

ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОГО И МЕЖДУНАРОДНОГО ОПЫТА ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ, ВАЖНЫХ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС**В. И. Скалозубов, Ю. А. Комаров, В. Н. Колыханов, В. Ю. Кочнева, Т. В. Габлая***Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

Представлены основные требования нормативных и эксплуатационных документов по установлению периодичности испытаний систем, важных для безопасности АЭС, кратко изложены теоретические методы оптимизации испытаний технических систем, проанализированы инженерные зарубежные методики по изменению периодичности испытаний систем АЭС. На основании данного обзорного анализа сформулированы задачи для дальнейших работ по усовершенствованию методической базы оптимизации периодичности испытаний систем, важных для безопасности.

Ключевые слова: безопасность, надежность, испытания, отказ, вероятность, восстановление, ремонт, система, АЭС.

Обзорный анализ нормативно-эксплуатационной документации АЭС Украины

В соответствии с [1] системы, важные для безопасности (СВБ) АЭС, должны подвергаться регулярному техническому обслуживанию и испытаниям. Целью таких мероприятий является поддержание работоспособности и подтверждение проектных характеристик систем. На АЭС применяется система планово-предупредительных ремонтов (ППР), в процессе которых устраняются накопившиеся в процессе эксплуатации дефекты, частично восстанавливается ресурс оборудования. Документом, который регламентирует структуру ремонтного цикла основного оборудования АЭС, является СОУ-Н ЯЕК 1.010:2008 [2]. Испытания основного оборудования проводятся по завершении ППР перед пуском блока. Проведение каких-либо ремонтных работ или испытаний основного оборудования при работе реактора на мощности не представляется возможным, поэтому такие мероприятия регламентом не предусматриваются. Иначе обстоят дела со вспомогательным оборудованием СВБ. Так, для систем безопасности (СБ) и СВБ нормальной эксплуатации (НЭ) предусмотрены регламентные испытания при работе реактора на мощности. Кроме того, многоканальная структура СБ и СВБ НЭ позволяет производить ремонт отказавшего оборудования. Помимо проведения регламентных опробований, для непрерывно работающих СВБ НЭ характерны мероприятия по плановому переключению (переходу) с рабочего канала на один из резервных каналов. Данные мероприятия именуются как автоматический ввод резерва (АВР). По факту планового АВР, в соответствии с графиком ввода в работу совместно с уже работающим каналом, подключается резервный канал. Некоторое время каналы работают одновременно, при этом ранее неработавший канал проходит ряд испытательных тестов. В случае его нормальной работы данный канал оставляют во включенном состоянии, а ранее работавший канал переводят в резерв. Разумеется, АВР, также как и периодические опробования, влияют на надежность работы системы. В ряде случаев при наличии плановых АВР дополнительные регламентные опробования не проводят, поскольку процесс планового АВР и последующая работа в течение некоторого времени рассматриваются как периодические опробования резервного канала системы.

В процессе выполнения обзорного анализа установлено, что правила выбора и обоснования частоты и объема периодических проверок, осуществляемых при нахождении реактора на мощности, отсутствуют в руководящих документах. В соответствии с [1] частота и объем периодических проверок должны быть установлены графиками, разрабатываемыми администрацией АЭС. При этом графики проведения регулярного технического обслуживания, ремонта и проверки разрабатываются на основе проектных требований и технологиче-

ского регламента (ТРБЭ). Однако существующие в настоящее время технические проекты АЭС не содержат необходимой для разработки графика информации, а ТРБЭ содержит регламент испытаний, определенный по рекомендациям организаций-проектировщиков и изготовителей на момент начала эксплуатации энергоблока на основании данных заводов-изготовителей оборудования. Следует учитывать, что большинство действующих энергоблоков ВВЭР в Украине имеют значительный срок эксплуатации, сопоставимый с ресурсным. Таким образом, при составлении графика регламентных испытаний следует учитывать опыт эксплуатации и изменение надежностных характеристик оборудования СВБ.

В связи с этим можно сделать вывод, что необходимое обоснование частоты регламентных испытаний и плановых переходов по АВР вспомогательного оборудования СВБ при работе реактора на мощности (в условиях длительного срока эксплуатации энергоблока) отсутствует.

Обзор методов оптимизации испытаний технических систем

В настоящее время имеется большое количество научных работ, статей и монографий, посвященных вопросам оценки надежности различного рода технических систем. Вопросы, связанные с оценкой оптимального периода контроля профилактических и восстановительных работ на основе вероятностного подхода, также неоднократно исследовались и первоначально были направлены на нужды радиоэлектронной, а затем компьютерной отрасли.

