

ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.И. Скалозубов, Чжоу Хуиюй, О.А. Чулкин, Д.С. Пирковский
Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина
E-mail: bourne92@ukr.net

На основе анализа известных исследований по оптимизации надежности и эффективности эксплуатации систем/оборудования тепловых и ядерных установок показано, что при модернизации определяющими параметрами оптимизации являются показатели надежности и затрат на модернизацию. Предложен метод формирования стратегий управления надежностью по определяющему критерию оптимизации эффективности модернизации. Представлены примеры применения предложенного метода.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Основные современные направления развития тепловой и ядерной энергетики связаны с повышением:

- надежности систем и оборудования, приоритетных для обеспечения безопасной эксплуатации;
- эффективности и конкурентоспособности производства электроэнергии.

Глубокую взаимозависимость практической реализации этих направлений можно показать на примере решения двух актуальных проблем, рассмотренных далее.

Одной из основных технических причин большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi в 2011 г. был отказ длительного аварийного электро-снабжения, необходимого для отвода аварийными насосами остаточных тепловыделений от ядерного топлива [1]. Исходя из уроков фукусимской аварии эксплуатирующая организация украинских АЭС (ГП НАЭК «Энергоатом») и Государственная инспекция ядерного регулирования Украины определили необходимость существенного повышения надежности систем аварийного и резервного электроснабжения всех энергоблоков. Одним из путей решения этого вопроса была установка дополнительных мощных аккумуляторных источников длительного электропитания (более 72 ч). Однако впоследствии оказалось, что затраты на подобную модернизацию систем аварийного и резервного электроснабжения не эффективны по экономическим показателям, что и привело к необходимости поиска других более оптимальных решений.

Уже на протяжении нескольких десятков лет в мировой ядерной энергетике общепринятым является принцип ALARA, который заключается в приоритетности повышения надежности обеспечения безопасности на основе «разумной достаточности» [2], т. е. фактически определяется необходимость принятия оптимальных решений в отношении показателей безопасности, надежности и эффективности производства.

Уроки фукусимской аварии подтвердили актуальность принципа ALARA. Так, избежать затопления дизель-генераторов системы аварийного/резервного электроснабжения, которое по сути и

привело к возникшим катастрофическим последствиям, можно было двумя путями:

- 1) установить систему волнорезов высотой более 15 м над уровнем моря (значительные экономические затраты);
- 2) обеспечить герметичность помещений, в которых находились дизель-генераторы (относительно небольшие затраты).

Второй характерный пример взаимозависимости показателей надежности и эффективности связан с известной проблемой продления сроков эксплуатации АЭС. Продление сроков эксплуатации (за определенный проектом ресурс) является высокоэффективным мероприятием, так как затраты на снятие с эксплуатации и строительство новых энергоблоков не сопоставимы с затратами на обеспечение надежной эксплуатации в запроектный период [3]. Однако продление сроков эксплуатации недопустимо без достаточных научно-технических обоснований обеспечения надежной эксплуатации систем и оборудования в запроектный период (особенно в отношении систем/оборудования, которые обеспечивают безопасность). Характерным примером опять же могут быть события на АЭС Fukushima-Daiichi: за месяц до аварии был продлен срок эксплуатации на 1-м энергоблоке, с которого и начались тяжелые аварии (с повреждением ядерного топлива).

Учитывая вышеизложенное, решение задач повышения надежности и эффективности эксплуатации должно иметь комплексный и оптимизационный характер.

Вопросы оптимизации надежности и эффективности систем/оборудования ядерных энергетических установок были рассмотрены ранее при реализации отраслевых программ по повышению коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) и совершенствованию технологических регламентов периодичности испытаний систем, важных для безопасности [4, 5].

КИУМ является основным показателем эффективности выработки электроэнергии АЭС и определяется отношением фактической мощности энерговыделений за период эксплуатации ядерной энергетической установки к установленной проектом мощности [4]:

$$\text{КИУМ} = \frac{N_{\phi} T_3 - T_{\text{ППР}} - T_a}{N_y T_3}, \quad (1)$$

где N_{ϕ} , N_y – фактическая и установленная мощности ядерного реактора соответственно; T_3 – период эксплуатации (обычно ежегодный); $T_{\text{ППР}}$ – продолжительность планово-предупредительных ремонтов (ППР); T_a – продолжительность аварийных остановов.

