



Морозова Ольга Ивановна

**МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРИЕМЛЕМОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯЭУ С УЧЕТОМ
ПРОГРАММ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА**

Специальность 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Обнинский институт атомной энергетики – филиале федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (ИАТЭ НИЯУ МИФИ).

Научный руководитель: **Антонов Александр Владимирович**,
д.т.н., профессор, главный эксперт Международного центра подготовки персонала Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Техническая академия Росатома»

Официальные оппоненты: **Острейковский Владислав Алексеевич**,
д.т.н., профессор, профессор кафедры информатики и вычислительной техники бюджетного учреждения высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет»

Петров Сергей Афанасьевич,
д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского центра (кораблестроения и эксплуатации) Научно-исследовательского института (кораблестроения и вооружения) ВМФ Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» Министерства обороны Российской Федерации

Шиверский Евгений Александрович,
к.т.н., начальник отдела вероятностных анализов безопасности и риска АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала»

Защита состоится «09» «декабря» 2020 года в ____ ч. ____ мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.03 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н.



Куликов Евгений Геннадьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На сегодняшний день энергоблоки атомных станций (ЭБ АС) – это, прежде всего, промышленные сооружения, которые предназначены для выработки электроэнергии, и наличие которых в топливно-энергетическом комплексе должно быть экономически выгодно и оправдано. Если экономические показатели эксплуатации ЭБ АС не являются удовлетворительными, то использование ЭБ АС в топливно-энергетическом комплексе нецелесообразно. Следовательно, с позиции материальной выгоды от использования ЭБ АС, повышение показателей их экономической эффективности является основной задачей эксплуатации.

С другой стороны, ЭБ АС – это сложные технические системы, на которые оказывают влияние разнообразные факторы природного и техногенного характера, которые сами по себе оказывают влияние на окружающую среду и функционирование которых потенциально связано с технологическими, экологическими, экономическими, социальными, политическими и др. ущербами, наступающими в случае реализации на ЭБ АС аварий, связанных с повреждением ядерного топлива (ЯТ) и, в особенности, с выходом радионуклидов (РН) в окружающую среду. В этой связи предметом особого внимания является обеспечение безопасности ЭБ АС.

Таким образом, использование ЭБ АС в качестве источников электроэнергии сопряжено с одновременным выполнением следующих условий: обеспечение безопасности ЭБ АС как сложных технических систем, связанных с принципиальной возможностью наступления событий разрушительного характера, характеризующимися радиоактивным заражением биосферы и облучением людей; и повышение экономической приемлемости эксплуатации (ПЭ) ЭБ АС как объектов топливно-энергетического комплекса.

В существующей практике проектирования и эксплуатации ЭБ АС эти задачи решаются по отдельности: при решении вопросов обеспечения безопасности ЭБ АС вопросы обеспечения высокой ПЭ ЭБ АС во внимание не принимаются и, наоборот, в стремлении обеспечить высокую ПЭ, априори принимается, что требуемый уровень безопасности (УБ) обеспечивается всегда. Причиной этого является отсутствие методик, позволяющих комплексно оценивать взаимовлияние экономических и технологических факторов.

В этой связи актуальными являются вопросы, связанные с одновременным обеспечением как ПЭ ЭБ АС, так и с обеспечением требуемого УБ ЭБ АС.

Все вышесказанное привело автора исследования к выбору:

- **объекта исследования:** ЭБ АС, рассматриваемые как сложные технические системы, в отношении оборудования которых применяются различные стратегии технического обслуживания и ремонта (ТОиР);
- **предмета исследования:** методы и модели количественной оценки УБ ЭБ АС при реализации мероприятий, направленных на повышение ПЭ ЭБ АС;
- **цели исследования:** обеспечение требуемого УБ ЭБ АС при одновременном повышении ПЭ ЭБ АС посредством разработки методов выбора стратегий эксплуатации оборудования ЭБ АС при проведении плановых и внеплановых ТОиР.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ процессов функционирования ЭБ АС в качестве объекта топливно-энергетического комплекса и способов повышения ПЭ ЭБ АС с учетом обеспечения требуемого УБ ЭБ АС во всех режимах функционирования последнего.
2. Проведен анализ методов определения УБ ЭБ АС и методов оценки рисков, связанных с эксплуатацией ЭБ АС.
3. Разработан способ количественного учета зависимости УБ ЭБ АС от конфигураций обо-

рудования ЭБ АС во время проведения плановых и внеплановых ТОиР оборудования для повышения ПЭ ЭБ АС при работе ЭБ АС на различных уровнях мощности.

4. Разработаны подходы к формированию практических рекомендаций по повышению ПЭ ЭБ АС посредством сокращения времен простоев во внеплановых ТОиР оборудования с сохранением требуемого УБ ЭБ АС.

5. Разработаны подходы к формированию практических рекомендаций по повышению ПЭ ЭБ АС посредством сокращения времен простоев в плановых ТОиР – в планово-предупредительных ремонтах (ППР) – оборудования с сохранением требуемого УБ ЭБ АС.

6. Разработаны логико-вероятностные математические модели (ММ) систем ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000, учитывающие различные конфигурации оборудования ЭБ АС при проведении плановых и внеплановых ТОиР.

7. Обоснованы предложения по повышению ПЭ ЭБ № 5 Нововоронежской атомной станции (НВАЭС) посредством сокращения времен простоев в плановых и внеплановых ТОиР оборудования с сохранением требуемого УБ блока.

В ходе написания настоящей диссертационной работы применялись **методы и методология исследования** сложных технических систем, в основе которых лежат теория вероятностей, теория надежности, математическая логика и математическая статистика.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод повышения ПЭ ЭБ АС посредством сокращения времен простоев в плановых и внеплановых ТОиР оборудования с сохранением требуемого УБ ЭБ АС.

2. Метод оценки рисков от эксплуатации ЭБ АС в терминах опасности, одновременно указывающей как на частоту/вероятность повреждения ЯТ в год и/или частоту/вероятность большого аварийного выброса в год, так и на величину рассматриваемого ущерба – количество и типы РН, вышедших в окружающую среду в результате наступления аварий, приводящих к повреждению ЯТ на ЭБ АС.

3. Метод количественного учета зависимости УБ ЭБ АС от конфигураций оборудования ЭБ АС во время проведения плановых и внеплановых ТОиР оборудования, позволяющих, в свою очередь, повышать ПЭ ЭБ АС при работе ЭБ АС на различных уровнях мощности.

4. Логико-вероятностные ММ типового ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000, которые учитывают различные конфигурации оборудования ЭБ АС при проведении плановых и внеплановых ТОиР и на примере которых исследована возможность повышения ПЭ ЭБ АС посредством пересмотра действующих стратегий проведения плановых и внеплановых ТОиР в сторону увеличения времени функционирования ЭБ АС на мощности с сохранением требуемого УБ.

5. Подходы к формированию практических рекомендаций по повышению ПЭ ЭБ АС посредством сокращения времен простоев в плановых и внеплановых ТОиР оборудования с сохранением требуемого УБ ЭБ АС

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Предложено повышать ПЭ ЭБ АС посредством вывода в параллельное ТОиР большего числа оборудования по сравнению с принятой стратегией проведения планового ТОиР (ППР) и/или посредством изменения продолжительности допустимого времени вывода из эксплуатации (ДВВЭ) с учетом механизмов деградации оборудования ЭБ АС на различных этапах жизненного цикла ЭБ АС.

2. Предложено выполнять оценивание рисков от эксплуатации ЭБ АС в терминах опасности, одновременно указывающей и на частоту/вероятность наступления неблагоприятных событий, и на величину рассматриваемого ущерба – количество и типы РН, вышедших в окружающую среду в результате наступления аварий, приводящих к повреждению ЯТ.

3. Разработан метод количественного учета зависимости УБ ЭБ АС от конфигураций оборудования ЭБ АС, позволяющий анализировать допустимость предлагаемых конфигураций ЭБ АС, ориентированных на увеличение ДВВЭ и/или сокращение сроков проведения плановых ТОиР (ППР), с позиций сохранения требуемого УБ ЭБ АС при работе последнего на любом уровне мощности.

4. Предложено применять разработанные методы для обеспечения требуемого УБ ЭБ АС посредством выполнения количественного анализа действующих требований технологического регламента (ТР) в части проведения плановых и внеплановых ТОиР оборудования ЭБ АС с позиций их возможной излишней консервативности или оптимистичности.

5. Обоснованы возможности выбора стратегий эксплуатации оборудования ЭБ АС с позиций повышения ПЭ последнего и одновременного обеспечения требуемого УБ ЭБ АС на любом этапе жизненного цикла посредством применения различных законов распределения на примере ММ системы аварийного охлаждения активной зоны высокого давления (САОЗ ВД) и системы аварийного и планового расхолаживания (САПР) ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000.

Достоверность полученных результатов обуславливается использованием математического аппарата системного анализа, теории графов, алгебры логики, теории вероятностей, математической статистики, комбинированного вероятностно-детерминистского метода оценки показателей безопасности ЭБ АС, результатами решения тестовых примеров (аттестованным программным комплексом «БАРС»), а также проверкой выдвинутых предположений и сделанных теоретических выводов полученными лабораторными экспериментами на примере ЭБ № 5 НВАЭС.

Теоретическая и практическая значимость состоит в следующем:

1. Разработаны методы, основанные на анализе приемлемости изменений в УБ ЭБ АС при реализации предлагаемых способов сокращения времен простоев ЭБ АС в плановых и внеплановых ТОиР оборудования, позволяющие повышать ПЭ ЭБ АС, обеспечивая при этом требуемый УБ посредством учета качественных и количественных аспектов функционирования ЭБ АС во всех режимах эксплуатации, т.е. применение разработанных методов позволяет повышать ПЭ ЭБ АС без ущерба для безопасности.

2. Обоснована возможность повышения ПЭ ЭБ № 5 НВАЭС посредством изменения времен проведения плановых и внеплановых ТОиР оборудования системы аварийного охлаждения активной зоны низкого давления (САОЗ НД) и обеспечения при этом требуемого УБ блока во всех режимах его эксплуатации с единых позиций посредством анализа возможной излишней консервативности или оптимистичности требований ТР.

3. Разработаны практические рекомендации по внесению изменений в ТР ЭБ №5 НВАЭС в части проведения плановых и внеплановых ТОиР оборудования САОЗ НД, реализация которых позволяет повышать ПЭ ЭБ № 5 НВАЭС с сохранением требуемого УБ.

