

УДК 621.398

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНОВ РЕМОНТОВ СИСТЕМ И ОЦЕНКА РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Л. И. Зевин,

канд. техн. наук

leonid.zevin@gmail.com

ORCID: 0000-0000-0000-0000

Г. Г. Кроль

ORCID: 0000-0000-0000-0000

Институт проблем
машиностроения
им. А. Н. Подгорного
НАН Украины,
61046, Украина, г. Харьков,
ул. Пожарского, 2/10

Представлены метод планирования на электронно-вычислительных машинах объемов ремонтов систем энергоблока атомной станции и метод вычисления его гамма-процентного ресурса. Планирование осуществляется на основе прогнозирования показателя надежности – вероятности безотказной работы за определенное время, а гамма-процентный ресурс оборудования определяется путем решения соответствующих уравнений. Рассмотренные задачи связаны с важной проблемой энергетики – продлением сроков эксплуатации энергоблоков. Ее важность определена, в основном, экономической целесообразностью – дешевле оценить ресурс энергоблока и на этой исследовательской основе продлить его эксплуатацию, чем создавать новую установку. Также показано, что расчет вероятности радиационной аварии на энергоблоке связан с результатами планирования ремонтов его систем, с оценками ресурса оборудования. Формулируется задача оптимизации: требуется найти такой план объемов ремонтов системы, чтобы при ограниченных затратах на ее ремонт показатель надежности системы за время заданной длительности наименее отклонялся от предельно допустимого значения. Решение задачи основывается на расчете структурной надежности системы. Строится графологический образ системы в виде композиции графологических образов типовых структур. После вычисления показателя надежности типовых структур последние заменяются отдельными структурными элементами, что дает возможность упростить в вычислительном сценарии исходный графологический образ системы и вычислить показатель ее надежности. Определение плана ремонта осуществляется путем применения версии покоординатного метода оптимизации. Для оценки гамма-процентного ресурса принимается модель, в которой восстанавливаемые компоненты оборудования имеют неограниченный ресурс, хотя, конечно, «стареют», а восстанавливаемые компоненты расходуют свой ресурс до уровня, когда их замена становится обусловленной нарушением требования к предельно допустимому значению показателя надежности системы. Оценка гамма-процентного ресурса оборудования осуществляется путем планирования ремонтов системы на последовательности интервалов, в пределах которых энергоблок вырабатывает энергию ежегодно.

Ключевые слова: атомная станция, энергоблок, система, план ремонта, ресурс, оптимизация.

Введение

Задачи планирования ремонтов и оценки ресурсов оборудования энергоблоков атомных электростанций (АЭС) преимущественно решаются на основе регламентных указаний заводоизготовителей оборудования. В настоящей статье предлагается подход, основанный на вычислении на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ) показателей надежности систем энергоблока с учетом их структурной организации. В качестве показателя надежности применяется вероятность безотказной работы (ВБР) за определенное время. В качестве показателя ресурса применяется гамма-процентный ресурс (далее – ресурс) – длительность времени работоспособного состояния объекта с вероятностью гамма.

Главным показателем качества АЭС, допускающим ее применение, является безопасность. Оценка безопасности – это многоаспектная проблема. С позиции системного анализа один из путей получения количественных оценок безопасности состоит в использовании математического моделирования риска от эксплуатации энергоблоков [1]. Величина риска определяется произведением вероятности радиационной аварии и величины последствий аварии: гибель людей, экологическое загрязнение, материальные потери. Знание риска позволяет управлять им – предусматривать компенсирующие мероприятия.

Один из путей снижения риска состоит в обеспечении высокого качества технического обслуживания и ремонта энергоблоков. В статье рассматривается часть этой задачи – планирование ра-

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Международная.

© Л. И. Зевин, Г. Г. Кроль, 2020

циональных объемов ремонта систем, осуществляемое в периоды ежегодных планово-предупредительных ремонтов, обеспечивающих экономически эффективную выработку энергии энергоблоками и их безопасность. Решение задачи планирования ремонта используется для определения гамма-процентных ресурсов оборудования.