При нормальных условиях эксплуатации ($N_{\phi} \approx N_y$, $T_a = 0$) КИУМ определяется в основном длительностью ППР ($T_{\text{ППР}}$): для повышения КИУМ (т. е. эффективности) необходимо максимально сокращать продолжительность ППР. С другой стороны, основные ограничения для сокращения продолжительности ППР связаны с:

- соблюдением установленных норм и правил по безопасности (например, открытие верхней крышки реактора не менее чем через 72 ч после его останова);

- установленными регламентом технического обслуживания и ремонта (ТОиР) мероприятиями по контролю состояния и испытаниям систем, оборудования и конструкций (например, контроль состояния металла оборудования и трубопроводов; контроль герметичности СВБ; испытания на работоспособность систем безопасности и др.).

Поэтому программа повышения КИУМ имеет оптимизационный характер по параметру продолжительности ППР: с одной стороны, уменьшение $T_{\text{ППР}}$ приводит к увеличению КИУМ, но необоснованное сокращение $T_{\text{ППР}}$ (определяемое, например, недостаточным качеством ТОиР) может привести к увеличению продолжительности аварийных остановов реактора T_a и соответственно к снижению КИУМ (рис. 1,а). Следовательно, максимально возможное значение КИУМ может быть достигнуто при оптимальной продолжительности ППР $T_{\text{опт}}$.

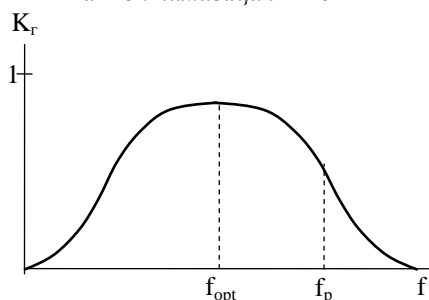
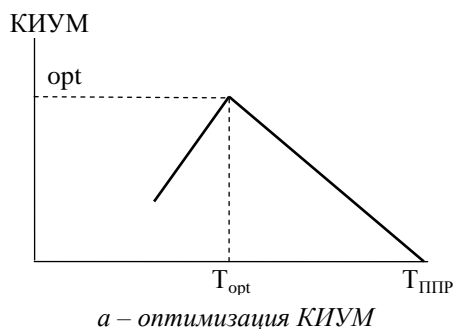


Рис. 1. Известные результаты оптимизации КИУМ и периодичности испытаний аварийных насосов [4, 5]

Таким образом, задача повышения КИУМ сводится к достижению минимальной оптимальной продолжительности ППР $T_{\text{опт}}$, что может быть обеспечено:

- совершенствованием технических средств проведения ТОиР (например, модернизацией гайко-вертов для открытия крышки реактора, систем перегрузки ядерного топлива, технических средств контроля состояния металла и т. п.);

- совершенствованием стратегий планирования ТОиР (например, максимально возможной «параллельности» отдельных мероприятий ТОиР; предотвращением простоев при ТОиР; технически обоснованным проведением ТОиР в межремонтный период и др.);

- сокращением неэффективных (избыточных) в отношении подтверждения надежности мероприятий по контролю состояния и испытаниям систем/оборудования (например, испытания защитной оболочки на герметичность избыточным давлением; избыточные испытания насосного оборудования; контроль в полном объеме трубчатки парогенераторов и т. п.).

При этом совершенно очевидно, что, с экономической точки зрения, реализация последних двух из приведенных групп мероприятий является наиболее предпочтительной. Так, например, в работе авторов [4] было показано, что реализация этих групп мероприятий может на 10...20% повысить КИУМ без существенных экономических затрат¹.

Необходимость оптимизации периодичности испытаний насосов систем безопасности в межремонтный период (при работе реактора на мощности) определяется тем, что регламентная периодичность (обычно раз в месяц) установлена без достаточных обоснований [5]. В данном случае в качестве критерия оптимизации можно применить максимальные значения показателей надежности (коэффициент готовности выполнения назначенных функций K_r) и параметров оптимизации:

- увеличение периодичности испытаний f для обнаружения «скрытых» отказов оборудования (фактор Φ_1);

- уменьшение периодичности испытаний для предотвращения избыточного износа оборудования (снижение ресурса эксплуатации) и влияние качества технического обслуживания при испытаниях (снижение общей надежности системы, вызванное испытаниями одного канала) (фактор Φ_2).