Личный вклад автора. Автором лично выполнены все диссертационные исследования, начиная с постановки задач и формирования программы исследований до их практической реализации. Автором лично разработаны схемы функциональной целостности (СФЦ), примененные для целей апробации разработанных методов, выполнена апробация результатов работы, произведена обработка и интерпретация результатов исследований. В опубликованных по теме диссертации основных работах вклад Автора является основным.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались на различных отечественных и международных научно-технических конференциях, семинарах и технических совещаниях (Безопасность АЭС и подготовка кадров, 2018 г., Россия, Обнинск; Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015, 2015 г., Россия, Обнинск; Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014,

2014 г., Россия, Обнинск; Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013, 2013 г., Россия, Обнинск; Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013, 2013 г., Россия, Обнинск; Безопасность АЭС и подготовка кадров–2013, 2013 г., Россия, Обнинск; Regional workshop on PSA Quality for Applications with Emphasis on External and Internal Hazards, Low Power and Shutdown, 2012 г., Romania, Bucharest; Regional Workshop on Development and Use of Risk Monitors to Support Safe Operation of NPPs, 2011 г., Czech Republic, Rez; 15th Technical Meeting on Experiences with Risk-based Precursor Analysis, 2012 г., Belgium, Brussels; Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011, 2011 г., Россия, Обнинск; IAEA Regional Technical Meeting on Combining Insights from Probabilistic and Deterministic Safety Analyses, 2011 г., Croatia, Dubrovnik; 14-ая ежегодная научно-практическая конференции Молодежного отделения Ядерного общества России «Молодежь за развитие атомной отрасли», Россия, Екатеринбург, 2009 г.; Regional Workshop on Harmonization of PSA, 2009 г., Ukraine, Kiev; Безопасность АЭС и подготовка кадров–2009, 2009 г., Россия, Обнинск; Regional workshop on Operational Events, Transients and Precursor Analyses, 2009 г., Netherlands, Petten).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 29 печатных трудах, в том числе 7 статьях в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК (из опубликованных статей 3 статьи входят издания, индексируемые в международных базах данных Scopus и Web of Science), 11 тезисах докладов, 9 отчетах о НИР и 2 руководствах по безопасности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 132 наименования, и 1 приложения; содержит 35 рисунков и 17 таблиц. Общий объем, включая приложение, составляет 175 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены объект, предмет, цель исследования, описаны основные задачи исследования, представлены выносимые на защиту научные результаты, показана новизна полученных результатов, а также обоснована их практическая ценность и приведены сведения об их апробации.

В 1 главе показано, что развитие атомной энергетики во многом связано не только с повышением ПЭ ЭБ АС, но и с вопросами обеспечения требуемого УБ ЭБ АС, в особенности – с вопросами выбора (и обоснования) правил эксплуатации ЭБ АС таких, чтобы обеспечивался требуемый НП-001 УБ. В широком смысле вопросы безопасности сводятся к определению приемлемых величин ущербов, наступающих в случае аварий на ЭБ АС. Для широкой общественности ущерб от эксплуатации ЭБ АС – это, прежде всего, дозы облучения, получаемые в результате сопряженных с выходом РН в окружающую среду аварий на ЭБ АС (и, соответственно, число впоследствии заболевших и/или умерших людей, количество территорий, ставших непригодными для проживания и/или сельскохозяйственной из-за радиоактивного загрязнения почвы и водоемов, и проч.).

В общем виде для смеси РН, вышедших в окружающую среду, можно использовать выражение (1) для расчета полной ожидаемой дозы (при времени после выпадения РН $t \rightarrow \infty$):

$$H^C = A_S \sum_i B_{SH,i} \eta_i, \quad (1)$$

где A_S – суммарная поверхностная активность смеси в момент выпадения РН, $B_{SH,i}^2$ ($K_{и}/M^2$); η_i – доля i -го РН в полной активности смеси; $B_{SH,i}$ – обобщенный дозовый коэффициент, отне-

связанный к единичной поверхностной активности i -го РН смеси, $^{3B^*M2}/_{BK}$. При этом для различных путей облучения коэффициент $B_{SH,i}$ равен (в формулах 2 – 4 индекс i означает, что рассматриваемая характеристика относится к i -му РН):

- при внешнем фотонном излучении от следа выпадений (см. формулу 2):

$$B_{SH,i} = B_{S\gamma} \tau_{ef} = B_{S\gamma}^C, \quad (2)$$

где $B_{S\gamma}$ – дозовый коэффициент, равный мощности эквивалентной дозы от γ -излучения поверхностно-загрязненной почвы на высоте $h=1$ м, $^{(3B^*M2)}_{(c^*BK)}$; τ_{ef} – эффективный период полураспада, учитывающий радиоактивный распад и выведение РН, сут., год; $B_{S\gamma}^C$ – дозовый коэффициент, равный ожидаемой эквивалентной дозе от поверхностно-загрязненной почвы на высоте $h=1$ м, $^{(3B^*M2)}_{BK}$;

- для внутреннего облучения при выдыхании (см. формулу 3):

$$B_{SH,i} = \frac{B_{ih,i} V}{v_g + \Lambda H_Z^{max}}, \quad (3)$$

где B_{ih} – полувековая эквивалентная доза внутреннего облучения при поступлении в организм РН с вдыхаемым воздухом, $^{3B}/_{BK}$; V – интенсивность легочного обмена воздуха при дыхании человека, $^{M3}/_c$; v_g – скорость сухого осаждения РН, $^{M}/_c$; Λ – постоянная вымывания примесей осадками, c^{-1} ; H_Z^{max} – максимальная высота слоя перемешивания примеси в атмосфере, м;

- для внутреннего облучения при пероральном поступлении с пищей (см. формулу 4):

$$B_{SH,i} = B_{ig,i} K_{fi}^{ind}, \quad (4)$$

где B_{ig} – полувековая эквивалентная доза внутреннего облучения при заглатывании РН с водой или пищей, $^{3B}/_{BK}$; K_{fi}^{ind} – коэффициент перехода «выпадение РН на почву – поступление в организм» с продуктами питания, m^2 .

Установлено, что величины наступающих ущербов зависят не столько от «поведения» ЭБ АС в период аварии, сколько от многокомпонентных процессов распространения и накопления в окружающей среде вышедших в нее РН. Существуют различные методики прогнозирования распределения РН в окружающей среде, каждая из которых так или иначе предполагает представление окружающей среды в виде нескольких резервуаров, в качестве которых могут выступать атмосфера, гидросфера, литосфера, биосфера и т.п. В общем случае динамика перехода РН из одного резервуара в другой и динамика обмена между резервуарами может быть выражена уравнением 5:

$$\frac{dC_i}{dt} = C_{0,i} + \sum_n K_{ni} C_n + \sum_j K_{ij} C_j, \quad (5)$$

где C_i – концентрация РН в i -ом резервуаре; $C_{0,i}$ – скорость изменения концентрации РН в i -ом резервуаре, обусловленная поступлением РН в результате антропогенного воздействия на среду; K_{ni} – коэффициент переноса РН из n -го резервуара в i -ый резервуар; K_{ij} – коэффициент переноса из i -го резервуара в j -ый резервуар.

Доказано, что оценивать ущербы от аварий на ЭБ АС целесообразно в терминах типов и количества РН, вышедших в окружающую среду, величины последних из которых не зависят от самой окружающей среды и ее параметров в момент выхода в нее РН. Сделан вывод, что для целей определения УБ ЭБ АС с позиций наступающих ущербов целесообразно использовать

вероятностные показатели безопасности (ВПБ): суммарную вероятность тяжелых аварий и/или суммарную вероятность большого аварийного выброса. Доказано, что оперирование данными характеристиками позволяет сравнивать УБ различных ЭБ АС, т.к. другие «традиционные» единицы измерения УБ ЭБ АС с позиций тяжести ущербов (дозовой нагрузки, величин радиоактивного загрязнения и др.) крайне зависимы от множества параметров самой окружающей среды.

На основании вышеизложенных выводов предложен метод оценки рисков R (см. формулу 6) от эксплуатации ЭБ АС в терминах опасности, одновременно указывающей как на величину причиняемого ущерба U_i (тип и количество РН, вышедших в окружающую среду из-за реализации аварии i), так и на частоту/вероятность причинения ущерба P_i (частоту/вероятность наступления аварии i , связанной с выходом РН в окружающую среду):

$$R = P_i \times U_i. \quad (6)$$

Проанализированы различные показатели, используемые для оценки ПЭ ЭБ АС. Установлено, что для этих целей наиболее пригоден коэффициент технического использования $K_{ТИ}$, равный отношению математического ожидания суммарного времени пребывания ЭБ АС в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания ЭБ АС в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных ТОиР за тот же период, рассчитываемый по формуле 7:

$$K_{ТИ} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i + \sum_{j=1}^k \tau_j}, \quad (7)$$

где i – номер цикла функционирования ЭБ АС; n – число рабочих циклов за рассматриваемый период эксплуатации; t_i – длительность нахождения ЭБ АС в работоспособном состоянии в i -том цикле, ч.; τ_i – продолжительность i -го ремонта (планового и/или внепланового), требующего вывода ЭБ АС из состояния использования по назначению; m – число отказов (восстановлений) за рассматриваемый период; j – номер ТОиР; k – число ТОиР, требующих останова ЭБ АС в рассматриваемый период; τ_j – длительность выполнения j -го ТОиР, требующего вывода ЭБ АС из состояния использования по назначению, ч.

Для определения коэффициента $K_{ТИ}$ может использоваться выражение 8:

$$K_{ТИ} = \frac{T_{раб}}{T_{раб} + T_p + T_{ТОиР}}, \quad (8)$$

где $T_{раб}$ – математическое ожидание времени пребывания ЭБ АС в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации, ч.; T_p – математическое ожидание времени ремонта (планового и/или внепланового) за тот же период эксплуатации, ч.; $T_{ТОиР}$ – математическое ожидание времени технического обслуживания (планового) за тот же период эксплуатации, ч.

Наряду с коэффициентом $K_{ТИ}$ широко применяется коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), равный отношению количества выработанной АС или ЭБ АС энергии за заданное календарное время эксплуатации к количеству энергии, которую бы они выработали за то же время, работая непрерывно на номинальной мощности (см. формулу 9):

$$КИУМ = \frac{W_{факт}}{W_{max}} = \frac{\overline{N} \times T_{факт}}{N_{норм} \times T}, \quad (9)$$

где $W_{факт}$ – количество энергии, фактически выработанное энергоблоком за заданный период эксплуатации T , МВт*ч.; W_{max} – максимально возможное количество энергии, которое могло бы быть выработано энергоблоком за заданный период эксплуатации T , если бы он все время непрерывно (без простоев) работал на номинальной мощности, МВт*ч.; T – продолжительность заданного периода эксплуатации, ч.; $T_{факт}$ – фактическая продолжительность работы ЭБ АС в режиме выработки электроэнергии, ч. (см. формулу 10); $\bar{N}$ – фактическая средняя мощность, на которой работал ЭБ АС в течение фактического периода использования по назначению (для выработки электроэнергии, см. формулу 11).

$$T_{факт} = \sum_{i=1}^k t_i, \quad (10)$$

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^k N_i \times t_i}{\sum_{i=1}^k t_i}, \quad (11)$$

где i – номер режима работы ЭБ АС с выдачей электроэнергии во внешнюю сеть; k – число режимов работы ЭБ АС с выдачей электроэнергии во внешнюю сеть; N_i – мощность, на которой работал ЭБ АС в i -том режиме, МВт; t_i – продолжительность i -го режима, ч.

КИУМ характеризует эффективность ЭБ АС в целом, включая не только его технологическое совершенство, но и квалифицированность персонала, организацию работы, как руководством самой станции, так и организацию работы всей отрасли на государственном уровне, а также учитывает многие другие факторы, в том числе и внешние, например, отсутствие потребности в том количестве электроэнергии, которую мог бы выдавать ЭБ АС во внешнюю сеть.

