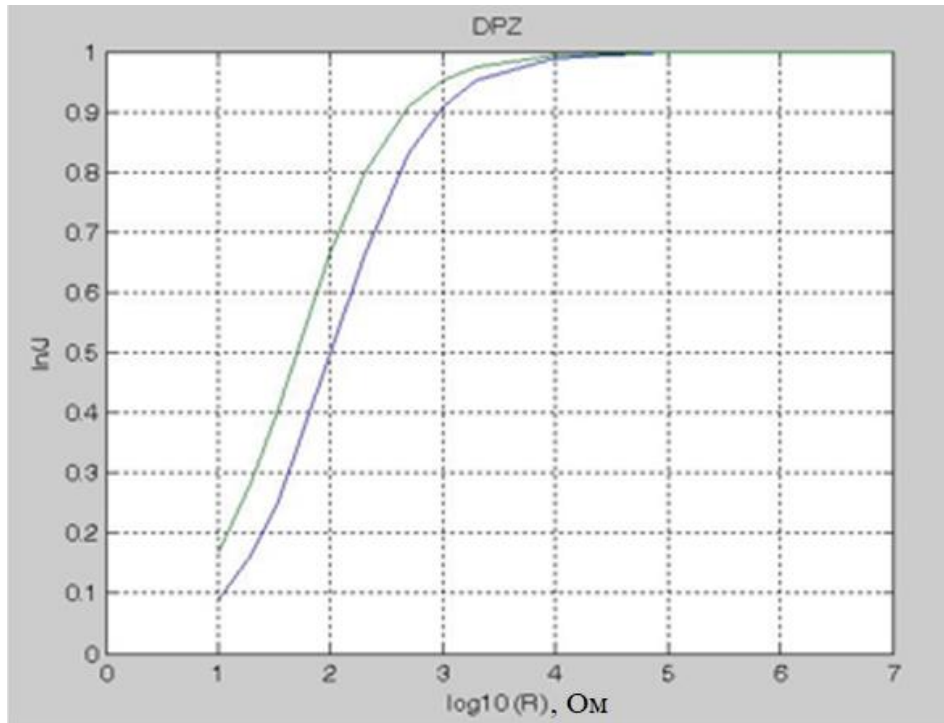


Рисунок 2 – Отношение i_4/J_0 в зависимости от сопротивления тока утечки R

При динамических режимах работы измерительной цепи ДПЗ в качестве дополнительного диагностического признака предлагается определять емкость кабеля измерительной цепи C . При недопустимом изменении этой величины в процессе работы ядерного реактора может иметь место потеря работоспособности рассматриваемого ДПЗ.

В качестве динамического режима используется переходный процесс в измерительной цепи датчика, который создается при включении источника ЭДС путем замыкания ключа k по схеме, представленной на рисунке 3.

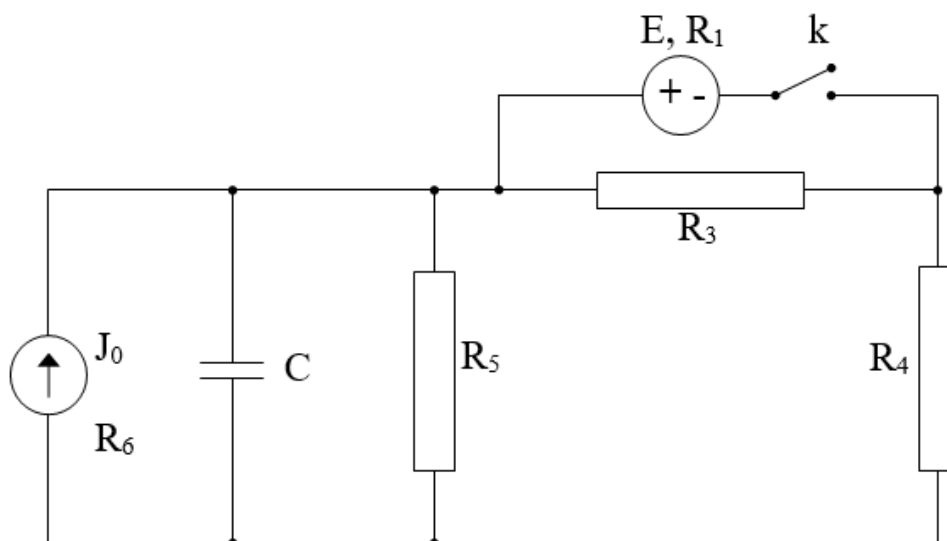


Рисунок 3 – Эквивалентная электрическая схема замещения измерительной цепи датчика при

использовании переходного процесса (динамический режим)

Для определения емкости кабеля используется следующая система уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 - i_3 + i_4 = 0 \\ i_2 + i_4 + i_5 - i_6 = 0 \\ u_1 + u_3 = 0 \\ -u_1 - u_2 + u_4 = 0 \\ -u_2 + u_5 = 0 \\ u_2 + u_6 = 0 \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} u_1 = i_1 R_1 - E \\ i_2 = C \frac{du_2}{dt} \\ u_3 = R_3 i_3 \\ u_4 = R_4 i_4 \\ u_5 = R_5 i_5 \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6 \end{array} \right. \quad (6)$$

В эту систему входит величина тока $i_4=i_4(t)$, измеряемая как функция от времени в переходном процессе в электрической цепи. Величина емкости C в случае получения зависимости $i_4=i_4(t)$, подставляемой в систему (6) в дискретные моменты времени t_i , записывается в виде выражения

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

По результатам измерения тока i_4 в статических и динамических режимах измерительной цепи ДПЗ, могут быть определены значения всех введенных диагностических признаков. При известном значении нейтронного потока Φ в месте установки датчика по уточненному значению генерирующей способности эмиттера ДПЗ J_0 по формуле (5) получается уточненное значение чувствительности датчика.