На рис. 1,б приведены известные результаты по оптимизации периодичности испытаний насосов систем аварийного охлаждения активной зоны при работе ядерного реактора на мощности [5], из которых следует, что оптимальная периодичность при максимальной надежности $f_{\text{опт}}$ в два раза меньше, чем установленная регламентом f_p .

¹ По известным оценкам, например, приведенным в [4], увеличение КИУМ на 10% по отрасли равноценно введению нового энергоблока мощностью 1000 МВт.

В отличие от вышеприведенных известных результатов при модернизации систем/оборудования тепловых и ядерных энергоустановок определяющими параметрами оптимизации являются показатели надежности и затрат на модернизацию, что и определяет актуальность этой работы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ТЕПЛОВЫХ И ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГО- УСТАНОВОК

1. Под стратегией управления надежностью (СУН) здесь подразумевается комплекс организационно-технических мероприятий/модернизаций, направленных на повышение надежности, в зависимости от затрат на их реализацию.

2. Определяющим параметром СУН по факторам надежности является отношение интегральных показателей неготовности выполнения назначенных функций для модернизированной K_n и проектной $K_{н0}$ систем:

$$K_n = \frac{K_n}{K_{н0}}, \quad (2)$$

где в общем случае за период эксплуатации t [5]

$$K_n = \frac{1}{t} \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad (3)$$

$P(\tau)$ – текущая вероятность критического отказа в различных режимах эксплуатации (рабочие, переходные, аварийные).

В общем случае показатели неготовности K_n учитывают износ (старение) оборудования, а также качество проведения технического обслуживания, ремонта и испытаний.

Условие модернизации СУН по показателям надежности:

$$K_n \rightarrow \min. \quad (4)$$

3. Определяющий параметр СУН по затратам на модернизацию – отношение затрат на модернизацию C к стоимости проектной системы C_0 :

$$C = \frac{C}{C_0}. \quad (5)$$

Условие реализации СУН по затратам на модернизацию:

$$C \rightarrow \min. \quad (6)$$

4. Основным показателем эффективности СУН является отношение увеличения уровня надежности ΔK_n к соответствующим затратам на модернизацию ΔC :

$$K_3 = \frac{\Delta K_n}{\Delta C}. \quad (7)$$

Условия эффективности СУН:

$$K_3 > 0; |K_3| \rightarrow \max. \quad (8)$$

5. С учетом приведенных выше критериев и условий модернизации имеем определяющий критерий оптимизации эффективных СУН:

$$K_{opt} = \frac{\sum_i K_{3i} \Delta C_i}{\sum_i \Delta C_i} \rightarrow \max, \quad (9)$$

где индекс i соответствует номеру отдельной модернизации в конкретной СУН.

В качестве примера оптимизации СУН рассмотрим три характерных вида (рис. 2):

СУН1 – стратегия при минимальных затратах на модернизацию и относительно малом увеличении надежности;

СУН2 – стратегия, использующая только максимально возможные эффективные модернизации;

СУН3 – стратегия достижения максимально возможного уровня надежности.

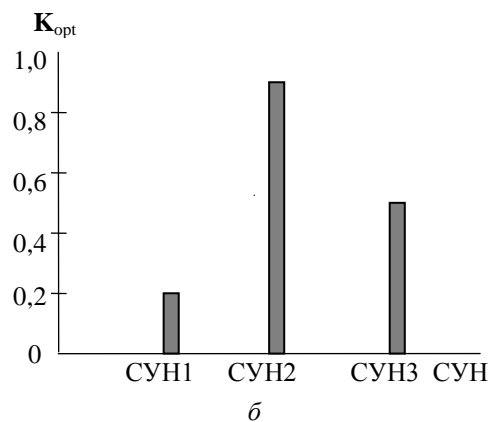
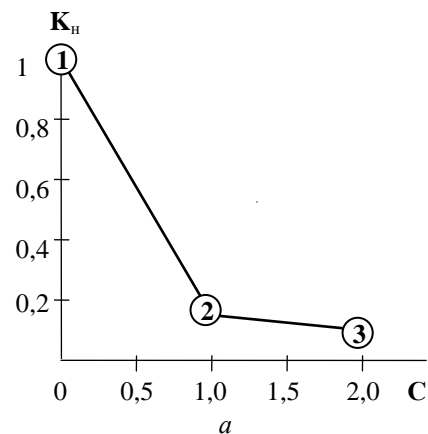


Рис. 2. Оптимизация стратегий управления надежностью

Характерными примерами модернизаций систем насосного оборудования тепловых и ядерных энергоустановок могут быть следующие [6] (см. рис. 2,а).