Для перехода от коэффициента $K_{ТИ}$ к КИУМ используют формулу 12:

$$КИУМ = K_{ЗМ} \times K_{ТИ}, \quad (12)$$

где $K_{ЗМ}$ – коэффициент загрузки мощности.

Установлено, что основными «вкладчиками» в снижение $K_{ТИ}$ (КИУМ) являются простои ЭБ АС в плановых и внеплановых ТОиР. Сделан вывод, что повысить $K_{ТИ}$ (КИУМ) можно посредством сокращения времен простоев ЭБ АС в ТОиР. В целях определения способов сокращения времен простоев ЭБ АС проанализированы: конфигурации, в которых может пребывать оборудование ЭБ АС при работе последнего на различных уровнях мощности и в режимах останова; виды отказов оборудования ЭБ АС; аспекты выбора параметров проведения проверок работоспособности оборудования; способы контроля работоспособности; методы и стратегии восстановления работоспособности отказавшего оборудования и проч.

Сделан вывод, что, хотя широкая практика пересмотра требований к порядку проведения ТОиР (устанавливаются в ТР эксплуатации ЭБ АС) отсутствует, сократить времена простоев ЭБ АС в ТОиР можно посредством пересмотра регламентируемых стратегий проведения ТОиР с позиций обоснования возможности:

- увеличения длительности проведения внеплановых ТОиР во время эксплуатации ЭБ АС на мощности до момента необходимости перевода ЭБ АС в административный останов – метод повышения ПЭ ЭБ АС посредством сокращения времен простоев из-за внеплановых ТОиР оборудования (далее – метод внеплановых ТОиР);
- сокращения длительности проведения плановых ТОиР (ППР) ЭБ АС посредством вывода в параллельное ТОиР большего числа оборудования по сравнению с действующей стратеги-

ей проведения плановых ТОиР (ППР) – метод повышения ПЭ ЭБ АС посредством сокращения времен простоев в плановых ТОиР (ППР) оборудования (далее – метод ППР).

Указано, что предлагаемые методы не ставят своей целью именно подтвердить выполнение ВПБ, установленных в НП-001. Применение методов (в особенности – метода внеплановых ТОиР), с одной стороны, позволяет проверить требования ТР эксплуатации ЭБ АС с позиции постановки следующего вопроса: обеспечивается ли выполнение требований НП-001 в части ВПБ во время проведения плановых и внеплановых ТОиР в соответствии с установленными в ТР правилами и ограничениями (методы позволяют количественно доказать правомерность действующих положений ТР или указать на их возможную неправомерность с точки зрения обеспечиваемости выполнения требований НП-001 в части ВПБ). С другой стороны, применение данных методов позволяет «маневрировать» в установленных в НП-001 интервалах (лимитах) ВПБ так, чтобы одновременно сокращать сроки проведения ТОиР и тем самым повышать ПЭ ЭБ АС, и при этом не нарушать законодательно установленные требования к УБ ЭБ АС.

Вопросам анализа УБ ЭБ АС посвящена 2 глава. Показано, что для получения качественной информации об УБ ЭБ АС применяется детерминистский анализ безопасности; количественной (в терминах ВПБ) – вероятностный анализ безопасности (ВАБ), который, в свою очередь, в зависимости от решаемых задач подразделяется на несколько уровней:

- частоты/вероятности наступления аварий, связанных с повреждением ЯТ вследствие реализации различных аварийных последовательностей (АП), определяются на уровне 1;
- выявление возможных путей выхода РН в окружающую среду вследствие реализации АП, ведущих к повреждению ЯТ, определение характеристик радиоактивного выброса и выполнение оценки частоты/вероятности большого аварийного выброса выполняется на уровне 2;
- анализ путей распространения РН, вышедших в окружающую среду, оценка величин радиоактивного загрязнения окружающей среды и прогнозирование величин дозовых нагрузок выполняется на уровне 3.

Основные преимущества детерминистского анализа безопасности и ВАБ позволяет объединить риск-информативный подход.

Сделан вывод, что, с одной стороны, для прогнозирования величин рисков от аварий на ЭБ АС следует использовать результаты ВАБ уровня 3, с другой – результаты ВАБ уровня 3 не могут быть использованы ни в качестве ориентира при определении УБ некоего ЭБ АС, ни для оценки изменений в УБ одного и того же ЭБ АС вследствие каких-либо изменений в порядке его эксплуатации, ни для сравнения УБ различных ЭБ АС.

Доказано, что при формировании стратегий проведения плановых и внеплановых ТОиР, направленных на повышение ПЭ ЭБ АС, а также при сравнении УБ различных ЭБ АС и при оценке изменений в УБ одного и того же ЭБ АС вследствие каких-либо изменений в порядке его эксплуатации целесообразно применять результаты ВАБ уровней 1 и 2; для целей оценки рисков от эксплуатации ЭБ АС следует использовать результаты ВАБ уровня 2.

Продemonстрировано, что достоверность выполняемых количественных оценок УБ ЭБ АС напрямую зависит от реалистичности и адекватности ММ, описывающих протекающие на ЭБ АС процессы. При расчетах ВПБ ЭБ АС предметом особого интереса является итоговое расчетное выражение (логико-вероятностная ММ), которое может быть представлено, например, в виде:

- вероятностного многочлена (см. формулу 13):

$$P_c = P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i A_j A_k) - \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 \dots A_n); \quad (13)$$

- уравнений Колмогорова-Чепмена (см. формулу 14):

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = -C_k(t)P_k(t) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N \lambda_{lk}(t)P_l(t), k = \overline{1, N}; \quad (14)$$

- системы логических уравнений (см. формулу 15):

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = x_1 \& L_1(y_2, y_3, \dots, y_n) \\ y_2 = x_2 \& L_2(y_1, y_3, \dots, y_n) \\ \\ y_j = x_j \& L_j(y_1, \dots, y_{j-1}, y_{j+1}, \dots, y_n) \\ \\ y_n = x_n \& L_n(y_1, y_2, \dots, y_{n-1}) \end{array} \right. . \quad (15)$$

Показано, что т.к. непосредственное получение требуемых расчетных выражений практически невозможно, обычно искомую логико-вероятностную ММ получают в несколько этапов: сначала формируется вербальная модель безопасности, которая затем формализуется при помощи различных математических аппаратов (например, при помощи графов). Формализованная модель преобразуется в модель, представляемую с помощью средств алгебры логики. Далее из логической модели формируется расчетная вероятностная функция, на основе которой и производятся расчеты ВПБ ЭБ АС. Сделан вывод об исключительной важности «графического» этапа расчета ВПБ ЭБ АС, т.к. именно на этом этапе описывается основная часть закономерностей функционирования всего комплекса оборудования ЭБ АС, что впоследствии в целом определяет достоверность получаемых оценок УБ ЭБ АС.

Для построения графических моделей выбран аппарат СФЦ.

Упрощенная графическая модель безопасности ЭБ АС, выполненная с помощью изобразительных средств СФЦ, представлена на рисунке 1. Данная модель полностью аналогична графической модели безопасности, выполненной с помощью изобразительных средств деревьев событий и деревьев отказов, представленной на рисунке 2.

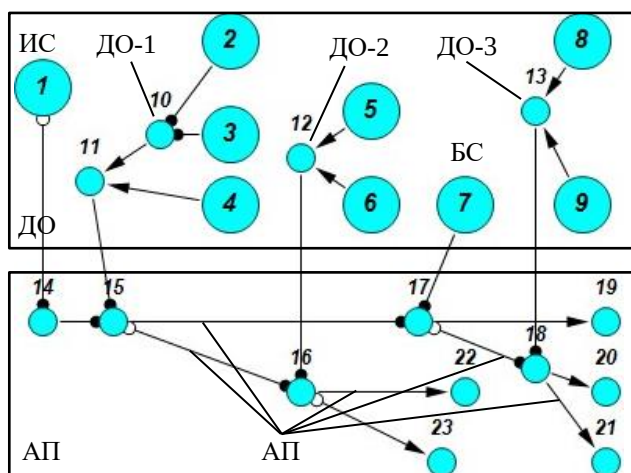


Рисунок 1 – Графическая модель безопасности ЭБ АС (СФЦ)

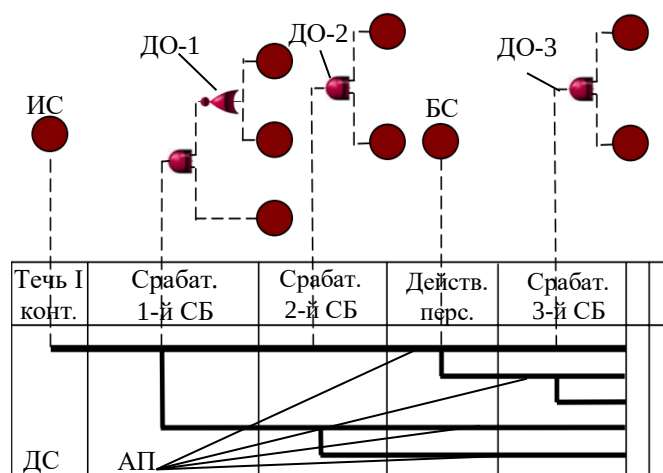


Рисунок 2 – Графическая модель безопасности ЭБ АС (деревья событий/ деревья отказов)

В 3 главе описаны методы повышения ПЭ ЭБ АС. В § 3.1 продемонстрировано, что т.к. проведение любых ТОиР приводит к изменению конфигураций оборудования ЭБ АС, к изменению критериев их успеха (а, следовательно, модель ВАБ должна быть перестроена, проведены расчеты и оценено влияние предлагаемых изменений на УБ в терминах ВПБ), для целей анализа влияния на УБ ЭБ АС плановых и внеплановых ТОиР, ориентированных на повышение ПЭ

ЭБ АС, целесообразно использовать фактор повышения риска RIF , который, в свою очередь, позволяет одновременно учитывать фактическое состояние оборудования ЭБ АС и текущие режимы работы ЭБ АС, т.е. учитывать конфигурации оборудования АЭ АС (см. формулу 16):

$$RIF = \frac{FDF_i(Q_i = 1)}{FDF_{\delta}}, \quad (16)$$

где Q_i – вероятность того, что i -ый элемент не сможет выполнить свою функцию; FDF_i – частота/вероятность повреждения ЯТ при выводе i -го элемента в ТОиР на анализируемую продолжительность времени (установленную ТР или предлагаемую); FDF_{δ} – соответствующая частота/вероятность повреждения ЯТ при исправности рассматриваемого оборудования.

Вероятность возникновения аварийного состояния ЭБ АС (FDF_i) с определенным видом и размером последствий a при i -ом ИС в результате невыполнения j -ой функции безопасности можно вычислить по формуле 17:

$$Q_{ij}(T, a) = \int_0^T \Lambda_i(t) F_{ij}(t, t_p) dt, \quad (17)$$

где $\Lambda_i(t)$ – интенсивность i -го ИС (обычно принимается, что $\Lambda_i(t) = \text{const}$); $F_{ij}(t)$ – вероятность невыполнения j -ой функции безопасности при возникновении i -го ИС; t_p – время выполнения функции безопасности после возникновения ИС; T – рассматриваемый интервал времени эксплуатации ЭБ АС.