После этого возможно сделать вывод о техническом состоянии датчика путем сравнения фактических значений диагностических признаков с предельно допустимыми ($S=21 \cdot 10^{-20}$ (А·см²·с)/(м·нейтр), $R \approx 10^6$ Ом, допустимое значение емкости зависит от марки кабеля и подлежит дальнейшему определению).

Однако, следует отметить, что в связи с тем, что стандартная частота регистрации информации в СВРК составляет одну секунду, возможность получения информации о величине емкости измерительной цепи ограничена (что связано с величиной n в формуле (4)). В современных версиях СВРК, используемых на ВВЭР-1200, частота регистрации может настраиваться, однако, при ее изменении соответствующим образом увеличатся и объемы получаемых и обрабатываемых данных о состоянии активной зоны, что не требуется в штатных режимах работы. При этом недостаточность объема информации о величине емкости приводит к росту погрешности при ее расчете.

В связи с этим предлагается дополнительно определять контролируемые параметры ДПЗ путем проведения диагностических измерений в переходных режимах работы ядерного реактора. Для этого предлагается использовать информацию, получаемую при двух статических режимах работы реактора на уровнях мощности N_1 и N_2 и в динамическом режиме работы активной зоны при переходе с уровня мощности N_1 на уровень мощности N_2 . Это позволит уточнять величины генерирующей способности, сопротивления изоляции и емкости цепи, не увеличивая при этом объем измерительной информации, обрабатываемой СВРК.

Величина J_0 в динамическом режиме работы активной зоны рассматривается как функция от времени: $J_0=J_0(t)$

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

После определения параметров измерительной цепи ДПЗ, а также измерения нейтронного потока на обоих рассматриваемых уровнях мощности реактора, определяются уточненные значения диагностических признаков ДПЗ:

$$R = (R_1 + R_2)/2, C = (C_1 + C_2)/2, S = (S_1 + S_2)/2, \quad (9)$$

где индекс «1» соответствует уровню мощности N_1 , индекс «2» – уровню мощности N_2 .

Представленная методика, на которую был получен патент на изобретение РФ, позволяет

повысить точность определения диагностических признаков ДПЗ ~ в 2 раза.

В третьем разделе представлена методика определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы активной зоны на основе показаний ДПЗ.

ДПЗ представляет собой генератор электрического тока, в котором появившиеся в процессе распада материала эмиттера β -частицы (электроны) покидают эмиттер, унося с собой отрицательный заряд. Таким образом, образуется разность потенциалов между эмиттером и коллектором датчика, которая и создает электрический ток во внешней цепи нейтронного детектора. Этот ток измеряется, и измеренная величина является основой (как об этом было указано выше) для определения величины нейтронного потока в месте расположения ДПЗ в активной зоне. По полученным результатам далее вычисляется распределение плотности энерговыделения по объему активной зоны ядерного реактора.

Перед установкой в активную зону ДПЗ помещаются в нейтронные измерительные каналы (в каждом канале размещается 7 датчиков), которые, в свою очередь, помещаются в определенные тепловыделяющие сборки (ТВС), рассредоточенные по активной зоне (рисунок 4).

Желтым цветом на рисунке обозначены ТВС, в которых находятся нейтронные измерительные каналы с ДПЗ. Помимо этого, на рисунке указано расположение ионизационных камер (ИК) системы управления и защиты (СУЗ), находящихся за пределами активной зоны. Обведенными цифрами на рисунке показаны порядковые номера органов регулирования системы управления и защиты реактора ВВЭР (ОР СУЗ), не обведенными – порядковые номера нейтронных измерительных каналов с ДПЗ.