Планы ремонтов и оценок ресурса энергоблоков связаны с проблемой продления их гамма-процентных ресурсов [2]. Важность проблемы объясняется, в основном, экономической целесообразностью – дешевле оценить ресурс энергоблока и на этой исследовательской основе продлить его эксплуатацию, чем создавать новую установку.

Показатели ресурса зависят не только от физико-химических, термодинамических, вибрационных и других воздействий на оборудование, но также от требований к предельно допустимому значению вероятности радиационной аварии, от качества технического обслуживания и ремонта.

На повестку дня все чаще выдвигается проблема оценки индивидуального ресурса энергоблоков путем накопления достоверной информации, диагностики, применения образцов-свидетелей, ускоренных испытаний, моделирования прочностных и ресурсных показателей оборудования. Необходимость проводить специальные ресурсные исследования отдельного энергоблока обусловлена его индивидуальными характеристиками и особенностями эксплуатации. В условиях АЭС полное исследование индивидуального ресурса энергоблока, его многочисленного оборудования, измеряемого тысячами единиц, практически невозможно – будет оставаться неопределенность части результатов из-за сокращенных по объему измерений и инженерных интерпретаций неполной информации.

В настоящей статье определение плана ремонтов оборудования базируется на анализе структурной надежности систем энергоблока. Предполагается, что величины показателей надежности оборудования могут быть получены из данных регистрации их отказов, из экспертных оценок или приняты данные заводов-изготовителей. Планирование ремонтов переводится в математическую плоскость – формулируется задача оптимизации ремонтов системы на основе расчета ее структурной надежности. При этом используется функциональная связь между затратами на ремонт единицы оборудования и величиной повышения значения его показателя надежности.

В силу многообразия и масштабности технических систем не существует и, по-видимому, не будет существовать универсального метода расчета их структурной надежности [2]. На сегодняшний день к основным методам оценки структурной надежности систем относятся методы: логико-вероятностный, дискретных марковских процессов, имитационного моделирования. Они сложны для применения к системам с большим числом элементов [3]. В связи с этим представляют интерес и другие методы, облегчающие решение расчетных задач.

Один из подходов, применяемый в инженерных расчетах вручную, показан в [4]. Он состоит в сжатии структурной схемы – графологического образа системы. Когда в системе много элементов, то вычисления становятся длительными. Еще более трудоемким становится этот процесс, если расчеты надо производить многократно при изменяющихся данных, например, при решении задач оптимизации.

В целях автоматизации расчетов структурной надежности сложных систем с большим числом элементов разработан подход [5], основанный на распознавании и сжатии структурных схем, изменяющихся в процессе расчета на ЭВМ.

Поиск рационального плана осуществляется пошагово путем назначения ремонта тому оборудованию, повышение надежности которого обеспечивает на каждом шаге наибольшее возрастание показателя надежности системы. Вычисленный план ремонта определяет изменение показателя надежности системы во времени, что позволяет путем решения соответствующих уравнений найти длительность исправного состояния единицы оборудования с вероятностью гамма, и тем самым определить оценку его ресурса.

Основная часть

В настоящей статье метод планирования ремонта системы и оценка ресурса оборудования описываются по следующей схеме: дается краткое описание метода расчета структурной надежности системы; формулируется задача оптимизации плана ремонта системы; описывается метод решения задачи оптимизации; показывается связь планов ремонтов с оценкой безопасности энергоблока и с оценками гамма-процентного ресурса оборудования.

Вычисление структурной надежности системы

Структурная схема системы составляется из образов ее элементов (далее – элементов) с известными законами их показателя надежности. Для расчета показателя надежности системы на ЭВМ в информационный образ системы вводятся: простые элементы; обобщенные элементы; типовые базисные графологические образы, например, резервированные системы; виртуальные соединители. Используется теорема: если графологический образ системы составлен из типовых базисных графологических образов с простыми элементами или из обобщенных графологических образов с вычислимыми показателями надежности, то показатель надежности системы вычислим [5]. На основе этой теоремы осуществляется контроль процесса расчета структурной надежности системы на ЭВМ.