Комплексная вероятность (FDF_{δ}) реализации аварийных последствий определенных видов и размеров при возникновении всех рассматриваемых ИС определяется по формуле 18:

$$Q_{ij}(T, a) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - Q_i(T, a)] \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} Q_{ij}(T, a), \quad (18)$$

где $Q_i(T, a)$, $Q(T, a)$ – вероятности возникновения аварийных последствий определенного вида и размера a на рассматриваемом интервале времени $[0, T]$ эксплуатации ЭБ АС соответственно для отдельных и полных перечней ИС, m_i – число аварийных состояний ЭБ АС типа a , возникающих вследствие невыполнения функций безопасности при i -ом ИС; n – число ИС.

В § 3.2 описан метод внеплановых ТОиР. В основе метода лежит гипотеза о том, что повысить ПЭ можно посредством смягчения требований ТР к продолжительности установленного в нем ДВВЭ. Порядок применения метода заключается в следующем: сначала необходимо убедиться, что используемая для количественных расчетов ВПБ логико-вероятностная ММ адекватна реальному состоянию ЭБ АС, а затем – корректно представить в ММ анализируемую ситуацию (посредством изменения и, если необходимо, доработки ММ таким образом, чтобы достоверно представить в ней состояние вывода рассматриваемого оборудования во внеплановые ТОиР на некое ДВВЭ). Для этого нужно рассмотреть такие аспекты, как, например: корректность учета неготовности, вызванной проверкой работоспособности и выводом в ремонт оборудования; полнота и адекватность учета всех выявленных зависимостей, в том числе общих элементов для нескольких систем, и проч. Особое внимание необходимо уделить проверке ММ с позиций:

- наличия в ней оборудования, ДВВЭ которого предлагается увеличить, и учета всех потенциально важных состояний данного оборудования;
- представления действий оператора, потенциально оказывающих влияние на работоспособность рассматриваемого оборудования;
- учета всех потенциальных АП, в которых может быть задействовано рассматриваемое оборудование, и проч.

Даны рекомендации в отношении действий, которые необходимо предпринять в случае, если имеющаяся ММ не может быть признана адекватной реальному состоянию ЭБ АС и/или пригодной для дальнейшего проведения количественного анализа (например, включение в ММ новых базисных событий и/или логических переключателей, позволяющих моделировать вывод/нахождение рассматриваемого оборудования во внеплановых ТОиР; моделирование ранее нерассмотренных и/или более детальное моделирование имеющихся АП, в которые может быть вовлечено рассматриваемое оборудование, и проч.). Затем в ММ необходимо представить предлагаемую продолжительность ДВВЭ.

Указано, что при моделировании важно учитывать, на каком этапе жизненного цикла находится ЭБ АС, т.к. на каждом из этапов действуют различные механизмы деградации оборудования:

- этап приработки – наблюдается повышенная интенсивность отказов оборудования, связанная с ошибками производственно-технологического характера, отклонениями от норм и правил при монтаже, просчетами и ошибками, допущенными при проектировании ЭБ АС и при определении условий его эксплуатации, и проч. факторами. Преимущественно из строя выходят некондиционные элементы, обуславливая тем самым наступление прирабочных отказов;
- этап нормальной эксплуатации – не наблюдаются заметные изменения физико-механических или физико-химических свойств оборудования противостоять внешним нагрузкам (возникающие отказы носят «внезапный» характер и происходят только при значительных концентрациях нагрузок);
- этап старения – сопротивляемость оборудования внешним нагрузкам заметно снижается: оборудование не может адекватно воспринимать действующие на него нагрузки, обеспечивая установленные в технической документации параметры безопасного функционирования ЭБ АС; появляются отказы, связанные с постепенной утратой ЭБ АС первоначальных свойств в результате его износа и старения (отказы проявляются как в форме поломок оборудования, так и в форме выхода основных параметров ЭБ АС за установленные проектные пределы). В зависимости от свойств материалов, из которых изготовлено оборудование и условий их работы, процессы снижения сопротивляемости внешним нагрузкам могут быть интенсивными или медленными. Кроме того, в зависимости от степени неоднородности начальных характеристик однотипных

элементов ЭБ АС, обусловленных химической и физико-механической неоднородностью материалов, нестабильностью технологии изготовления и т.п., а также вследствие неидентичности величин эксплуатационных нагрузок, износные отказы в одних случаях проявляются на значительно коротком отрезке времени, в других – имеют значительный разброс по времени.

Указано, что для корректного учета как характера отказов рассматриваемого оборудования, так и стадии жизненного цикла ЭБ АС, на которой находится блок, необходимо использовать различные законы распределения. На рисунке 3 представлены зависимости интенсивности отказов $\lambda(t)$ от времени t для различных законов распределения; в таблице 1 – основные параметры вероятностных распределений.

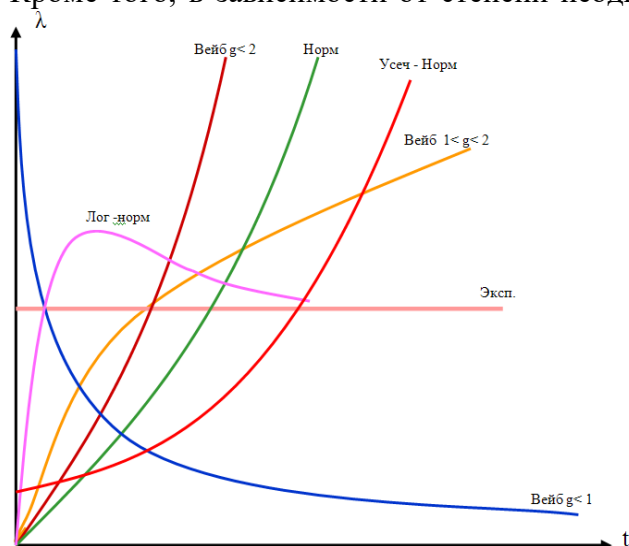


Рисунок 3 – График изменения интенсивности отказов для различных законов распределения

параметры вероятностных распределений.

Таблица 1 – Основные параметры вероятностных распределений

Наименование	Область значений	Плотность распределения/ Применимость для задач надежности
1	2	3
Логарифмическое нормальное	$x \in (0; \infty), \sigma > 0$	$\frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(\ln x - m)^2}{2\sigma^2}\right)}$ Отказы: происходящие на этапе приработки, связанные с производственными дефектами; происходящие на этапе старения из-за радиационных повреждений, малоциклового усталости, электрохимической коррозии, механического износа от трения скольжения, пластической деформации в виде поверхностного наклепа; объектов, имеющих свойство «упрочняться» с течением времени эксплуатации («упрочнение» сказывается в постепенном уменьшении скорости износа); приработочные. Нарботка на отказ, когда отказ наступает вследствие усталостных повреждений.
Нормальное	$x \in (-\infty; \infty)$ – для задач надежности $\alpha > 3\sigma$	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}\right)}$. Нарботка: – на отказ оборудования, срок службы которого определяется износом; – до отказа невосстанавливаемого оборудования. Суммарная наработка восстанавливаемого оборудования до капитального ППР. Время восстановления ремонтируемого оборудования.
Вейбулла-Гнеденко	$x \in (0; \infty), \alpha > 0, \beta > 0, \lambda = \alpha^{-\beta}$	$\lambda \cdot \beta \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{-\lambda x^\beta}$. Отказы: – оборудования, наступающие из-за усталостного разрушения; – невосстанавливаемого оборудования; – связанные со старением конструкционных материалов. Анализ прочности и долговечности механических устройств.
Релея	$x \in (0; \infty), \alpha > 0$	$\frac{x}{a^2} e^{-\frac{x^2}{2a^2}}$. Отказы оборудования с явно выраженным эффектом старения и износа.
Бета	$x \in (0; 1), \alpha > 0, \beta > 0$	$\frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} X^{\alpha-1} (1-X)^{\beta-1}$. Используется для описания случайных величин, значения которых ограничены конечным интервалом.
Гамма	$x \in (0; \infty), \lambda > 0, \alpha > 0$	$C \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda x}$. Отказы, связанные с ухудшением прочностных свойств материалов, например, с усталостью материала.
Экспоненциальное	$x \in (0; \infty), \lambda > 0$	$\lambda e^{-\lambda x}$. Отказы оборудования на этапе нормальной эксплуатации, когда интенсивность отказов постоянна

После выполнения вышеперечисленных действий производится количественная оценка влияния анализируемых конфигураций ЭБ АС на ВПБ с помощью фактора *RIF* по формуле 16.

Предлагаемые критерии значений фактора RIF, рекомендации по качественной оценке получаемых количественных результатов и по формированию последующих практических предложений представлены в столбцах 1 – 4 таблицы 2.

Таблица 2 – Оценка изменений УБ ЭБ АС при проведении плановых и внеплановых ТОиР оборудования

Диапазон значений фактора RIF		Качественная оценка количественных результатов анализа/ Практические рекомендации применительно к предлагаемым стратегиям проведения ТОиР рассматриваемого оборудования		
Эксплуатируемые ЭБ АС	Вновь вводимые в эксплуатацию ЭБ АС	Изменение УБ ЭБ АС	Внеплановые ТОиР	Плановые ТОиР (ППР)
1	2	3	4	5
$\frac{1E-3}{FDF_6} < RIF < \frac{1E-4}{FDF_6}$	$\frac{1E-4}{FDF_6} < RIF < \frac{1E-5}{FDF_6}$	Значительное снижение УБ	1. Реализация предписываемых ТР требований к продолжительности ДВВЭ (или предлагаемая продолжительность ДВВЭ) допустима при условии предусмотрения компенсирующих мер, направленных на повышение УБ ЭБ АС при проведении внеплановых ТОиР рассматриваемого оборудования. В противном случае анализируемая продолжительность ДВВЭ должна быть пересмотрена в сторону ее сокращения в целях снятия излишней оптимистичности требований ТР. 2. ПЭ ЭБ АС не может быть повышена посредством увеличения продолжительности рассматриваемого ДВВЭ, т.к. не выполняются требования НП-001 в части ВПБ.	Реализация предлагаемого способа повышения ПЭ допустима при условии предусмотрения компенсирующих мер, направленных на выполнение требований НП-001 в части ВПБ
$RIF \leq \frac{1E-4}{FDF_6}$	$RIF \leq \frac{1E-5}{FDF_6}$	Приемлемое снижение УБ	1. Реализация предписываемых ТР требований к продолжительности ДВВЭ (или предлагаемая продолжительность ДВВЭ) допустима, т.к. выполняются требования НП-001 в части ВПБ. 2. Требования ТР к продолжительности ДВВЭ (или предлагаемая продолжительность ДВВЭ) являются излишне консервативными и могут быть пересмотрены в сторону смягчения. 3. ПЭ ЭБ АС может быть повышена посредством увеличения продолжительности рассматриваемого ДВВЭ.	Реализация предлагаемого способа повышения ПЭ допустима, т.к. выполняются требования НП-001 в части ВПБ.