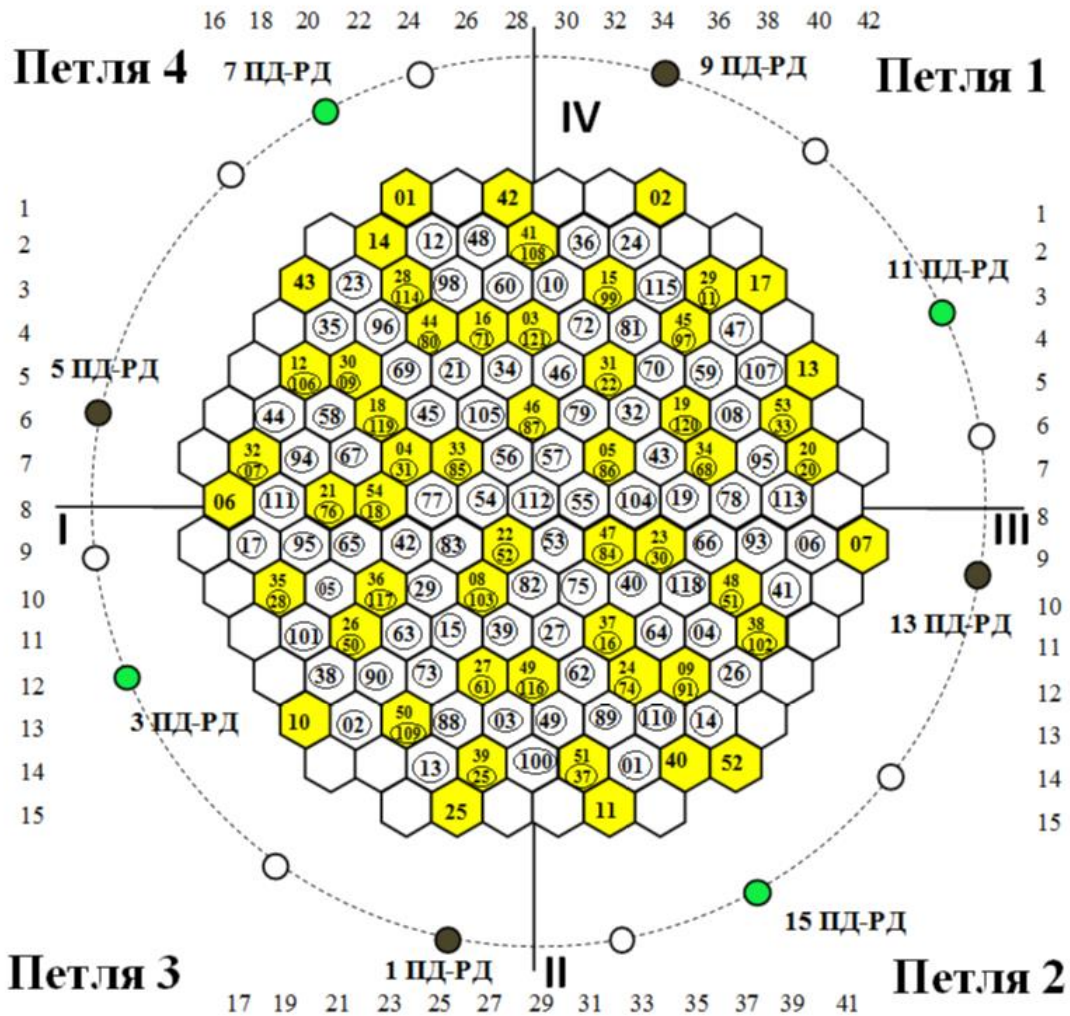


Рисунок 4 – Картограмма расположения каналов с ДПЗ и ИК реактора ВВЭР-1200

Одним из параметров активной зоны, подлежащих постоянному контролю в ходе работы реактора, является реактивность – степень отклонения реактора от критического состояния. Если данный параметр положителен, то реактор находится в надкритическом состоянии и его нейтронная мощность растет, если отрицателен – в подкритическом и его нейтронная мощность падает. Контроль реактивности при работе реактора важен, поскольку в ходе эксплуатации реактора необходимо не допускать его неконтролируемого разгона, что может привести к нарушению пределов безопасной эксплуатации установки.

Для контроля реактивности на ядерных реакторах (в частности, на реакторах типа ВВЭР) используется комплекс аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП). Традиционно, реактивность в АКНП определяется на основе показаний ионизационных камер, расположенных в измерительных каналах (по 3 ИК в канале) за пределами активной зоны (вследствие своего большого размера). При этом, для ее расчета на основе выходного токового сигнала ИК применяется цифровой реактиметр, математическая модель которого основана на методе ОРУК (8)

$$\frac{\rho}{\beta_{эфф}} = \frac{\Lambda}{\beta_{эфф} P(t)} \frac{1}{dt} \frac{dP(t)}{dt} + \frac{1}{P(t)} \int_{-\infty}^M \alpha_i P(t') \exp[-\lambda_i(t - t')] dt', \quad (8)$$

где: $\rho/\beta_{эфф}$ – реактивность в относительных единицах, Λ – время генерации мгновенных нейтронов, $\beta_{эфф}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов, $P(t)$ – мощность реактора, 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 связи с растущими требованиями к обеспечению безопасности работы ядерных реакторов, особенно актуальным является вопрос обеспечения резервирования (физического разнообразия) измерений, при помощи которых осуществляется контроль состояния активной зоны (в частности, реактивности) поскольку имеется большая потребность создания физически независимого канала контроля реактивности в дополнение к ИК АКНП.

Благодаря своему расположению непосредственно внутри активной зоны, показания ДПЗ могут быть использованы для расчета и контроля размножающих свойств активной зоны реактора (реактивности) как непосредственно в месте установки конкретных датчиков, так и по активной зоне в целом, а принадлежность датчиков прямого заряда к системе внутриреакторного контроля, независимой от АКНП, позволяет говорить о том, что будет обеспечено резервирование контроля реактивности.

Основываясь на полученных локальных коэффициентах реактивности, можно сделать вывод о распределении размножающих свойств по объёму активной зоны. Для этого необходимо вычислить интегральную величину реактивности, которую можно получить, если просуммировать по объёму активной зоны локальные коэффициенты $\rho_i(t)$, умноженные на соответствующие весовые коэффициенты.

Определение локальных коэффициентов реактивности при помощи описанной выше методики в данном случае является преимуществом использования ДПЗ, поскольку ионизационные камеры могут рассчитывать лишь интегральную реактивность. Для определения величины реактивности активной зоны, определяемой при изменяющемся нейтронном потоке в месте расположения каждого ДПЗ на основе измеряемого этим датчиком электрического тока, предлагается использовать программное обеспечение, реализующее математическую модель на основе метода ОРУК (8).