Разработанный в [5] метод расчета базируется на представлении графологического образа системы в виде композиции типовых графологических образов. Осуществляется автоматическое распознавание их образов и вычисляются значения их показателей надежности. Результаты вычислений присваиваются типовым графологическим образам, превращая их в элементы схемы, что создает новую структурную схему системы с новыми типовыми структурами. Такие замены последовательно сжимают первоначальный графологический образ системы до одного элемента с вычисленным значением показателя надежности, что и определяет значение показателя надежности первоначального графологического образа системы.

Постановка задачи планирования ремонтов

Для математической постановки задачи принимается следующее: S – система, образованная из систем $S_0, S_1, S_2, \dots, S_M$, каждая из которых состоит из элементов $a_i^m, i^m = 0, 1, 2, \dots, I^m, m=0, 1, 2, \dots, M$ (далее $a_i, i=0, 1, 2, \dots, I$); t_0 – время начала ремонта; $\Delta t=t-t_0$ – длительность времени ежегодной эксплуатации системы; $Q(S_0), Q(S_1), Q(S_2), \dots, Q(S_M)$ – вероятности отказов систем $S_0, S_1, S_2, \dots, S_M$ за время Δt ; V – объем ремонтов системы S ; Q_S^* – предельно допустимое значение вероятности отказа системы S за время Δt ; Z_S^* – предельно допустимое значение затрат на ремонт системы S .

Задача планирования состоит в том, чтобы найти такой план объема ремонта V системы S , чтобы вероятность безотказной работы $R_S(\Delta t, V)$ за время Δt наименее отклонялась от предельно допустимого значения $R_S^* = 1 - Q_S^*$. При этом затраты Z_S на реализацию плана не должны превышать предельно допустимого значения Z_S^* . В символическом виде задачу можно записать так: требуется при заданных величинах $\Delta t, R_S^*$ найти V , чтобы

$$\omega^* = \min_V [R_S[\Delta t, V] - R_S^*], \quad \omega^* \geq 0, \quad Z_S \leq Z_S^*. \quad (1)$$

Для математической постановки задачи надо определить, что такое предельно допустимое значение R_S^* и что такое объем ремонта V .

Величина R_S^* может быть получена путем вычисления показателя надежности системы S на основе ее структуры и показателей надежности $r(a_i)$ элементов $a_i, i=0, 1, 2, \dots, I$, взятых из паспортных данных оборудования. Также величина R_S^* может быть определена путем применения экспертных оценок.

Для определения величины объема ремонта V вводится удельное значение показателя надежности δr_i элемента $a_i, i=0, 1, 2, \dots, I$ как величины повышения показателя надежности элемента a_i , приходящейся на одну единицу затрат.

Пусть $r_i(t_0)$ – ВБР элемента a_i за время его эксплуатации $\Delta^* t$, предшествующее моменту времени t_0 . В результате ремонта в объеме затрат c_i элемент может приобрести ВБР $r_i^*(t_0)$ за время $\Delta^* t$. Разница между этими ВБР в момент времени t_0 , отнесенная к величине понесенных затрат c_i , определяет величину удельной ВБР $\delta r_i(t_0)$ элемента a_i

$$\delta r_i(t_0) = (r_i^*(t_0) - r_i(t_0)) / c_i = \Delta r_i(t_0) / c_i, \quad i=0, 1, 2, \dots, I. \quad (2)$$

В этой формуле $r_i(t_0)$ и c_i полагаются известными величинами, а $r_i^*(t_0)$, $i=0, 1, 2, \dots, I$ – неизвестные величины. Удельная величина ВБР $\delta r_i(t_0)$ может быть оценена следующим образом. Предположим, что элемент a_i заменен на идентичный новый элемент, который за время Δ^*t не терял своего показателя надежности. Поэтому полагается, что его ВБР $r_i^*(t_0) = 1$ за время Δ^*t . Пусть затраты на установку нового элемента a_i равны z_i . Тогда удельная ВБР нового элемента (величина повышения ВБР, приходящаяся на единицу затрат) будет таковой: $\delta r_i(t_0) = 1/z_i$.