1. СУН1 – установка на входном участке насоса демпфирующих предвключенных емкостей для уменьшения амплитуд колебаний давления.

Такая стратегия может быть эффективной для снижения циклических гидродинамических нагрузок и кавитационных явлений на рабочих элементах насосов, но малоэффективна для предотвращения критических (по пропускной способности напорной трубопроводной магистрали) гидроударов в переходных и аварийных режимах.

2. СУН2 – параллельное дублирование каналов системы насосного оборудования. В этом случае

затраты на модернизацию существенно возрастают, но при этом значительно увеличивается надежность системы в целом и повышается эффективность предотвращения критических гидроударов, вызванных инерционностью напорно-расходной характеристики насосов.

3. СУНЗ – установка на дублированных каналах насосов аварийного охлаждения ядерного реактора дополнительной регулирующей арматуры для предотвращения «термоудара» на корпус реактора в аварийных режимах.

Такая модернизация требует дополнительных существенных затрат и малоэффективна в отношении повышения надежности корпуса ядерного реактора, так как функционирование дополнительных регуляторов осуществляется уже после наиболее критичных для термоудара условий. Кроме того, в [6] показано, что при определенных условиях дополнительного регулирования расхода возможно возникновение автоколебательных процессов, повышающих уровень циклических термических нагрузок на корпус реактора.

Для приведенных стратегий оптимальной по критерию (9) является СУН2 (см. рис. 2,б).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа известных исследований по оптимизации надежности и эффективности эксплуатации систем/оборудования тепловых и ядерных установок показано, что при модернизации определяющими параметрами оптимизации являются показатели надежности и затрат на модернизацию.

2. Предложен метод формирования стратегий управления надежностью по определяющему критерию оптимизации эффективности модернизации. Представлены примеры применения предложенного метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.И. Скалозубов, В.Н. Ващенко, А.А. Ключников. *Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima-Daiichi как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах*. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012, 280 с.

2. В.И. Скалозубов, А.С. Мазуренко, И.Л. Козлов, В.Н. Ващенко и др. *Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме*. Одесса: «Астропринт», 2013, 244 с.

3. В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, Е.С. Лещетная. *Основы продления эксплуатации АЭС с ВВЭР*. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2011, 384 с.

4. В.И. Скалозубов, Ю.Л. Коврижкин, В.Н. Колыханов, В.Ю. Кочнева, В.В. Урбанский. *Оптимизация плановых ремонтов энергоблоков атомных электростанций с ВВЭР*. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2008, 496 с.

5. В.И. Скалозубов, Д.В. Билей, Т.В. Габлая и др. *Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР*. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2008, 506 с.

6. В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, Ю.А. Комаров, А.В. Шавлаков. *Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР*. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010, 200 с.

Статья поступила в редакцию 18.07.2017 г.

ОПТИМІЗАЦІЯ НАДІЙНОСТІ ПРИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

В.І. Скалозубов, Чжоу Хуйюй, О.А. Чулкін, Д.С. Пірковський

На основі аналізу відомих досліджень з оптимізації надійності та ефективності експлуатації систем/обладнання теплових і ядерних установок показано, що при модернізації визначальними параметрами оптимізації є показники надійності та витрат на модернізацію. Запропоновано метод формування стратегій управління надійністю за визначальним критерієм оптимізації ефективності модернізації. Представлено приклади застосування запропонованого методу.

OPTIMIZATION OF REABILITY IN THE MODERNIZATION OF HEATING EQUIPMENT

V.I. Skalozubov, Zhou Huiyu, O.A. Chulkin, D.S. Pirkovskiy

Analysing known researches on optimization of reliability and efficiency of operation of the systems/equipment of thermal and nuclear facilities the authors demonstrate that reliability and costs are the key optimization parameters. The method of forming of reliability management strategy using the key optimization criterion of modernization efficiency is presented. Examples of application of the proposed method are provided.