В четвертом разделе методика определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы активной зоны на основе показаний ДПЗ была использована для обработки измерительной информации, полученной из СВРК ядерного реактора ВВЭР-1200 ЛАЭС-2 на примере двух переходных режимов работы, в которых происходило перемещение ОР СУЗ, что сопровождалось внесением дополнительной реактивности в активную зону.

На рисунке 5 представлено положение перемещающихся органов регулирования в режиме 1 (здесь и далее нумерация органов регулирования соответствует рисунку 4). Положение 100%

соответствует стержню, полностью извлеченному из активной зоны, 0% – стержню, полностью погруженному в активную зону.

В режиме 1 перемещались ОР СУЗ 109 и 116-121 групп. Стержни групп 1-10 находились в крайнем верхнем положении. Из группы 11 перемещался первый стержень (109 в общей нумерации), из группы 12 перемещались стержни 1-6 (116-121 соответственно). В режиме 1 переходный процесс происходил при работе активной зоны на 38-39% от номинальной мощности (номинальная мощность – 3200 МВт тепл.) и длился около 20 минут.

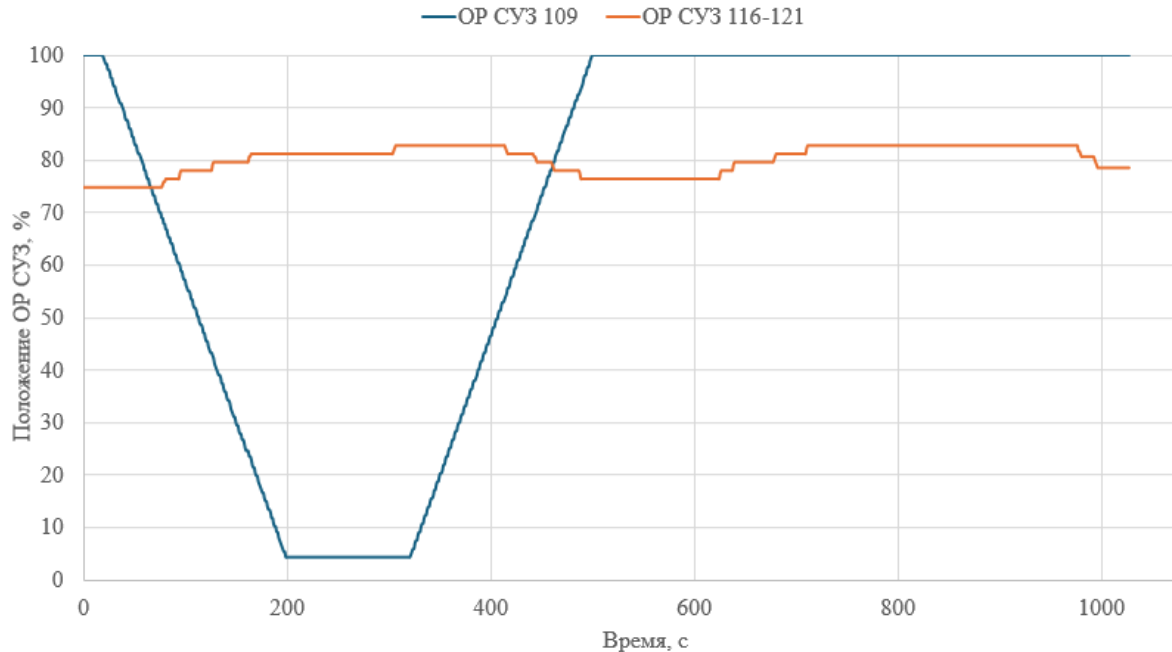


Рисунок 5 – Перемещение ОР СУЗ в режиме 1

В режиме 2 производилось перемещение ОР СУЗ 116-121 (рисунок 6).