Поэтому если затраты c_i на ремонт элемента будут иметь значение z_i , то это будет означать замену элемента a_i с ВБР $r_i(t_0)=0$ на идентичный элемент a_i с ВБР $r_i^*(t_0) = 1$. Тогда, согласно выражению (2), величина повышения ВБР в результате замены элемента a_i будет $\Delta r_i(t_0) = r_i^*(t_0) - r_i(t_0) = 1 - 0 = 1$. Если ремонт осуществляется с затратами c_i , то величина повышения ВБР за время Δ^*t определяется соотношением: $\Delta r_i(t_0) = c_i \cdot \delta r_i(t_0) = c_i / z_i$, то есть принимается, что величина повышения ВБР элемента при ремонте в момент времени t_0 прямо пропорциональна затратам c_i на ремонт, что и определяет объем ремонта v_i элемента a_i . Тогда выполненный объем ремонта V

системы S будет определяться суммой: $V = \sum_{i=0}^I v_i = \sum_{i=0}^I c_i$. Принимается, что затраты на ремонт c_i ,

$i=0, 1, 2, \dots, I$ элементов известны и могут измеряться в различных единицах, например в денежных единицах или в трудозатратах.

ВБР $R_S(t_0)$ за время Δ^*t системы S зависит от схемы ее структуры и ВБР $r_i(t_0)$ за время Δ^*t ее элементов a_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$. Поскольку величины ВБР за время Δ^*t систем $S_0, S_1, S_2, \dots, S_M$ вычислимы, то вычислимой будет ВБР $R_S(t_0)$ за время Δ^*t системы S . Чтобы упростить обозначения и подчеркнуть, что ВБР системы есть функция от показателей надежности $r_i(t_0)$ элементов a_i , используется обозначение: $R_S(t_0) = \varphi(r_i(t_0))$, $i=0, 1, 2, \dots, I$.

В результате ремонтов, в отведенный период времени, приращение ВБР $\Delta R_S(t_0)$ за время Δ^*t системы S при приращениях ВБР $\Delta r_i(t_0)$ за время Δ^*t ее элементов a_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$, можно записать так:

$$\Delta R_S(t_0) = \varphi(r_0(t_0) + \Delta r_0(t_0), r_1(t_0) + \Delta r_1(t_0), \dots, r_I(t_0) + \Delta r_I(t_0)) - \varphi(r_0(t_0), r_1(t_0), \dots, r_I(t_0)).$$

В силу того что ВБР за время Δ^*t системы S без приложения затрат $R_S(t_0) = \varphi(r_0(t_0), r_1(t_0), \dots, r_I(t_0))$, то в результате приложения затрат на ремонт элементов a_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$, получим ВБР $\hat{R}_S(t_0)$ за время Δ^*t системы S в виде

$$\hat{R}_S(t_0) = R_S(t_0) + \Delta R_S(t_0) = \varphi(r_0(t_0) + c_0 \delta r_0, r_1(t_0) + c_1 \delta r_1, \dots, r_I(t_0) + c_I \delta r_I), \quad (3)$$

поскольку приращение ВБР за время Δ^*t элементов a_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$ составит $\Delta r_i(t_0) = c_i \cdot \delta r_i(t_0)$.

В формуле (3) величины $\delta r_i(t_0)$, $i=0, 1, 2, \dots, I$ определяют удельные ВБР за время Δ^*t элементов, которые вычисляются по формуле $\delta r_i(t_0) = 1/z_i$, а неизвестные затраты на ремонт c_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$ могут принимать любые действительные неотрицательные значения.

Результат ремонта, осуществленный в момент времени t_0 , скажется на ВБР $r_i(\Delta t)$ за время $\Delta t = t - t_0$ элементов a_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$, и на ВБР $\hat{R}_S(\Delta t)$ за время Δt системы S . Обозначая $\hat{R}_S(\Delta t) = R_S(\Delta t)$, получим

$$R_S(\Delta t) = \varphi[(r_0(t_0) + c_0 \delta r_0) \cdot r_0(\Delta t), (r_1(t_0) + c_1 \delta r_1) \cdot r_1(\Delta t), \dots, (r_I(t_0) + c_I \delta r_I) \cdot r_I(\Delta t)]. \quad (4)$$