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
$RIF \geq \frac{1E-3}{FDF_6}$	$RIF \geq \frac{1E-4}{FDF_6}$	Неприемлемое снижение УБ	1. Реализация предписываемых ТР требований к продолжительности ДВВЭ (или предлагаемая продолжительность ДВВЭ) не допустима с точки зрения УБ ЭБ АС, т.к. не выполняются требования НП-001 в части ВПБ. 2. Рассматриваемые требования ТР к продолжительности ДВВЭ (или предлагаемая продолжительность ДВВЭ) являются излишне оптимистическими и должны быть пересмотрены в сторону ужесточения (требуется сокращение рассматриваемой продолжительности ДВВЭ). 3. ПЭ ЭБ АС не может быть повышена посредством увеличения продолжительности рассматриваемого ДВВЭ.	Реализация предлагаемого способа повышения ПЭ не допустима, т.к. не выполняются требования НП-001 в части ВПБ.

Выделение критериев, различных для вновь вводимых в эксплуатацию и эксплуатируемых ЭБ АС, обусловлено тем, что непревышение суммарной вероятности тяжелых аварий на интервале времени в 1 год должно быть равно $1E-5$ для вновь вводимых в эксплуатацию ЭБ АС (НП-001-15), а для эксплуатируемых ЭБ АС – необходимо стремиться к обеспечению УБ, указанного в НП-001-97.

В § 3.4, посвященном обоснованию приемлемости разработанных критериев значений фактора RIF , доказано следующее:

- эксплуатация ЭБ АС связана с теми же вероятностями/частотами возникновения техногенных аварий, что и любые другие виды человеческой деятельности (например, средняя вероятность возникновения техногенных аварий на металлургическом производстве составляет $2,15E-4$; на химических, нефтехимических, нефтеперерабатывающих производствах – $2,50E-4$; на предприятиях газоснабжения – $6,70E-5$);
- целевые ВПБ ЭБ АС лежат в рамках общепринятых подходов к нормированию рисков от различных видов человеческой деятельности и не выходят за их рамки, т.к. значения рисков наступления неблагоприятных событий на техногенных объектах (не связанных с атомной энергетикой), которые воспринимаются большинством населения как приемлемые, также лежат в области $1E-5 \dots 1E-4$.

Сделан вывод, что разработанные критерии значений фактора RIF являются приемлемыми, т.к.:

- учитывают накопленный опыт в области использования как объектов использования атомной энергетики, так и «обычных» сложных технических систем, не связанных с ней;
- не выходят за рамки общепринятых подходов к управлению рисками от различных видов техногенной деятельности человека.

Указано, что применение метода внеплановых ТОиР позволяет проверять требования ТР в части номенклатуры оборудования, выводимого во внеплановые ТОиР, и ДВВЭ с точки зрения обеспечения выполнения требований НП-001 в части ВПБ.

В § 3.3 описан метод ППР. В основе метода лежит задача сокращения сроков проведения плановых ТОиР (ППР) в условиях априорного обеспечения требуемого УБ ЭБ АС (во время

нахождения ЭБ АС в режимах работы на пониженных уровнях мощности или останова).

Показано, что в подобной постановке поставленная задача является классической задачей теории расписаний: упорядочивание системы работ с учетом технологических и ресурсных ограничений, обеспечивающее минимизацию длины расписания (в предлагаемом методе – минимизацию длины технологического процесса проведения плановых ТОиР (ППР)). Продемонстрировано, что все работы, образующие технологический процесс плановых ТОиР (ППР), связаны между собой жесткими ресурсно-технологическими зависимостями, среди которых выделяют два основных их типа R_1 и R_2 :

- зависимости типа R_1 – это зависимости «следования – предшествования» (две любые работы Z_i и Z_j являются зависимыми в отношении R_1 , если одна из них может быть начата только после завершения другой: $Z_i \Rightarrow_{R_1} Z_j$;
- зависимости типа R_2 – это зависимости технологической совместимости (две любые работы Z_i и Z_j являются независимыми в отношении R_2 , если они могут выполняться одновременно, в противном случае они являются зависимыми в отношении R_2 и могут выполняться только последовательно, причем последовательность их выполнения «жестко» не определена: $Z_i \Leftrightarrow_{R_2} Z_j$).

Сделано заключение, что если рассматривать оптимизацию существующих стратегий проведения ТОиР (ППР) ЭБ АС с позиций технологической последовательности производимых манипуляций (зависимостей типа R_1), то сократить времена простоев ЭБ АС в плановых ТОиР (ППР) можно посредством смягчения существующих ресурсных ограничений. Учитывая принципиальную с точки зрения «технологии» проведения ТОиР (ППР) невозможность изменения зависимостей типа R_1 (доказано, что планы-графики ППР учитывают все зависимости типа R_1), метод предлагает пересматривать зависимости типа R_2 посредством одновременного вывода в плановые ТОиР (ППР) либо сразу нескольких каналов безопасности какой-либо системы, либо части оборудования одного канала данной системы и части оборудования другого канала.

Отмечено, что хотя предлагаемый метод и подразумевает изменение кратности резервирования оборудования ЭБ АС, что, в свою очередь, приводит к еще большему (по сравнению с «обычными» плановыми ТОиР (ППР)) ухудшению надежности рассматриваемой системы при выполнении ею заданных функций, преимуществом применения предлагаемого метода является количественное обоснование (или опровержение) правомочности требований ТР в части реализации зависимостей типа R_2 , т.к. в широкой практике не представлены специальные количественные расчеты по доказательству правомерности требований ТР в части существующих требований к зависимостям типа R_2 .

В общем случае, порядок применения метода заключается в следующем. Основная задача – определить, какое дополнительное оборудование может быть выведено в плановые ТОиР (ППР). Для этого необходимо выявить зависимости типа R_2 , реализация которых может быть совмещена друг с другом без нарушения зависимостей типа R_1 . Указано на важность «разделения» конкретных единиц оборудования, которые обязательно должны быть доступны для использования в случае возникновения аварийной ситуации, и единиц оборудования, которое проектом ЭБ АС «назначено» резервными. После выбора оборудования, ремонт которого, как предполагается, можно совместить с ремонтом другого оборудования, требуется проанализировать вызываемые в УБ ЭБ АС изменения. Для этого в имеющуюся ММ ЭБ АС вносятся изменения такие, чтобы достоверно отобразить в ней предлагаемые манипуляции (действия, предпринимаемые по определению «пригодности» имеющейся логико-вероятностной ММ с точки зрения проведения анализа и, в случае необходимости, – ее доработке, аналогичны действиям,

описанным применительно к методу внеплановых ТОиР). Затем в ММ необходимо отметить, какое именно оборудование дополнительно выводится в плановые ТОиР (ППР) (с учетом рассматриваемого этапа жизненного цикла ЭБ АС). После чего производится количественная оценка влияния предлагаемой стратегии ТОиР на ВПБ ЭБ АС с помощью фактора RIF .

Критерии значений фактора RIF , рекомендации по качественной оценке получаемых количественных результатов и по формированию практических рекомендаций на основе получаемых результатов представлены в столбцах 1 – 3, 5 таблицы 2.

Указано, что если по результатам применения любого из методов выявлена необходимость формирования компенсирующих мер, направленных на повышение УБ ЭБ АС, то для количественной оценки их эффективности необходимо также руководствоваться значениями фактора RIF , диапазоны которого представлены в таблице 2 (с точки зрения моделирования действия, предпринимаемые по представлению в имеющейся ММ ЭБ АС компенсирующих мер, аналогичны действиям, предпринимаемым по представлению в ММ предлагаемых конфигураций оборудования ЭБ АС).

Предложенные методы апробированы на примере логико-вероятностных ММ ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000 (является эксплуатируемым), которые учитывают различные конфигурации оборудования ЭБ АС при проведении плановых и внеплановых ТОиР (ММ разработаны в виде СФЦ при помощи программного комплекса «БАРС». СФЦ разрабатываются одинаковыми для всех этапов жизненного цикла ЭБ АС, различия учитываются при задании параметров функциональной вершины (базисного события): по одной и той же СФЦ рассчитывается надежность системы и на этапе приработки, и на других этапах, изменив распределение для «нужных» вершин). Также предложенные методы применены для целей расчетного обоснования предложений по повышению ПЭ ЭБ № 5 НВАЭС при проведении плановых и внеплановых ТОиР оборудования САОЗ НД. Полученные результаты представлены в 4 главе.

Отмечено, что разработка логико-вероятностных ММ ЭБ АС в виде СФЦ, а также выполнение соответствующих расчетов при помощи программного комплекса «БАРС» позволяют корректнее учитывать для любого этапа жизненного цикла ЭБ АС как механизмы деградации (например, такие как: усталостные разрушения механических элементов, вызванные многократной сменой напряжений) оборудования ЭБ АС посредством использования различных законов распределений (см. таблицу 1); так и особенности проведения плановых и внеплановых ТОиР (например, учет пусковых отказов, ошибок персонала при ТОиР).

Для апробации метода внеплановых ТОиР выбрана САОЗ ВД ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000. Выполнен качественный анализ функционирования оборудования системы при нормальной и аварийной эксплуатации блока (произведенные расчеты производились для этапа нормальной эксплуатации ЭБ АС при помощи программного комплекса «БАРС»). Смоделирована работа оборудования ЭБ АС на мощности в условиях воздействия следующих ИС, связанных с: малыми течами I контура в диапазоне $10 < Du \leq 40$ внутри герметичной оболочки (ГО) (далее – ИС-1); компенсируемыми течами из I контура внутри ГО (далее – ИС-2); средней течью из I контура внутри ГО с $d_{экр}$: $70 < Du \leq 100$, $100 < Du \leq 120$ и $120 < Du \leq 170$ без зависимых отказов каналов систем безопасности (далее – ИС-3, ИС-4 и ИС-5 соответственно) и с $d_{экр}$: $170 < Du \leq 180$ с зависимым отказом одного канала САОЗ ВД (далее – ИС-6); большой течью из I контура внутри ГО с $d_{экр}$: $180 < Du \leq 260$, которые не приводят/приводят к зависимым отказам в САОЗ ВД (далее – ИС-7 и ИС-8 соответственно)

Для всех случаев воздействия каждого из вышеперечисленных ИС разработаны соответствующие СФЦ (на рисунке 4 приведен пример визуализации проведенного анализа), учитывающие реакции не только оборудования САОЗ ВД, но и основных систем ЭБ АС с реактором

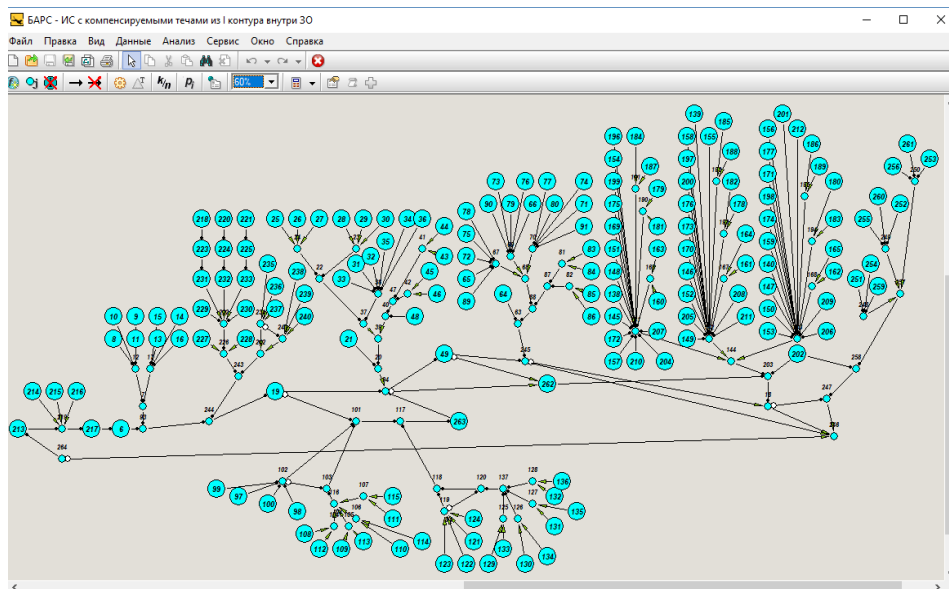


Рисунок 4 – СФЦ функционирования ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000 при реализации ИС-2

типа ВВЭР-1000 (например, срабатывание аварийной защиты, обеспечение герметичности главного парового коллектора посредством автоматического закрытия одного стопорного клапана турбины на каждом паропроводе, автоматическое закрытие всех БРУ-К при снижении давления в главном паровом коллекторе).