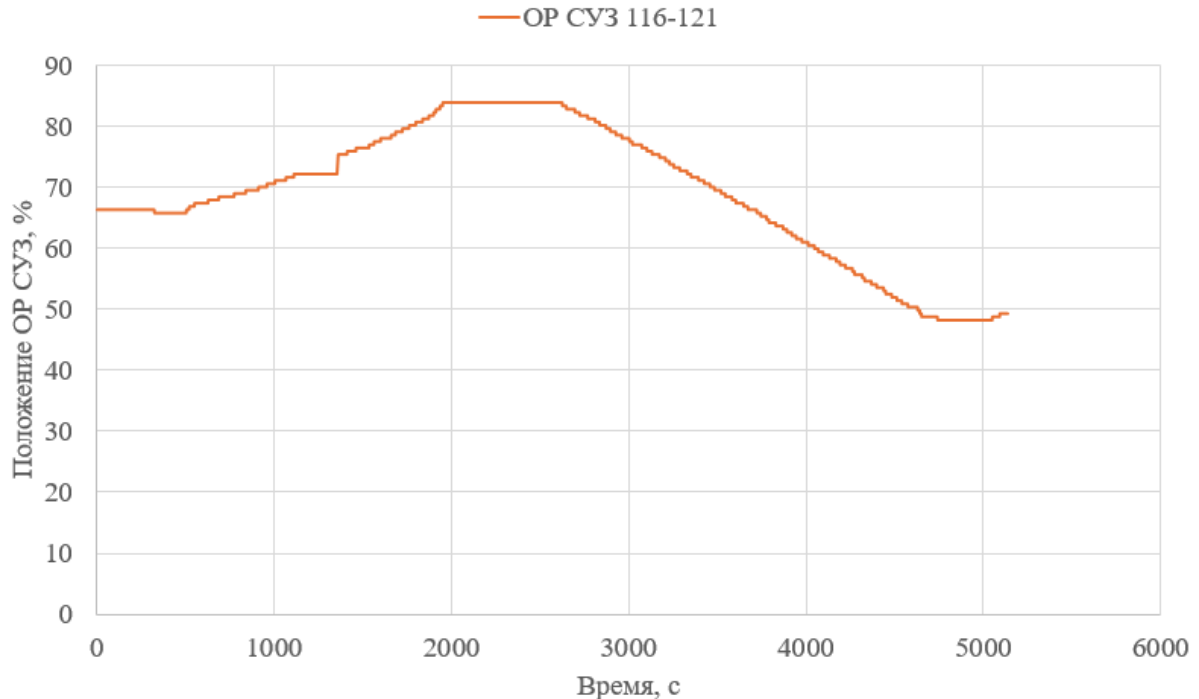


Рисунок 6 – Перемещение ОР СУЗ в режиме 2

Переходный процесс происходил при повышении мощности активной зоны от 0 до $\approx 40\%$ от номинальной и длился около 90 минут.

Используя предложенную в разделе 3 методику, становится возможным определить значения локальных коэффициентов реактивности $\rho_i(t)$ во время переходных процессов в месте установки конкретных ДПЗ. Для этого используется программа моделирования кинетики реактора, в которой путем использования метода ОРУК на основе токовых сигналов ДПЗ определяется локальная реактивность. Результаты расчетов для режимов 1 и 2 представлены на рисунках 7 и 8. Реактивность здесь и далее приведена в единицах $\rho/\beta_{эфф}$ (отношении реактивности к доле запаздывающих нейтронов), нумерация ДПЗ приведена от низа активной зоны. Для наглядности на рисунках показана реактивность, определенная по показаниям трех датчиков канала: ДПЗ 1 соответствует самому нижнему датчику в канале, ДПЗ 4 – датчику, находящемуся в середине канала, ДПЗ 7 – самому верхнему.

При численном решении обращенного уравнения кинетики реактора используется рекуррентная формула, выведенная из предположения, что при $t < t_0$, где t_0 – начало переходного процесса, $i_{ДПЗ} = const$, реактивность в начальный момент времени всегда будет равна 0, а затем, по мере вычислений, начинает выходить на корректные показания. По этой причине начало переходного процесса было исключено из итоговых результатов.

Из графика, соответствующего режиму 1 (рисунок 7), видно, что на начальном этапе, по мере погружения стержня в активную зону, реактивность резко снижается. Такая динамика объясняется сильным эффектом поглощения нейтронов, которым обладают стержни, по мере погружения они вносят в активную зону отрицательную реактивность. Наибольшая чувствительность к движению стержня в этот момент наблюдается у верхнего ДПЗ.

При обратном перемещении органа регулирования реактивность начинает постепенно возрастать. На этом этапе наиболее чувствительным становится ДПЗ 1. Однако по мере движения стержня вверх заметно усиливается реакция на его перемещение и со стороны ДПЗ 7. Когда стержень достигает крайнего верхнего положения, реактивность снова начинает снижаться, постепенно стабилизируясь.

Примерно такое же поведение в изменении реактивности наблюдается и для режима 2, в частности, во второй половине переходного процесса, где, по мере погружения стержня в зону и внесения отрицательной реактивности на это значительно сильнее начинает реагировать ДПЗ 1. Однако, режим 2 отличается более резкими колебаниями реактивности.