В выражении (4) ВБР $R_S(\Delta t)$ системы S за время Δt зависит от значений ВБР $r_i(t_0)$ за время Δ^*t элементов a_i в момент времени t_0 , от законов ВБР $r_i(\Delta t)$ за время Δt элементов a_i , от понесенных затрат c_i на ремонты элементов a_i , от удельных ВБР $\delta r_i(t_0) = 1/z_i$, $i=0, 1, 2, \dots, I$, то есть $R_S(\Delta t)$ представляет собой функцию многих переменных, $R_S(t_0, t) = \varphi(c_i, \delta r_i, r_i(\Delta t))$, $i=0, 1, 2, \dots, I$.

Используя (4), задачу (1) можно сформулировать следующим образом: требуется найти такое распределение затрат c_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$, чтобы

$$\omega^* = \min_{c_i} [\varphi[(r_0 + c_0 \delta r_0) \cdot r_0(\Delta t)], \dots, (r_I + c_I \delta r_I) \cdot r_I(\Delta t)] - R_S^*, \quad \omega^* \geq 0, \quad \sum_{i=0}^I c_i \leq Z_S^*. \quad (5)$$

Таким образом, в задаче (5) устранена неопределенность задачи (1): значения R_S^* и V определены. Искомый план ремонта, как следует из (5), будет состоять из значений $c_i = C_i$, $i=0, 1, 2, \dots, I$.

Если предположить, что отказы систем $S_0, S_1, S_2, \dots, S_M$, независимы, задачу (5) можно решать для каждой системы $S_0, S_1, S_2, \dots, S_M$ отдельно, а затем объединять результаты, или задачу можно решать сразу для всей системы S . Такие решения могут быть различными [4].

Решение задачи планирования ремонтов

Функция ВБР $R_S(\Delta t) = \varphi(c_i, \delta r_i, r_i(\Delta t))$ непрерывна и дифференцируема по времени t в области своего определения, как ВБР системы S за время Δt , и также непрерывна и дифференцируема по параметрам c_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$. Предполагается, что предельно допустимые значения R_S^* и Z_S^* такие, что решение задачи (5) существует. Однако, как легко видеть, рассмотрев последовательное соединение двух элементов, оно не единственно.

Задача (5) решается с использованием метода покоординатного спуска. Эффективность спуска зависит от соотношения между затратами на ремонт элементов и величиной повышения показателя надежности системы за эти затраты. Спуск осуществляется по той координате c_j , $j=0, 1, 2, \dots, I$, для которой в конце интервала $[t_0, t]$ частная производная функции ВБР $R_S(\Delta t) = \varphi(c_i, \delta r_i, r_i(\Delta t))$ по параметрам c_i получает наибольшее значение в конце интервала $[t_0, t]$: $\partial \varphi(\Delta t) / \partial c_j = \max_i |\partial \varphi(\Delta t) / \partial c_i|$.

Поскольку для сложной системы функцию ВБР $R_S(\Delta t) = \varphi(c_i, \delta r_i, r_i(\Delta t))$ практически невозможно составить в аналитическом виде, то значения ее частных производных по координатам c_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$ вычисляются по приближенной формуле $\partial \varphi(\Delta t) / \partial c_i \approx [\varphi(\dots, c_i + \Delta c_i, \dots) - \varphi(\dots, c_i, \dots)] / \Delta c_i$, где Δc_i – величина приложенных затрат для выполнения ремонта элемента a_i , $i=0, 1, 2, \dots, I$.

Значение частной производной $\partial \varphi(\Delta t) / \partial c_j$ можно интерпретировать как частную удельную ВБР системы S по c_j координате – она представляет собой величину изменения ВБР за время Δt системы S , приходящуюся на единицу приложенных затрат. Естественно, что спуск по координате c_j , имеющей наибольшее значение частной удельной ВБР $\partial \varphi(\Delta t) / \partial c_j$ системы S , будет самым эффективным. При одинаковых затратах на ремонт элементов выбираются затраты (объем ремонта) c_j того элемента, ремонт которого повышает ВБР за время Δt системы более всего. Спуск по координатам осуществляется до тех пор, пока не будет получено решение задачи (5).