Сделано предположение о выявлении

отказа одного из обратных клапанов САОЗ ВД, ДВВЭ которого, согласно ТР, составляет 72 ч. Получены следующие модели системы (применительно к ИС-2; в целях сокращения объема автореферата приведена только часть полученных моделей, т.к. все логические и вероятностные функции занимают несколько листов текста):

- логическая, в виде множества кратчайших путей успешного функционирования:

$$\begin{aligned}
 & \dots X_{71} \bullet X_{74} \bullet X_{77} \bullet X_{80} \bullet X_{91} \vee X_{66} \bullet X_{74} \bullet X_{76} \bullet X_{79} \bullet X_{90} \vee X_{65} \bullet X_{72} \bullet X_{75} \bullet X_{78} \\
 & \bullet X_{89} \vee X_{140} \bullet X_{147} \bullet X_{150} \bullet X_{153} \bullet X_{156} \bullet X_{159} \bullet X_{171} \bullet X_{174} \bullet X_{177} \bullet X_{198} \bullet X_{201} \bullet X_{206} \\
 & \bullet X_{209} \bullet X_{212} \bullet X_{250} \bullet X_{255} \bullet X_{256} \vee X_{139} \bullet X_{146} \bullet X_{149} \bullet X_{152} \bullet X_{155} \bullet X_{158} \bullet X_{170} \bullet X_{173} \\
 & \bullet X_{176} \bullet X_{197} \bullet X_{200} \bullet X_{205} \bullet X_{208} \bullet X_{211} \bullet X_{249} \bullet X_{253} \bullet X_{254} \vee X_{138} \bullet X_{145} \bullet X_{148} \bullet X_{151} \\
 & \bullet X_{154} \bullet X_{157} \bullet X_{169} \bullet X_{172} \bullet X_{175} \bullet X_{196} \bullet X_{199} \bullet X_{204} \bullet X_{207} \bullet X_{210} \bullet X_{248} \bullet X_{251} \bullet X_{252} \dots
 \end{aligned} \tag{19}$$

- вероятностная, в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме:

$$\begin{aligned}
 & \dots p_{71} * p_{74} * p_{77} * p_{80} * p_{91} + p_{66} * p_{74} * p_{76} * p_{79} * p_{90} + p_{65} * p_{72} * p_{75} * p_{78} \\
 & * p_{89} + p_{140} * p_{147} * p_{150} * p_{153} * p_{156} * p_{159} * p_{171} * p_{174} * p_{177} * p_{198} * p_{201} * p_{206} \\
 & * p_{209} * p_{212} * p_{250} * p_{255} * p_{256} + p_{139} * p_{146} * p_{149} * p_{152} * p_{155} * p_{158} * p_{170} * p_{173} \\
 & * p_{176} * p_{197} * p_{200} * p_{205} * p_{208} * p_{211} * p_{249} * p_{253} * p_{254} + p_{138} * p_{145} * p_{148} * p_{151} \\
 & * p_{154} * p_{157} * p_{169} * p_{172} * p_{175} * p_{196} * p_{199} * p_{204} * p_{207} * p_{210} * p_{248} * p_{251} * p_{252} \dots
 \end{aligned} \tag{20}$$

Результаты анализа изменений в УБ блока, обусловленные проведением внепланового ТОиР САОЗ ВД, представлены в столбцах 1 – 5 таблицы 3.

Установлено, что проведение внеплановых ТОиР оборудования САОЗ ВД в течение ДВВЭ 72 ч. не вызывает значимого ухудшения УБ ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000. На этом основании сделано предположение, что требования ТР в части ДВВЭ оборудования САОЗ ВД во время проведения внеплановых ТОиР являются излишне консервативными. Для проверки данного предположения проанализированы изменения в УБ ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000 при увеличении ДВВЭ САОЗ ВД до 120 ч. (при этом СФЦ не изменяются, логические и вероятностные модели системы остаются такими же, см. формулы 21 и 22). Результаты анализа представлены в столбцах 1, 6 – 9 таблицы 3. Установлено, что при ДВВЭ 120 ч. УБ ЭБ АС снижается приемлемо. Сделан вывод, что в целях повышения ПЭ ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000 требования ТР в части рассматриваемого ДВВЭ могут быть смягчены.

Таблица 3 – Фактор RIF при проведении внеплановых ТОиР САОЗ ВД ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000

ИС	ДДВЭ – 72 ч.				ДДВЭ – 120 ч.			
	Частота повреждения ЯТ, $\frac{\text{реактор}}{\text{год}}$		Фактор повышения риска (оценен по критериям, представленным в столбцах 1, 3, 4 таблицы 2)/ Оценка влияния предлагаемых изменений в порядке проведения ТОиР на УБ		Частота повреждения ЯТ, $\frac{\text{реактор}}{\text{год}}$		Фактор повышения риска (оценен по критериям, представленным в столбцах 1, 3, 4 таблицы 2)/ Оценка влияния предлагаемых изменений в порядке проведения ТОиР на УБ	
	Все каналы исправны $FDF_{72, all}$	Канал выведен в ремонт, $FDF_{72, dis}$			Все каналы исправны $FDF_{120, all}$	Канал выведен в ремонт, $FDF_{120, dis}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ИС-1	1.96E-7	2.017E-7	$RIF_{72}=1.029$	$RIF_{72} \leq \frac{1E-4}{FDF_{72, все ИС}}$ – приемлемое снижение УБ, выполняются требования НП-001-97 в части ВПБ	3.109E-7	3.604E-7	$RIF_{120}=1.159$	$RIF_{120} \leq \frac{1E-4}{FDF_{120, все ИС}}$ – приемлемое снижение УБ, выполняются требования НП-001-97 в части ВПБ
ИС-2	9.24E-6	9.507E-6	$RIF_{72}=1.028$		1.466E-5	1.699E-5	$RIF_{120}=1.159$	
ИС-3	1.69E-9	1.702E-9	$RIF_{72}=1.007$		2.74E-9	2.767E-9	$RIF_{120}=1.010$	
ИС-4	1.70E-9	1.745E-9	$RIF_{72}=1.026$		2.76E-9	2.837E-9	$RIF_{120}=1.028$	
ИС-5	6.87E-9	7.727E-9	$RIF_{72}=1.125$		1.12E-9	1.264E-9	$RIF_{120}=1.129$	
ИС-6	5.12E-9	5.890E-9	$RIF_{72}=1.150$		8.32E-9	9.577E-9	$RIF_{120}=1.151$	
ИС-7	6.20E-9	6.567E-9	$RIF_{72}=1.059$		1.01E-9	1.068E-9	$RIF_{120}=1.057$	
ИС-8	5.90E-9	6.459E-9	$RIF_{72}=1.095$		9,59E-9	1.065E-8	$RIF_{120}=1.110$	
Общее	2.87E-5	2.898E-5	$RIF_{72}=1.009$		3.424E-5	3.662E-5	$RIF_{120}=1.069$	

Для целей апробации метода ППР выбрана САПР. Проанализированы изменения в УБ ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000 при выводе в плановые ТОиР (ППР) оборудования сразу 2 из 3 каналов безопасности системы (условно – стратегия № 2). Произведен качественный анализ функционирования оборудования САПР при нормальной и аварийной эксплуатации ЭБ АС. Смоделирована работа ЭБ АС на пониженных уровнях мощности и в режимах останова в условиях воздействия следующих ИС:

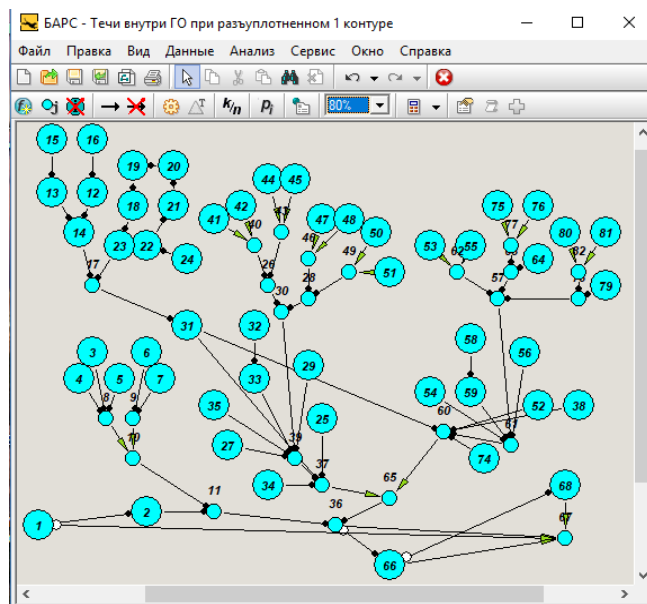


Рисунок 5 – СФЦ функционирования ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000 при реализации ИС-9

течи за пределы ГО при разуплотненном I контуре (далее – ИС-9 и ИС-11 соответственно); течи за пределы ГО при уплотненном I контуре вследствие течей трубопровода САПР за пределы ГО/ложного открытия арматуры на линии продувки (далее – ИС-12 и ИС-10 соответственно); нарушение отвода тепла от активной зоны при уплотненном/разуплотненном I контуре (далее – ИС-13 и ИС-14 соответственно).

Для каждого случая воздействия вышеперечисленных ИС разработаны соответствующие СФЦ; на рисунке 5 представлен пример СФЦ, разработанной для случая воздействия ИС-9.