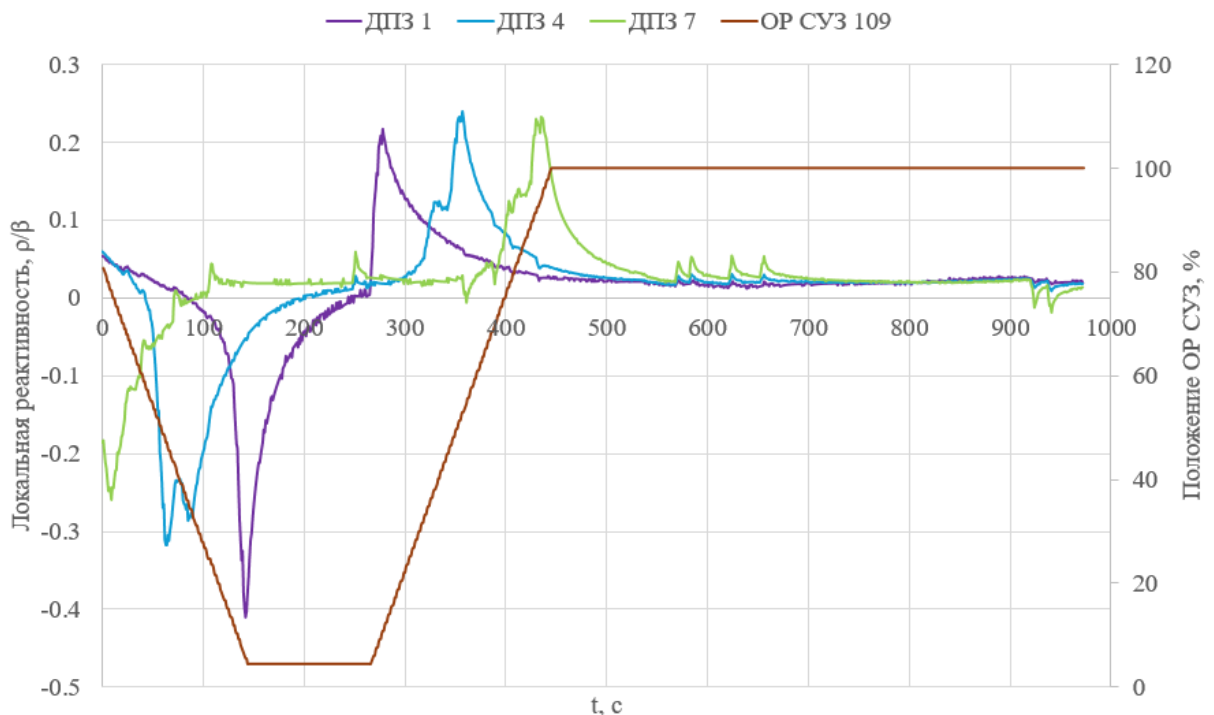


Рисунок 7 – Изменение локальных коэффициентов реактивности по показаниям ДПЗ и перемещения ОР СУЗ во времени в режиме 1



Рисунок 8 – Изменение локальных коэффициентов реактивности по показаниям ДПЗ и перемещения ОР СУЗ во времени в режиме 2

После определения локальных реактивностей по показаниям ДПЗ становится возможным перейти к определению интегральной реактивности, характеризующей отклонение от критического состояния всего объема активной зоны.

Для определения интегральной реактивности просуммируем локальные коэффициенты реактивности, определенные по показаниям ДПЗ, умноженные на весовые коэффициенты по объему активной зоны. Весовые коэффициенты подбираются исходя из геометрии активной зоны ВВЭР-1200 и координат нахождения соответствующих датчиков.

Результаты расчетов интегральной реактивности ДПЗ, а также реактивность, определенная по показаниям четырех ИК (нумерация ИК приведена согласно рисунку 4) для режимов 1 и 2 представлены на рисунках 9 и 10.

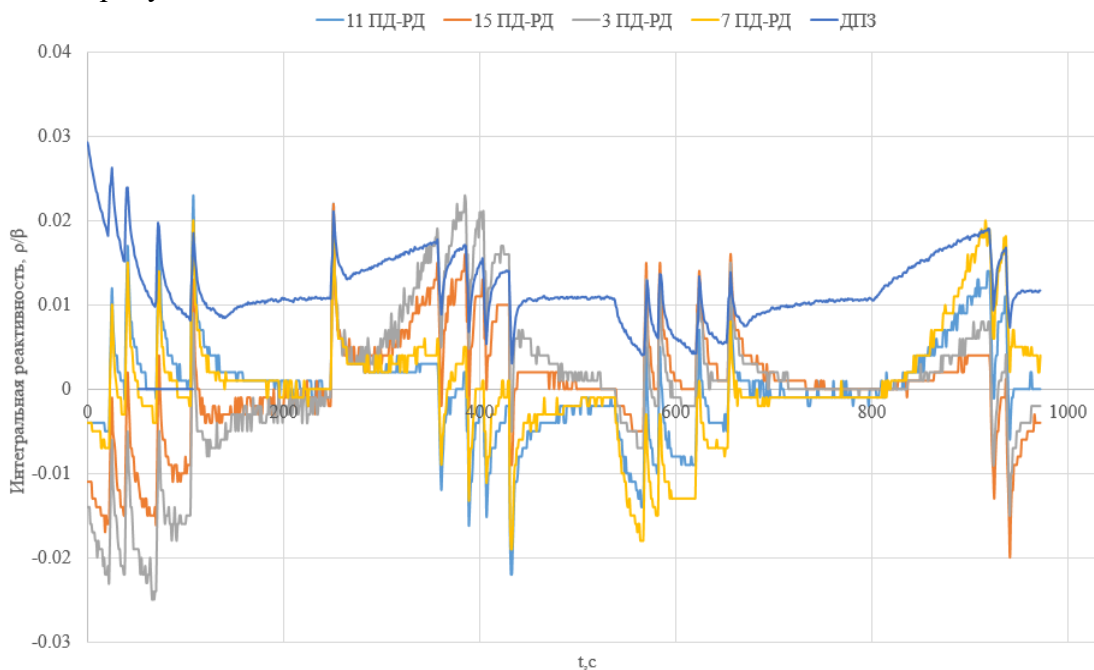


Рисунок 9 – Изменение интегральной реактивности по показаниям ДПЗ и ИК в режиме 1