Поскольку принималось, что затраты на ремонт c_j могут быть любыми действительными отрицательными числами, то решения задачи (5) могут потребовать интерпретации в терминах традиционной дисциплины ремонта – капитальный, средний, текущий, техническое обслуживание. При наличии информации относительно затрат на данные виды ремонта решение задачи (5) в этих терминах можно интерпретировать автоматически.

Связь планов ремонтов с оценкой безопасности энергоблока и с оценками гамма-процентного ресурса оборудования

План ремонта системы связан с оценками безопасности энергоблока. Один из путей вычисления вероятности радиационной аварии заключается в построении множества цепочек событий, состоящих из появлений исходных событий и отказов систем, их обрабатывающих. Пусть $H_0, H_1, H_2, \dots, H_M$ – независимые события, определенные отказами систем $S_0, S_1, S_2, \dots, S_M$, которые представляют собой цепочку событий, состоящих из появления исходного события H_0 – отказ системы S_0 , и пути развития аварии – отказы систем S_1, S_2, \dots, S_M . Вероятности отказов систем за время Δt вычислимы, например, по паспортным данным элементов систем. Тогда вероятность радиационной аварии $P(A)$ этой цепочки событий определится как произведение вероятностей отказов систем $P(A) = Q(S_0) \cdot Q(S_1) \cdot \dots \cdot Q(S_M)$.

План ремонта $c_i=C_i$, $i=0, 1, 2, \dots, I$, полученный в результате решения задачи (5), изменит вероятности отказов $Q(S_0), Q(S_1), Q(S_2), \dots, Q(S_M)$ систем за время Δt на новые вероятности отказов $Q_1(S_0), Q_1(S_1), \dots, Q_1(S_M)$ систем за время Δt . Тогда и вероятность аварии $P(A)$, связанной с цепочкой событий, получит новое значение $P_1(A) = Q_1(S_0) \cdot Q_1(S_1) \cdot \dots \cdot Q_1(S_M)$. Этим и определяется связь между планами ремонта систем и оценками безопасности энергоблока.

Решения задачи (5) определяют и оценки ресурса оборудования систем энергоблока. Действительно, поскольку определено ограничение на предельно допустимое значение показателя надежности системы – R_S^* , то найдется такой план ремонта системы на последовательности интервалов ежегодной работы, который не будет удовлетворять условиям задачи (5) без замены невосстанавливаемого оборудования или невосстанавливаемых компонентов восстанавливаемого оборудования.

Иначе говоря, надо при планах ремонтов $c_k^i = C_k^i$, где индекс $k=1, 2, 3, \dots$ обозначает номер интервала, а индекс $i=0, 1, 2, \dots, I$ – номер элемента a_i , решить неравенство

$$R_S[(c_k^i = C_k^i(\Delta t_k))] \leq R_S^* \quad (6)$$

относительно переменных Δt_k , которые представляют собой длительности одного k интервала времени.

Если величина интервала $\Delta t = \text{const}$, то в этом случае $\Delta t_k = k \cdot \Delta t$ есть длительность k интервалов времени, на каждом из которых существует решение задачи (5) и, следовательно, неравенства (6). Предположим, что на $k+1$ интервале времени $R_S[(c_k^i = C_k^i(\Delta t_k))] > R_S^*$. Тогда найдется такой невосстанавливаемый элемент a_i в плане ремонта на $k+1$ интервале времени, замена которого обеспечивает решение задачи (5). Тогда длительность времени $\Delta t_k = k \cdot \Delta t$ работоспособного состояния системы с вероятностью $\gamma = R_S^*$ и будет гамма-процентным ресурсом элемента a_i , который подлежит замене.

Выводы

Аварии на АЭС имеют неприемлемые последствия для людей и среды их обитания. Один из путей снижения вероятностей аварий и масштабов их последствий состоит в вычислении оценок рисков, чтобы на основе этого знания управлять ими, совершенствуя мероприятия по обеспечению безопасности энергоблоков. Поэтому проблемы, связанные с риском их эксплуатации, изучаются всесторонне. Важный аспект этой проблемы отражается в организационно-технической деятельности технического обслуживания и ремонта, частью которой является планирование объемов ремонтов энергоблока и наблюдение за расходом ресурса оборудования и своевременная его замена.