Все известные работы по данной тематике можно условно разделить на три группы.

К первой относятся работы, непосредственно касающиеся принципов нахождения оптимальных графиков восстановительно-профилактических мероприятий. В данных работах излагаются подходы, теоретическая обоснованность таких оптимизационных исследований, а также отдельные модели технических систем и результаты оптимизации их контроля. Так, работы [3, 4] в основном носят теоретический характер, однако их положения могут быть основой для разработки математических моделей оптимизации периодичности технического обслуживания и планового ремонта (ТОиР) СВБ. Работа [5] регламентирует подход при определении критерия оптимизации и порядок оптимизации проведения замен технических устройств. Однако данная методика не рассматривает системы с канальной структурой, у элементов которых возможны различные периодичности замен либо наличие сдвига между моментами замен в каналах. При этом в результате замены объект полностью восстанавливается, что не характерно для функционирования СВБ. Кроме того, в качестве критерия оптимизации принят показатель эффективности на единицу затрат, что является неприемлемым для СВБ НЭ (см. [6]). Работами, в которых наиболее полно и систематично изложены принципы математической теории надежности вообще и оптимизация периодичности контроля и профилактики в частности, являются [7–11], однако прямое применение к оптимизации периодичности испытаний/опробований СВБ АЭС методик и алгоритмов, представленных в этих работах, невозможно. Поскольку либо разработанные модели неприемлемы для оптимизации периодических испытаний СВБ (оптимизация по ресурсу, по финансовым и трудовым затратам), либо заложенные в модели допущения или стратегии контроля нехарактерны для СВБ (например, перепланирование сроков планово-восстановительных работ в зависимости от момента предыдущего отказа), либо модель носит очень общий характер, требующий значительного дополнительного исследования, необходима разработка подхода и принципа моделирования функционирования рассматриваемых систем АЭС. В работах [12, 13] непосредственно рассмотрены вопросы оптимизации стратегии и периодичности испытаний СВБ. В этих работах, в частности, обосновывается асинхронная стратегия проведения испытаний каналов СВБ со сдвигом между испытаниями. Анализ проводится для случая высоконадежных каналов, структура канала не рассмотрена. Не учтена возможность проведения испытаний части элементов канала, не проведен учет неполноты восстановлений после испытаний и/или ТОиР. Кроме того, функционирование СВБ проходит в более простом режиме по сравнению с СВБ НЭ, поэтому непосредственное применение разработок для последних невозможно.

К следующей группе относятся работы, которые напрямую не посвящены исследованию влияния испытаний/опробований на надежность систем и оборудования. Однако данные работы освещают подходы моделирования надежности различного рода систем, в том числе и систем АЭС. При создании наиболее обобщенного подхода для оценки надежности любого технического объекта необходимо учитывать любые действия (как случайные, так и детерминированные), которые приводят к изменению вероятностных показателей надежности. Проведение периодических профилактических мероприятий в значительной степени влияет на показатели надежности, поэтому включение их при моделировании надежности обязательно. Однако в большинстве обобщенных моделей надежности эти особенности не учитываются (см., например, фундаментальные работы [8–10]). Тем не менее подходы, изложенные в данных работах, позволяют корректно смоделировать системы со сложной, разветвленной структурой, элементы которой могут находиться в нескольких состояниях, и формализовать некоторые другие особенности, характерные для систем АЭС. Поэтому данные работы смогут дополнить работы первой группы, которые, как правило, рассматривают достаточно простые системы.

Третья группа работ, посвящена вероятностному анализу безопасности (ВАБ) или вероятностной оценке безопасности (ВОБ). В последнее время проведены ВАБ для "пилотных" энергоблоков АЭС Украины (1-й блок Южно-Украинской АЭС, 1-й и 4-й блоки Ровенской АЭС, 5-й блок Запорожской АЭС, 2-й блок Хмельницкой АЭС). ВАБ обладает мощным аппаратом, способным анализировать различные проектные и эксплуатационные решения, выявлять слабые места проекта и оценивать текущий уровень безопасности АЭС. Определенную роль в этом анализе играет график периодических испытаний/опробований систем АЭС. Более подробно аспекты возможного использования ВАБ представлены ниже.

Обзор зарубежных подходов по изменению периодичности испытаний систем АЭС

В процессе эксплуатации АЭС ее узлы могут подвергаться различным воздействиям. Последствия этих воздействий невозможно предсказать с достаточной точностью для всего периода эксплуатации. Для того чтобы удостовериться в работоспособности и соответствии проектным характеристикам, необходимо периодически проводить надзор за узлами и системами АЭС.