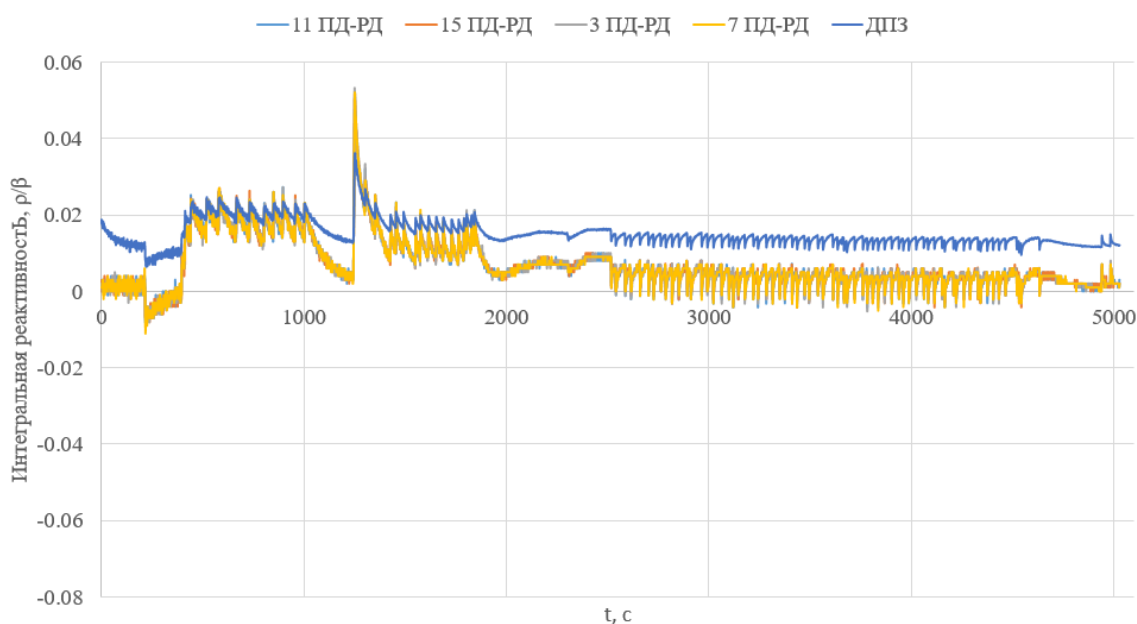


Рисунок 10 – Изменение интегральной реактивности по показаниям ДПЗ и ИК в режиме 2

Из рисунков 9 и 10 видно, что характер кривых изменения интегральной реактивности по ДПЗ и ИК совпадает, но реактивность, рассчитанная на основе ДПЗ, несколько превышает по величине значения реактивности, полученные по показаниям ионизационных камер. Различия в кривых реактивности, полученных по данным ДПЗ для режимов 1 и 2, могут быть обусловлены временем переходного процесса (режим 1 протекал значительно быстрее режима 2), а также возможной разницей в загрузке активной зоны между двумя режимами.

Различия в показаниях ИК и ДПЗ можно объяснить как необходимостью последующего уточнения весовых коэффициентов, используемых в расчете, так и тем, что ДПЗ, благодаря их равномерному распределению в активной зоне, как по радиусу, так и по высоте активной зоны, обладают более высокой чувствительностью к изменениям нейтронного поля по сравнению с ионизационными камерами, которые расположены за пределами активной зоны и наиболее чувствительны к изменению нейтронного поля в периферийных ТВС. В случае неравномерного распределения нейтронного поля при переходных режимах ионизационные камеры, находящиеся в областях с пониженной плотностью нейтронов, могут выдавать значения реактивности ниже среднего по активной зоне.

Однако в целом можно сделать вывод, что вычисленная на основе показаний ДПЗ величина реактивности (как локальная, так и интегральная) может использоваться на АЭС при переходных режимах, поскольку при использовании ДПЗ становится возможным учесть нейтронно-физические процессы, происходящие в тех областях активной зоны реактора, к которым ионизационные камеры будут обладать меньшей чувствительностью.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации, и представлены возможности их дальнейшего использования.

В приложениях А, Б и В представлены тексты зарегистрированных расчетных программ для ЭВМ.

В приложении Г представлен полученный патент на изобретение РФ.

В приложении Д представлены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложено новое научно обоснованное техническое решение повышения точности контроля технического состояния элементов активной зоны ядерного реактора путем создания моделей и методик контроля технического состояния детекторов нейтронного потока в виде активационных ДПЗ и тепловыделяющих элементов, находящихся вблизи этих датчиков.

Представленные модели и методики являются актуальными в связи растущими требованиями к уровню безопасности ядерных реакторов (в частности, к обеспечению физического разнообразия контроля элементов активной зоны), а также с переходом оператора АЭС России АО «Концерн Росэнергоатом» к системе технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию систем и оборудования.

1. Применение представленной комплексной математической модели описания процессов, происходящих в ДПЗ при его работе, позволило производить учет как нейтронно-физических параметров эмиттера ДПЗ, так и возможного изменения параметров элементов в измерительной цепи детектора, и увеличить время работоспособности датчика на 30-40 % путем расширения его диапазона использования по величине сопротивления изоляции измерительного кабеля на 3-4 порядка в сторону ее уменьшения.

2. Представленная методика контроля технического состояния ДПЗ на основе дополнительной измерительной информации, полученной в стационарных и динамических режимах работы активной зоны ядерного реактора позволила повысить точность определения диагностических признаков датчика более чем в 2 раза.

3. Представленная методика определения размножающих свойств активной зоны (локальной реактивности) в динамических режимах работы ядерного реактора на основе показаний ДПЗ, позволила проводить дополнительный контроль величины реактивности активной зоны при изменении положения органов регулирования путем использования ДПЗ, как датчиков дополнительной информации, независимой, в том числе, от показаний ионизационных камер СУЗ.