Для планирования ремонтов используется метод расчета показателя надежности систем, основанный на графологической схеме системы, состоящей из базисных структур с распознаваемыми на ЭВМ информационными образами и с вычислимыми показателями надежности. Применяется процесс сжатия схемы, что дает возможность оценивать показатель надежности системы с большим числом элементов.

Решение задачи планирования ремонтов на основе математического моделирования показателя надежности систем позволяет планировать ремонты на основе учета их структуры и предельно допустимых значений показателей надежности. Показано, что между планом ремонта системы, оценкой безопасности и гамма-процентным ресурсом оборудования энергоблока существует связь. Представленные подходы к планированию ремонтов оборудования систем и оценки их гамма-процентных ресурсов могут быть использованы при решении задач продления сроков эксплуатации энергоблоков.

Программное обеспечение, ориентированное на применение представленных подходов на практике, может входить в качестве самостоятельного программного комплекса в информационно-аналитические системы, обеспечивающие решение задач эффективного управления системой технического обслуживания и ремонта энергоблоков АЭС.

Литература

1. Безопасность ядерной энергетики / под ред. Дж. Раста и Л. Уивира: пер. с англ. М.: Атомиздат, 1980. 153 с.
2. Острейковский В. А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. М.: Энергоатомиздат, 1994. 288 с.
3. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. С. Пб: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
4. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. 550 с.

5. Zevin L. I., Krol H. H. Calculation of indicators of reliability of technical systems by the typical structural scheme method. *J. Mech. Eng.* 2019. Vol. 22. No. 2. P. 53–59. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.02.053>.

Поступила в редакцію 28.04.2020

Оптимізація планів ремонтів систем та оцінка ресурсу обладнання атомних станцій

Л. І. Зевін, Г. Г. Кроль

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

Наведені метод планування на електронно-обчислювальних машинах обсягів ремонтів систем енергоблоку атомної станції і метод обчислення його гамма-відсоткового ресурсу. Планування здійснюється на основі прогнозування показника надійності – ймовірності безвідмовної роботи за певний час, а гамма-процентний ресурс обладнання визначається шляхом розв'язання відповідних рівнянь. Розглянуті завдання пов'язані з важливою проблемою енергетики – продовженням термінів експлуатації енергоблоків. Її важливість визначена, в основному, економічною доцільністю – дешевше оцінити ресурс енергоблоку і на цій дослідницькій основі продовжити його експлуатацію, ніж створити нову установку. Також показано, що розрахунок ймовірності радіаційної аварії на енергоблоці пов'язаний з результатами планування ремонтів його систем, з оцінками ресурсу обладнання. Формулюється задача оптимізації: потрібно знайти такий план обсягів ремонтних робіт системи, щоб за обмежених витрат на її ремонт показник надійності системи за час заданої тривалості найменш відхилився від гранично допустимого значення. Розв'язання задачі ґрунтується на розрахунку структурної надійності системи. Будується графологічний образ системи у вигляді композиції графологічних образів типових структур. Після обчислення показника надійності типових структур останні замінюються окремими структурними елементами, що дає можливість спростити в обчислювальному сценарії вихідний графологічний образ системи і обчислити показник її надійності. Визначення плану ремонту здійснюється шляхом застосування версії покоординатного методу оптимізації. Для оцінки гамма-процентного ресурсу приймається модель, в якій відновлювані компоненти обладнання мають необмежений ресурс, хоча, звичайно, «старішають», а невідновлювані компоненти витрачають свій ресурс до рівня, коли їх заміна стає обумовленою порушенням вимоги до гранично допустимого значення показника надійності системи. Оцінка гамма-процентного ресурсу обладнання здійснюється шляхом планування ремонтів системи на послідовності інтервалів, в межах яких енергоблок виробляє енергію щорічно.

Ключові слова: атомна станція, енергоблок, система, план ремонту, ресурс, оптимізація.