Получены следующие модели системы (применительно к ИС-9):

- логическая, в виде множества кратчайших путей успешного функционирования:

$$\begin{aligned} & \dots X_{105} \bullet X_{106} \vee X_{31} \bullet X_{52} \bullet X_{126} \vee X_{128} \bullet X_{25} \bullet X_{31} \bullet X_{105} \bullet X_{126} \bullet X_{127} \vee X_{25} \bullet X_{31} \bullet X_{106} \\ & \bullet X_{126} \bullet X_{127} \vee X_{31} \bullet X_{52} \bullet X_{105} \bullet X_{126} \bullet X_{128} \vee X_{31} \bullet X_{52} \bullet X_{106} \bullet X_{126} \bullet X_{128} \dots \end{aligned} \quad (21)$$

- вероятностная, в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме:

$$\begin{aligned} & \dots P_{105} * P_{106} + P_{31} * P_{52} * P_{126} + P_{128} * P_{25} * P_{31} * P_{105} * P_{126} * P_{127} + P_{25} * P_{31} * P_{106} \\ & * P_{126} * P_{127} + P_{31} * P_{52} * P_{105} * P_{126} * P_{128} + P_{31} * P_{52} * P_{106} * P_{126} * P_{128} \dots \end{aligned} \quad (22)$$

Результаты анализа изменений в УБ ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000, обусловленные выводом в плановые ТОиР (ППР) сразу 2 из 3 каналов САПР, представлены в столбцах 1 – 5 таблицы 4. Установлено, что с точки зрения приемлемости УБ реализация предлагаемой стратегии № 2 допустима. На основании этого сделано заключение: в целях повышения ПЭ ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000 стратегия № 2 может быть реализована.

Таблица 4 – Фактор RIF , обусловленный базовой и предлагаемой стратегией эксплуатации оборудования САПР при проведении ППР ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000

ИС	Частота повреждения ЯТ при базовой стратегии FDF_b , реактор/год	Стратегия эксплуатации № 2		Стратегия эксплуатации № 3			
		Частота повреждения ЯТ $FDF_{\#2}$, реактор/год	Фактор повышения риска (оценен по критериям, представленным в столбцах 1, 3, 4 таблицы 2)/ Оценка влияния предлагаемых изменений в порядке проведения ТОиР на УБ	Частота повреждения ЯТ $FDF_{\#3}$, реактор/год	Фактор повышения риска (оценен по критериям, представленным в столбцах 2, 3, 5 таблицы 2)/ Оценка влияния предлагаемых изменений в порядке проведения ТОиР на УБ		
1	2	3	4	5	6	7	8
ИС-9	3.567E-6	2.985E-5	$RIF_{\#2}=8.368$	$RIF_{\#2} \leq \frac{1E-4}{FDF_6}$ – приемлемое снижение УБ, выполняются требования НП-001-97 в части ВПБ	3.471E-6	$RIF_{\#3}=0.973$	$RIF_{\#3} \leq \frac{1E-5}{FDF_6}$ – приемлемое снижение УБ, выполняются требования НП-001-15 в части ВПБ
ИС-10	1.512E-7	1.374E-6	$RIF_{\#2}=9.087$		7.661E-8	$RIF_{\#3}=0.507$	
ИС-11	1.310E-8	5.569E-8	$RIF_{\#2}=4.251$		9.569E-9	$RIF_{\#3}=0.730$	
ИС-12	2.467E-6	8.246E-6	$RIF_{\#2}=3.342$		2.308E-6	$RIF_{\#3}=0.935$	
ИС-13	9.216E-6	3.295E-5	$RIF_{\#2}=3.575$		9.984E-7	$RIF_{\#3}=0.108$	
ИС-14	4.359E-6	1.521E-5	$RIF_{\#2}=3.489$		2.299E-6	$RIF_{\#3}=0.527$	
Общее	1.961E-5	8.763E-5	$RIF_{\#2}=4.469$		9.162E-6	$RIF_{\#3}=0.467$	

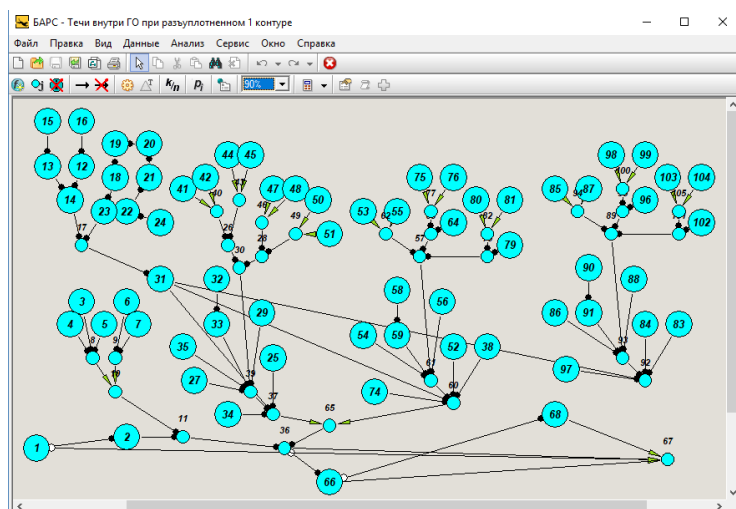


Рисунок 6 – СФЦ функционирования ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000 с 4-х канальной САПР при реализации ИС-9

Принимая во внимание, что в проектах вновь вводимых в эксплуатацию ЭБ АС в основном применяется 4-х кратное резервирование, были рассмотрены изменения в УБ ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000 при предположении, что САПР состоит не из 3 каналов безопасности, а из 4 (условно – стратегия № 3). Для анализа данных изменений ранее разработанные СФЦ дополнены «новыми» каналами САПР. СФЦ для 4-х канальной САПР, разработанная для случая воздействия ИС-9, представлена на рисунке 6.

Получены следующие модели

системы (касательно ИС-9 при 4-х канальной САПР):

- логическая, в виде множества кратчайших путей успешного функционирования:

$$\begin{aligned} & \dots x_{125} \bullet x_{126} \vee x_{129} \bullet x_{18} \bullet x_{19} \bullet x_{20} \bullet x_{21} \bullet x_{22} \bullet x_{23} \bullet x_{24} \vee x_{54} \bullet x_{56} \\ & \bullet x_{58} \bullet x_{59} \bullet x_{131} \vee x_{27} \bullet x_{29} \bullet x_{32} \bullet x_{33} \bullet x_{35} \bullet x_{130} \vee x_{12} \bullet x_{13} \bullet x_{14} \\ & \bullet x_{15} \bullet x_{16} \vee x_{120} \bullet x_{127} \bullet x_{128} \vee x_{123} \bullet x_{124} \dots \end{aligned} \quad (23)$$

- вероятностная, в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме:

$$\begin{aligned} & \dots p_{125} * p_{126} + p_{129} * p_{18} * p_{19} * p_{20} * p_{21} * p_{22} * p_{23} * p_{24} + p_{54} * p_{56} \\ & * p_{58} * p_{59} * p_{131} + p_{27} * p_{29} * p_{32} * p_{33} * p_{35} * p_{130} + p_{12} * p_{13} * p_{14} \\ & * p_{15} * p_{16} + p_{120} * p_{127} * p_{128} + p_{123} * p_{124} \dots \end{aligned} \quad (24)$$

Результаты анализа изменений в УБ ЭБ АС с реактором типа ВВЭР-1000, обусловленных выводом в плановые ТОиР (ППР) сразу 2 из 4 каналов САПР, представлены в столбцах 1, 2, 6 – 8 таблицы 4. Установлено, что реализация стратегии № 3 допустима с позиции обеспечения требуемого УБ. Более того, она удовлетворяет требованиям НП-001-15. Сделан вывод, что применение метода ППР особенно эффективно для проектов вновь вводимых в эксплуатацию ЭБ АС, т.к. их УБ выше (иногда существенно) УБ эксплуатируемых ЭБ АС.

В соответствии с разработанными методами сформированы практические рекомендации по выбору стратегий эксплуатации САОЗ НД при проведении плановых и внеплановых ТОиР ЭБ № 5 НВАЭС. Для этого использовались логико-вероятностные ММ ЭБ № 5 НВАЭС, разработанные сотрудниками ФБУ «НТЦ ЯРБ» в рамках проекта SwisRus. Проанализированы 3 стратегии эксплуатации САОЗ НД при проведении внеплановых ТОиР: базовая, удовлетворяющая требованиям ТР (ДВВЭ: 72 ч.), и 2 стратегии, связанные с ужесточением и со смягчением требований ТР в части ДВВЭ (выбраны 24 ч. и 120 ч. соответственно).

Результаты анализа изменений в УБ ЭБ № 5 НВАЭС, вызываемые проведением внеплановых ТОиР САОЗ НД в соответствии с вышеуказанными стратегиями, представлены в таблице 5. Установлено, что, с одной стороны, сокращение ДВВЭ до 24 ч. позволяет несколько повысить УБ (по сравнению с базовой стратегией), с другой – обуславливает излишнюю консервативность ТР, а также снижение ПЭ ЭБ № 5 НВАЭС. Увеличение ДВВЭ до 120 ч. наоборот несколько ухудшает УБ блока, однако, позволяет пересматривать требования ТР в сторону их смягчения (при условии предусмотрения соответствующих компенсирующих мер). Сделан вывод, что с точки зрения ПЭ ЭБ № 5 НВАЭС из 3 проанализированных стратегий предпочтительной является стратегия № 3, т.к. она позволяет дольше эксплуатировать блок без снижения его мощности, не вызывая при этом значительных ухудшений его УБ.

Таблица 5 – Фактор RIF, обусловленный проведением внеплановых ТОиР оборудования САОЗ НД ЭБ № 5 НВАЭС

Стратегия эксплуатации		Частота повреждения ЯТ, $p_{\text{актор/год}}$	Фактор повышения риска (оценен по критериям, представленным в столбцах 1, 3, 5 таблицы 2)/ Оценка влияния предлагаемых изменений в ТОиР с позиции приемлемости вызываемых изменений в УБ ЭБ АС
1		2	3
Базовая	Все каналы исправны	6.934E-4	$RIF_b = 1.011, \frac{1E-4}{FDF_b} < RIF_b < \frac{1E-3}{FDF_b}$ – значительное снижение УБ, необходимо предусмотреть компенсирующие меры, такие, чтобы обеспечить выполнение требований НП-001-97 в части ВПБ
	Канал выведен из эксплуатации	7.013E-4	

Продолжение таблицы 5

1		2	3
№ 2	Все каналы исправны	6.661E-4	$RIF_{24}=1.011, \frac{1E-4}{FDF_{24}} < RIF_{24} < \frac{1E-3}{FDF_{24}}$ – значительное снижение
	Канал выведен из эксплуатации	6.732E-4	УБ, необходимо предусмотреть компенсирующие меры, такие, чтобы обеспечить выполнение требований НП-001-97 в части ВПБ
№ 3	Все каналы исправны	6.942E-4	$RIF_{120}=1.063, \frac{1E-4}{FDF_{120}} < RIF_{120} < \frac{1E-3}{FDF_{120}}$ – значительное снижение
	Канал выведен из эксплуатации	7.379E-4	УБ, необходимо предусмотреть компенсирующие меры, такие, чтобы обеспечить выполнение требований НП-001-97 в части ВПБ

В соответствии с предложенным методом оценки рисков (см. формулу 6) проанализированы риски, обуславливаемые проведением внеплановых ТОиР САОЗ НД ЭБ № 5 НВАЭС в соответствии с базовой стратегией эксплуатации и стратегией № 3. Расчеты проведены для таких категорий аварийного выброса, как: ранее/позднее повреждение ГО при работе/отказе спринклерной системы; отсутствие повреждения ГО; проплавление бетонного пола шахты; отказ системы изолирующей арматуры; повреждение трубок парогенератора воздействием высокой температуры; течь за пределы ГО. Полученные величины рисков представлены в таблице 6 (в целях сокращения объема автореферата приведены результаты, полученные для категорий аварийного выброса: ранее повреждение ГО при работе/отказе спринклерной системы).