Единый метод (подход) по изменению (усовершенствованию) периодичности испытаний систем АЭС отсутствует. Документом, который в наибольшей степени обобщает существующие методы (подходы) оптимизации ТОиР, является издание МАГАТЭ от 1993 г. [14] и более общее от 2003 г. [15]. В методологической части документа (TECDOC-1383 [15]) описаны два подхода к оптимизации программ ТОиР – подход, ориентированный на надежность (НОП), и риск-ориентированный подход (РОП). Оба подхода направлены на корректировку ТОиР таким образом, чтобы обеспечить максимальную безопасность и эффективность эксплуатации АЭС. Для обоих подходов необходимо выделить критические компоненты и провести анализ их влияния на безопасность и эффективность эксплуатации АЭС. Отличия между этими подходами состоит в том, что в случае НОП степень влияния на безопасность и эффективность эксплуатации АЭС определяется на основании детерминированного анализа, и усовершенствуют программу ТОиР на основании анализа отказов (как возникших, так и потенциально возможных) критических компонентов. В случае применения РОП применяют вероятностные оценки значений риска и последствий отказа, используя модели и результаты ВАБ. В зависимости от полученной градации компонентов назначается объем и периодичность ТОиР. В обоих случаях все внимание уделено оценке влияния компонента на надежность или на безопасность и эффективность эксплуатации АЭС, а назначение периодичности проводится из принципа: большее влияние на анализируемый показатель – более частое проведение испытаний. Конкретное определение величины периодичности испытаний не проводится.

При использовании моделей и результатов ВАБ для обоснования изменения периодичности испытаний часто пренебрегают отрицательным влиянием испытаний. То есть учитывается только одна тенденция – с уменьшением длительности между испытаниями риск снижается. Критерием приемлемости новой периодичности испытаний является либо сохранение текущего уровня риска, либо пренебрежимо малое его увеличение. Однако в соответствии с законодательством Украины любая модификация энергоблока АЭС не должна уменьшать уровень безопасности [16], поэтому второй критерий изменения периодичности испытаний неприемлем для СВБ.

Для сохранения текущего уровня риска и увеличение длительности между испытаниями предлагается введение компенсирующих мероприятий [17]. Также возможно изменение периодичности по ряду компонентов (увеличение для одних и снижение для других) с сохранением общего уровня риска на прежнем уровне [18].

Как свидетельствует опыт эксплуатации, контрольные испытания могут неблагоприятно воздействовать на безопасность из-за нежелательных побочных эффектов (см., например, [14], [19]). Можно выделить следующие нежелательные эффекты от проведения испытаний:

- возникновение переходного процесса (что может привести к аварийной ситуации и повреждению активной зоны);

- износ оборудования;

- ошибки персонала при испытаниях, такие как нарушение схем подключения компонента;

- неготовность компонента во время проведения испытания;

- радиоактивное облучение персонала станции;

- ненужная загруженность работой персонала при переизбытке испытаний.

Вместе с тем существуют трудности в объединении влияния от всех эффектов под одним критерием. Так, наиболее общим показателем мог бы стать показатель риска, однако радиоактивное облучение персонала станции не рассматривается при анализе риска (который основан на частоте повреждения активной зоны как мере риска), а ненужная загруженность работой персонала станции вообще не относится к анализу риска. Кроме того, интегрируя сложные модели, отражающие влияние изменения интервала между испытаниями на переходный процесс, на износ на ошибки персонала и т.д., в модели ВАБ (содержащие, обычно большое количество хотя и консервативных, но достаточно грубых допущений) мы можем получить недостоверные результаты. Примером такой недостоверности могут служить работы такие работы, как [20, 21], в которых для многоканальной системы были получены графики изменения неготовности системы от интервала между испытаниями, имеющие минимум по неготовности. Как известно, при учете только неготовности компонента (канала) системы во время испытания и корректном учете равномерного сдвига между испытаниями каналов зависимость неготовности от интервала между испытаниями монотонно возрастает [22]. Минимум по неготовности для многоканальной системы возникает из-за того, что не учитывается влияние равномерного сдвига между испытаниями каналов. Следует отметить, что данное упрощение (игнорирование сдвига между испытаниями) характерно для вероятностных моделей ВАБ.