При условии интеграции представленных моделей и методик в СВРК АЭС появляется дополнительная возможность осуществлять мониторинг технического состояния элементов активной зоны с учетом их фактического состояния. Помимо этого, оператор энергоблока сможет производить оценку локальной и интегральной величин реактивности в переходных режимах работы ВВЭР-1200, основываясь на показаниях ДПЗ.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

В рецензируемых научных журналах из перечня ВАК по специальности 2.2.8:

1. **Костарев В. С.** Контроль технического состояния датчика прямого заряда водородного ядерного реактора в статических и динамических режимах / В. С. Костарев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2025. – Т. 27. – № 3. – С. 75-83.

2. **Костарев В. С.** Разработка программного обеспечения для контроля технического состояния датчика прямого заряда ядерного реактора ВВЭР-1200 в статических и динамических режимах / В. С. Костарев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 7. – №5. – С. 13-25.

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

4. **Костарев В. С.** Контроль размножающих свойств активной зоны реактора ВВЭР на основе датчиков прямого заряда / А. М. Панкин, В. С. Костарев, А. А. Калютник, Р. Ю. Легких // Контроль. Диагностика. – 2024. – Т. 27. – № 2 (308). – С. 48-55.

Публикации в Прочих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:

5. **Костарев В. С.** Разработка программного обеспечения для обработки показаний датчиков прямого заряда системы внутриреакторного контроля в переходных режимах / А. М. Панкин, В. С. Костарев, А. А. Калютник, Р. Ю. Легких // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2023. – № 3 (33). – С. 38-49.

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

В докладах и тезисах докладов на конференциях и международных семинарах:

7. **Костарев В. С.** О возможности определения размножающих свойств активных зон реакторов ВВЭР на основе внутризонных датчиков нейтронного потока / В. С. Костарев, А. М.

Панкин // X международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда-2023». Санкт-Петербург. 28 июня-01 июля 2023 г. Сборник тезисов X международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда-2023». – Санкт-Петербург: ООО «Издательский дом Недра», 2023. – Ч. 1. – С. 172-173.

8. **Костарев В. С.** О возможности контроля размножающих свойств активной зоны водо-водяного реактора на основе показаний детекторов прямого заряда / В. С. Костарев, А. М. Панкин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тридцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. 29 февраля-02 марта 2024 г. г. Москва. Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Москва: ООО «Центр полиграфических услуг РАДУГА», 2024. – С. 864.

9. **Костарев В. С.** Обработка показаний ДПЗ системы ВРК реакторов ВВЭР во время переходных процессов при помощи специализированного ПО / В. С. Костарев, А. М. Панкин // Физика. Технологии. Инновации. XI Международная молодежная научная конференция, посвященная 75-летию основания Физико-технологического института 20-25 мая 2024 г. г. Екатеринбург. тезисы докладов XI Международной молодежной научной конференции, посвященной 75-летию основания Физико-технологического института (Екатеринбург, 20–25 мая 2024 г.) – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2024. – С. 60-61.

10. **Костарев В. С.** Контроль технического состояния и остаточного ресурса дискретно-непрерывных объектов / А. М. Панкин, А. А. Калюттик, В. С. Костарев // Международный симпозиум «Надежность и качество». 23-31 мая 2022 г. г. Пенза. Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 2022. – Т.1. – С. 13-14.

11. **Костарев В. С.** Программное обеспечение для обработки показаний датчиков прямого заряда ядерного реактора / А. М. Панкин, В. С. Костарев // Международный симпозиум «Надежность и качество». 27 мая-01 июня 2024 г. г. Пенза. Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 2024. – Т.1. – С. 326-327.

12. **Костарев В. С.** Создание программного обеспечения для контроля технического состояния детекторов нейтронного потока ядерного реактора / В. А. Василенко, А. М. Панкин, В. С. Костарев // Международный симпозиум «Надежность и качество». 29 мая-02 июня 2023 г. г. Пенза. Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 2023. – Т.1. – С. 299-305.

Патент на изобретение:

13. **Патент № RU2848704C1 Российская Федерация, G21C 17/00 (2006.01).** Способ контроля технического состояния элементов измерительной цепи датчика прямого заряда системы внутриреакторного контроля ядерного реактора в статических и динамических режимах: № 2025107429: заявлено 27.03.2025: опубликовано 21.10.2025 / Костарев В.С., Панкин А.М., Калюттик А.А.; заявитель ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – 21 с.

Разработанное программное обеспечение зарегистрировано в следующих документах:

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683165 Российская Федерация. Программа для определения составляющих токового сигнала родиевых датчиков прямого заряда: № 2023682280: заявлено 27.10.2023: опубликовано 02.11.2023 / Костарев В. С., Панкин А. М., Калюттик А. А.; правообладатель ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665402 Российская Федерация. Программа для обработки результатов внутриреакторных измерений по датчикам прямого заряда: № 2024665402: заявлено 04.07.2024: опубликовано 12.07.2024 / Костарев В. С., Панкин А. М., Калюттик А. А.; правообладатель ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688511 Российская Федерация. Программа для определения параметров измерительной цепи датчика прямого заряда ядерного реактора в диагностических целях на основе экспериментальной и расчетной информации: № 2024687010: заявлено 11.11.2024: опубликовано 28.11.2024 / Костарев В. С., Панкин А. М., Калютик А. А.; правообладатель ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.