Таблица 6 – Риски от эксплуатации ЭБ № 5 НВАЭС, связанные с выходом РН

Группы РН	Относительный выход РН (% от начального состава активной зоны)	Кол-во входящих в группу РН, кг	Риски от эксплуатации ЭБ № 5 НВАЭС, кг × (реактор/год)			
			Категория аварийного выброса «Раннее повреждение ГО при работе спринклерной системы»		Категория аварийного выброса «Раннее повреждение ГО при отказе спринклерной системы»	
			Базовая стратегия эксплуатации	Стратегия № 3	Базовая стратегия эксплуатации	Стратегия № 3
1	2	3	4	5	6	7
Xe-Kr	0.99	512.4	3.449E-3	4.011E-3	3.449E-3	4.011E-3
CsI	0.08	21.6	1.175E-5	1.366E-5	1.616E-5	1.878E-5
CsOH	0.08	272	1.480E-4	1.720E-4	2.035E-4	2.366E-4
Te	0.16	45	4.896E-5	5.690E-5	1.683E-5	1.957E-5
Sr-Ba	0.05	201.5	6.851E-5	7.966E-5	2.740E-5	3.186E-5
Mo	0.18	151	1.848E-4	2.149E-4	2.054E-5	2.388E-5
La-Ce-Ru	0.01	791	5.379E-5	6.254E-5	2.689E-7	3.128E-7

Установлено, что по сравнению с базовой стратегией эксплуатации реализация стратегии № 3 связана с большими рисками выхода РН в окружающую среду. Сделан вывод, что, тем не менее, проведение внеплановых ТОиР САОЗ НД в соответствии со стратегией № 3 является предпочтительным, т.к. ее реализация позволяет повышать ПЭ ЭБ № 5 НВАЭС.

Проанализированы 2 стратегии эксплуатации САОЗ НД при проведении плановых ТОиР (ППР) (во время различных эксплуатационных состояний, в которых находится ЭБ № 5 НВАЭС при ППР): базовая, предписывающая поочередный вывод в плановые ТОиР (ППР) каждого канала безопасности системы, и предлагаемая, допускающая вывод в плановые ТОиР (ППР) обо-

рудования сразу 2 из 3 каналов безопасности. Результаты анализа представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Фактор RIF , обусловленный базовой и предлагаемой стратегиями эксплуатации оборудования САОЗ НД при проведении ППР ЭБ № 5 НВАЭС

Эксплуатационное состояние, во время которого производятся плановые ТОиР (ППР) оборудования САОЗ НД	Частота повреждения ЯТ, ^{реактор} /год		Фактор повышения риска (оценен по критериям, представленным в столбцах 1, 3, 5 таблицы 2)/ Оценка влияния предлагаемых изменений в порядке проведения ТОиР на УБ
	стратегия		
	Базовая	Предлагаемая	
1	2	3	4
Расхолаживание с температуры 90°С в I контуре и КД до температуры 50°С на выходе из реактора	1.2E-6	1.3E-5	$RIF=10.833$, $RIF \leq \frac{1E-4}{FDF_{\text{б,ППР}}}$ – приемлемое снижение УБ, требования НП-001-97 в части ВПБ выполняются
Подготовка к проведению и проведение операций по перемещению всех ТВС, всех ПС СУЗ и стержней выгорающего поглотителя в реакторе, бассейне выдержке и бассейне перегрузки. Извлечение шахты реактора. Дренаживание реактора	1.6E-5	9.7E-5	$RIF=6.062$, $\frac{1E-4}{FDF_{\text{б,ППР}}} < RIF < \frac{1E-3}{FDF_{\text{б,ППР}}}$ – значительное снижение УБ, необходимо предусмотреть компенсирующие меры, такие, чтобы обеспечить выполнение требований НП-001-97 в части ВПБ
Подготовка к проведению и проведение операций по перемещению ТВС, ПС СУЗ и стержней выгорающего поглотителя в реакторе, бассейне выдержке и бассейне перегрузки	1.7E-5	1.1E-4	$RIF=6.471$, $\frac{1E-4}{FDF_{\text{б,ППР}}} < RIF < \frac{1E-3}{FDF_{\text{б,ППР}}}$ – значительное снижение УБ необходимо предусмотреть компенсирующие меры, такие, чтобы обеспечить выполнение требований НП-001-97 в части ВПБ
Дозаполнение I контура	4.8E-7	6.8E-6	$RIF=14.167$, $\frac{1E-4}{FDF_{\text{б,ППР}}} < RIF < \frac{1E-3}{FDF_{\text{б,ППР}}}$ – значительное снижение УБ, необходимо предусмотреть компенсирующие меры, такие, чтобы обеспечить выполнение требований НП-001-97 в части ВПБ
Реактор разуплотнен/уплотнен; ремонт оборудования I контура	5.9E-5	1.0E-4	$RIF=1.864$, $RIF \leq \frac{1E-4}{FDF_{\text{б,ППР}}}$ – приемлемое снижение УБ, требования НП-001-97 в части ВПБ выполняются
Общее (включая все эксплуатационные состояния, во время которых производятся плановые ТОиР (ППР) ЭБ № 5 НВАЭС)	2.0E-4	3.7E-4	$RIF=1.850$, $\frac{1E-4}{FDF_{\text{б,ППР}}} < RIF < \frac{1E-3}{FDF_{\text{б,ППР}}}$ – значительное снижение УБ, необходимо предусмотреть компенсирующие меры, такие, чтобы обеспечить выполнение требований НП-001-97 в части ВПБ

Установлено, что в целом реализация предлагаемой стратегии обуславливает определенное снижение УБ ЭБ №5 НВАЭС. Сделан вывод, что с точки зрения приемлемости УБ ЭБ № 5 НВАЭС во время проведения планового ТОиР (ППР) реализация предлагаемой стратегии является допустимой, но только при условии предусмотрения компенсирующих мер, направленных на повышение УБ ЭБ № 5 НВАЭС.

Проведен расчет, доказывающий, что с точки зрения ПЭ ЭБ № 5 НВАЭС предлагаемая стратегия также является предпочтительной, т.к. ее реализация позволяет сокращать сроки простоев блока в ППР, тем самым повышая ПЭ ЭБ № 5 НВАЭС.

В заключении сформулированы основные результаты выполненной диссертационной работы, свидетельствующие о решении поставленных задач, и сформулированы выводы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложено использование результатов ВАБ уровней 1 и 2 для целей оценивания рисков (и ущербов) от функционирования ЭБ АС, величины которых определяются особенностями функционирования самого ЭБ АС, а не условиями окружающей среды.
2. Предложены методы повышения ПЭ ЭБ АС посредством сокращения времен простоев ЭБ АС в плановых и внеплановых ТОиР его оборудования при условии одновременного обеспечения требуемого УБ АС.
3. Предложены способы количественного учета зависимости УБ ЭБ АС от конфигураций оборудования, связанных с проведением плановых и внеплановых ТОиР его оборудования, в соответствии с установленным в ТР порядком. Предложенные способы также позволяют анализировать допустимость предлагаемых конфигураций ЭБ АС, ориентированных на увеличение ДВВЭ и/или сокращение сроков проведения плановых ТОиР (ППР).
4. Сформулированы подходы к формированию практических рекомендаций по повышению ПЭ ЭБ АС посредством уменьшения длительности простоев ЭБ АС в плановых и внеплановых ТОиР при условии сохранения требуемого УБ ЭБ АС.
5. Продемонстрированы возможности одновременного повышения ПЭ ЭБ АС посредством пересмотра принятых стратегий проведения плановых и внеплановых ТОиР (в сторону увеличения продолжительностей времен работы ЭБ АС на мощности) и одновременного обеспечения требуемого УБ ЭБ АС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

<i>RIF</i>	–	Risk Increase Factor;
АП	–	аварийная последовательность;
ВАБ	–	вероятностный анализ безопасности;
ВПБ	–	вероятностные показатели безопасности;
ДВВЭ	–	допустимое время вывода из эксплуатации;
ИС	–	инициирующие событие;
КИУМ	–	коэффициент использования установленной мощности;
ММ	–	математическая модель;
НВАЭС	–	Нововоронежская атомная электрическая станция;
ППР	–	планово-предупредительный ремонт;
ПЭ	–	приемлемость эксплуатации;
РН	–	радионуклиды;

CAOЗ ВД	–	система аварийного охлаждения активной зоны высокого давления;
CAOЗ НД	–	система аварийного охлаждения активной зоны низкого давления;
САПР	–	система аварийного и планового расхолаживания;
СФЦ	–	схема функциональной целостности;
ТОиР	–	техническое обслуживание и ремонт;
ТР	–	технологический регламент;
УБ	–	уровень безопасности;
ЭБ АС	–	энергоблок атомной станции;
ЯТ	–	ядерное топливо.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Антонов А.В., Ершов Г.А., Морозова О.И. Обоснование безопасности и эффективности эксплуатации АЭС при выборе параметров технического обслуживания и ремонта// Журнал «Известия вузов. Ядерная энергетика» № 4, 2019 – с. 83 – 94.
2. Антонов А.В., Ершов Г.А., Морозова О.И. Сравнение уровней безопасности и рисков от эксплуатации энергоблоков атомных станций// Безопасность жизнедеятельности № 2, 2015 – с. 28 – 34.
3. Антонов А.В., Ершов Г.А., Морозова О.И. Основные критерии приемлемости риска от эксплуатации энергоблоков атомных станций// Безопасность жизнедеятельности № 1, 2015 – с. 25 – 29.
4. Антонов А.В., Ершов Г.А., Морозова О.И. Повышение экономической эффективности эксплуатации энергоблоков атомных станций с учетом обеспечения безопасности// Всероссийский научно-методический и информационный журнал «Безопасность в техносфере» № 4(49)/2014, 2014 – с. 67 – 71.
5. Антонов А.В., Ершов Г.А., Морозова О.И. Повышение экономической эффективности атомных станций за счёт сокращения простоев при техническом обслуживании и ремонте// Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал № 6 (58), 2014.
6. Антонов А.В., Ершов Г.А., Морозова О.И. Обоснование критериев для сравнения уровней безопасности и рисков от эксплуатации блоков АЭС// ГеоРиск, № 4, 2014 – с. 34 – 38.
7. Антонов А.В., Ершов Г.А., Морозова О.И. Риск-информативный подход к обеспечению безопасности эксплуатации энергоблоков атомных станций// Всероссийский научно-методический и информационный журнал «Безопасность в техносфере» № 1(40)/2013, 2013 – с. 14 – 19.
8. Берг Т.В., Бредова В.А., Былов И.А., Ершов Г.А., Морозова О.И., Самохин Г.И., Носков Д.Е. и др. Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних иницирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции. РБ-024-11// Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 9 сентября 2011 г. № 519.
9. Морозова О.И., Носков Д.Е., Самохин Г.И., Сахиббадинова И.Р., Шиверский Е.А. и др. Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 2 атомных станций с реакторами типа РБМК. РБ-068-11// Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22.12.2011 № 729.