Другой крайностью методик оптимизации интервала между испытаниями является подробное рассмотрение закономерностей деградации, износа, опыта эксплуатации по отдельным компонентам в отрыве от того, что компонент является частью системы, выполняющей функции безопасности и/или влияющей на выработку электроэнергии [21, 23].

Заключение

В ходе проведения обзорного анализа проанализировано более сотни источников (статьи, монографии, авторефераты диссертаций, документы МАГАТЭ и Комитета ядерного регулирования США). Установлено, что в настоящее время нет единого подхода, метода

планирования испытаний СВБ АЭС. Большинство применяемых подходов и методов базируются на вероятностных методах надежности и риска, однако встречаются и детерминированные подходы, связанные с введением определенных условий эксплуатации при изменении графика испытаний.

Все имеющиеся методы оптимизации планирования испытаний СВБ, основанные на вероятностных методах, могут быть условно разделены на две группы:

1. Методы, в которых с ростом длительности между испытаниями (T) неготовность возрастает. В этом случае для возможности варьирования T необходимо:

- или иметь допустимый интервал изменения неготовности или риска;
- или изменять T так (для одних компонентов увеличивать T , для других - уменьшать), чтобы оставаться на прежнем уровне неготовности и риска.

2. Методы, в которых учитывается возможное отрицательное влияние испытаний. При большом количестве испытаний (малом T) происходит рост неготовности и риска. Также рост неготовности и риска происходит при значительном увеличении T . Таким образом, в этом случае имеет место оптимум, при котором значения неготовности и риска минимальны.

В ходе решения задачи планирования испытаний используются модели и результаты ВАБ и другие вероятностные модели, разработанные непосредственно для задачи планирования испытаний. Чаще всего ВАБ используется для проведения ранжирования компонентов с точки зрения влияния на безопасности и для оценки влияния изменения T на показатели риска. Специально разработанные вероятностные модели чаще всего применяются для уточненного моделирования влияния изменения T на надежность компонентов и систем, а также для отыскания экстремума функции (в моделях второй группы).

Результаты исследования по совершенствованию планирования испытаний СВБ говорят о том, что в целом увеличение длительности между испытаниями вполне обосновано, при этом увеличение в ряде случаев возможно в несколько раз, что приводит к значительной финансовой экономии, упрощает график проведения испытаний и снижает неэффективную нагрузку на эксплуатационный персонал.

До настоящего времени имеются проблемы с однозначным подходом к оптимизации планирования испытаний СВБ, которые связаны с ограниченностями расчетных компьютерных кодов ВАБ, некоторыми допущениями ВАБ, которые делают модели ВАБ малочувствительными к ряду параметров, важных для планирования испытаний (например, к сдвигу между испытаниями разных каналов систем). Также имеется проблема создания простой и при этом достаточно точной вероятностной модели влияния T на надежность компонентов и систем, а также корректной интеграции (совместного применения) таких моделей и моделей ВАБ.

Наиболее перспективным направлением исследования в данной области, на наш взгляд, является использование моделей и результатов ВАБ для оценки влияния компонентов на безопасность и разработка специфических моделей, наиболее полно отражающих влияние изменения периодичности испытаний на надежность компонентов и систем (учет отрицательных воздействий испытаний, учет сдвига между испытаниями и т.д.), а также разработка общих моделей и методики использования результатов ВАБ и специфических моделей надежности. Основа для такого исследования представлена в [22, 24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій НП 306.2.141-2008.* – К., Державна адміністрація ядерного регулювання України, 2008. – 35 с.
2. *Правила організації технічного обслуговування і ремонту систем та обладнання атомних електростанцій СОУ-Н ЯЕК 1.010:2008.* – К., Міністерство палива та енергетики України, ДП НАЕК «Енергоатом», 2008. – 116 с.
3. *Кокс Д.Р., Смит В.Л.* Теория восстановления / Пер. с англ. под ред. Ю. К. Беляева. – М.: Сов. радио, 1967. – 299 с.

4. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. – М.: Наука, 1971. – 271 с.
5. Методика оптимизации периодичности проведения замен технических устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 31 с.
6. ГОСТ 26291-84. Надежность атомных станций и их оборудования. Общие положения и номенклатура показателей (ограничение срока действия отменено ИУС 11.12.94). – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 14 с.
7. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1982. – 231 с.
8. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович, В. А. Беляев, И. Н. Каштанов и др. / Под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
9. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. / Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
10. Клемин А.И. Надежность ядерных энергетических установок. Основы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 344 с.
11. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.
12. Швыряев Ю.В., Барсуков А.Ф., Деревянкин А.А. Влияние технического обслуживания на надежность систем безопасности атомных станций // Электрические станции. – 1984. - № 6. – С. 12 - 13.
13. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Т.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 136 с.
14. Risk Based Optimization of Technical Specifications for Operation of Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-729 / IAEA. – Vienna (Austria), December 1993. – 145 p.
15. Guidance for Optimizing Nuclear Power Plant Maintenance Programmes: IAEA-TECDOC-1383 // Report prepared within the framework of the Technical Working Group on Life Management of Nuclear Power Plants. - Vienna (Austria), December 2003. – 141 p.
16. Вимоги до проведення модифікацій ядерних установок та порядку оцінки їх безпеки. НП 306.2.106–2005 / Держатомрегулювання України, 2005.–39 с.
17. Hideki M. Quantitative Methodology for Surveillance Interval Extension at Nuclear power Plants: Submitted for the Degree of Master of Science in Nuclear Engineering / Massachusetts Institute of Technology, 1996. – 128 p.
18. Sparre E. Research Risk Based Test Interval and Maintenance Optimisation. Application and Uses: SKI Report 99:55 // SKI Project Number 97014. - October 1999. – 39 p.
19. Kim I.S., Martorell S., Vesely W.E., Samanta P.K. Including Test Errors in Evaluating Surveillance Test Intervals: BNL-NUREG-46381. - U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1993. – 12 p.
20. Cepin M., Mavko B. Risk Based Surveillance Test Interval Optimization // The 2nd Regional Meeting of the Nuclear Society of Slovenia: Nuclear Energy in Central Europe. – Portoroz (Slovenia), 11 - 14 September 1995. – P. 206 - 213
21. Alzbutas R. Diesel Generators Reliability Data Analysis and Testing Interval Optimization // Energetika, Nr. 4, 2003 – P. 27–33.
22. Риск-ориентированные подходы оптимизации технического обслуживания и эксплуатационного контроля систем, важных для безопасности АЭС / Д. В. Билей, С. В. Васильченко, Н. И. Власенко, Ю. Л. Коврижкин и др.: Монография. Под ред. В. И. Скалозубова. – Одесса: ТЭС, 2004. – 530 с.
23. McElhaney K. L., Cox D. F., Haynes H. D. et al. A Methodology for Evaluation of Inservice Test Intervals for Pumps and Motor Operated Valves: NUREG/CR-6578. - U.S. Nuclear Regulatory Commission. ORNL-6932, January 1999.
24. Оптимизация планирования ремонтов и испытаний систем безопасности атомных электростанций на основе риск-ориентированных подходов / Ю. Л. Коврижкин, Ю. А. Комаров, В. М. Пышный и др.: Монография. Под ред. В. И. Скалозубова. – Одесса: ТЭС, 2006. – 383 с.

ОГЛЯД ВІТЧИЗНЯНОГО ТА МІЖНАРОДНОГО ДОСВІДУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНУВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ СИСТЕМ, ВАЖЛИВИХ ДЛЯ БЕЗПЕКИ АЕС

В. І. Скалозубов, Ю. О. Комаров, В. М. Колиханов, В. Ю. Кочнева, Т. В. Габляя

Наведено основні вимоги нормативних та експлуатаційних документів із установаження періодичності випробувань систем, важливих для безпеки АЕС, стисло викладено теоретичні методи оптимізації випробувань технічних систем, проаналізовано інженерні зарубіжні методики із зміни періодичності випробувань систем АЕС. На підставі даного оглядового аналізу сформульовано задачі для подальших робіт з удосконалення методичної бази оптимізації періодичності випробувань систем, важливих для безпеки.

Ключові слова: безпека, надійність, випробування, відмова, імовірність, відновлення, ремонт, система, АЕС

REVIEW OF DOMESTIC AND INTERNATIONAL EXPERIENCE ON OPTIMIZATION OF TESTS PLANNING FOR SAFETY RELATED SYSTEMS AT NPP

V. I. Skalozubov, Yu. A. Komarov, V. N. Kolykhanov, V. Yu. Kochneva, T. V. Gablaya

There are represented the basic requirements of normative and operating documents on test periodicity of safety related systems at NPPs, sets out the theoretical methods of test optimization of the technical systems, and analyses foreign engineering methods for changing test periodicity of the NPP systems. Based on this review analysis further tasks are formulated for improvement of the methodical base of optimization of tests planning for safety related systems.

Keywords: safety, reliability, test, failure, probability, recovery, maintenance, system, NPP.

Поступила в редакцію 21.01.09