

УДК 621.398

С.В. Коваленко<sup>1</sup>, А.С. Куценко<sup>1</sup>, Л.И. Зевин<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет «ХПИ», Харьков<sup>2</sup>ИПМаш НАН Украины, Харьков

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНО ОБОСЛЕНННОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОБЛОКА ПРИ ЕГО РАБОТЕ НА МОЩНОСТИ

*Рассмотрена одна из задач поддержки принятия технических решений, которая может быть включена в состав новых информационных и управляющих систем энергоблоков АЭС. Задача относится к классу задач оперативного планирования оптимальных объемов ремонтов оборудования технологических систем энергоблока в режиме его работы на мощности.*

**Ключевые слова:** автоматизированные системы, организационно технические объекты, надежность, безопасность, ТЭС и АЭС, оптимизация объемов ремонтов.

### Введение

**Постановка проблемы.** В последнее десятилетие автоматизированные системы (АС) управления все шире применяются к сложным организационно-техническим объектам. К числу таких объектов относятся системы технического обслуживания и ремонта энергоблоков (ЭБ) тепловых и атомных электростанций (ТЭС и АЭС). Важность проблемы создания АС управления обслуживанием и ремонтом ЭБ подчеркнута в публикациях последнего времени [1, 2] Московского энергетического института. В работе [1] автор обращает внимание на то обстоятельство, что: «Современная организационно-функциональная структура управления техническим обслуживанием и ремонтом энергетического оборудования должна включать в себя автоматизированную систему управления ремонтом». По мнению автора кроме решения задач «улучшение управления», «сокращение издержек через более эффективное использование ресурсов» создание АС может рассматриваться как инструмент, «с помощью которого можно провести коренные изменения в организации ремонтного процесса». По нашему же мнению центральная роль в АС управления ремонтами должна принадлежать задачам планирования оптимальных объемов ремонтов и сетевому планированию работ, и потому АС целесообразней рассматривать как аналитический инструмент подготовки технических решений, принимаемых ответственными специалистами ТЭС и АЭС.

Идеология управления системой организации ремонтов энергетического оборудования отражена также в работе [2]. Автор отмечает, что «существующая система управления ремонтами не в состоянии обеспечить эффективную работу нововведений ...», и поэтому необходимо «создать новую систему управления, которая позволила бы эффективно организовывать и проводить подготовку и проведение ремонтной кампании, ее планирование ...». При этом определяется требование: «Эта система должна обладать необходимой гибкостью, обеспечивающей опе-

ративную реакцию на изменения параметров как внешнего, так и внутреннего окружения». В схеме АС, предлагаемой в работе, хотя и предусматривается блок планирования ремонтов, но он не содержит задачу оптимизации плана объемов ремонтов ни в оперативном режиме, ни в периоды планово-предупредительного ремонта (ППР), а скорее акцентируется внимание на автоматизации вспомогательных управленческих видов деятельности. В этой связи весьма поучительна позиция академика АН СССР Н.Н. Моисеева, который считал, что автоматизация тех или иных объектов должна быть в первую очередь ориентирована на эффективную работу «Главного конструктора», и только затем на работу других специалистов. Распространяя это соображение на содержание проблемы автоматизации процесса управления организационно-технической системой обслуживания и ремонта ЭБ ТЭС и АЭС, можно утверждать, что первоочередной задачей при разработке АС управления ремонтами выступает задача создания подсистемы управления надежностью и техническим состоянием (ТС) энергоблоков в составе сложной организационно-технической системы их технического обслуживания и ремонта.

**Анализ литературных источников.** Решение задач прогнозирования надежности и ТС сложных систем и определение на этой количественной основе оптимальных планов ремонтов базируется на вычислении одного из показателей надежности системы и решении соответствующей экстремальной задачи. Так в работе [3] показано, что даже решение экстремальных задач выбора количества резервных элементов для систем с большим числом элементов методом перебора вариантов невозможно, и требуется применение методов оптимизации. Еще более в этом отношении осложняется ситуация при решении двухкритериальных или трехкритериальных задач планирования ремонтов, выдвигаемых практикой.

Так, в работе [4], в качестве критериев оптимальности эксплуатационных свойств объекта выступают экономические показатели и показатели на-

дежности. Отмечается, что «При попытках оптимизации возникают трудности, связанные с многогранностью задач».

План ремонта особенно для ответственных объектов необходимо строить с учетом прогнозных оценок их ТС. Проблеме прогнозирования ТС систем управления посвящена книга Ю.Т. Костенко и Л.Г. Раскина [5]. Авторы пишут: «Трудности решения задач индивидуального прогнозирования связаны, прежде всего, с высокой размерностью задачи», и «Желание сделать исходный статистический материал возможно более однородным приводит к необходимости дробления выборок, что сокращает их объем и ухудшает точность оценивания параметров».

В последнее время все большее внимание уделяется проблеме взаимоотношения человека и сложной технической системы, поскольку аварии происходят во многих случаях по вине человека-оператора или по вине ремонтного персонала. «В этой связи возрастает роль АС, которые работают по определенным моделям, и обеспечивают экономическую эффективность объекта. Однако в ряде такого рода случаев может уменьшаться живучесть объекта, а стремление к экономической выгоде не всегда, к сожалению, подкрепляется опережающим развитием информационно-сервисных систем контроля» [6].

К числу задач АС планирования ремонтов ЭБ ТЭС и АЭС, решение которых основывается на математическом моделировании надежности энергоблоков, может быть отнесена и задача оперативного построения оптимального плана ремонта оборудования ЭБ «на ходу».

### Содержательная постановка основной задачи

В период работы ЭБ на мощности могут возникать отказы оборудования, которые не приводят к необходимости немедленного снижения мощности или даже останова ЭБ. Кроме того, отдельные единицы оборудования могут расходовать свою надежность в более высоком темпе, чем предполагалось в период ППР, и эти факты зарегистрированы контрольно-измерительной техникой. Подобного рода эксплуатационные обстоятельства, в конечном счете, могут приводить к уменьшению экологической безопасности энергоблоков (в частности, к увеличению вероятности радиационной аварии (РА) для ЭБ АЭС) за время, оставшееся до конца очередной эксплуатационной кампании. Чтобы этого избежать, можно сделать, если это допустимо по условиям эксплуатации, ремонт «на ходу» соответствующей технологической системе (не обязательно отказавшей единицы оборудования). Возникает естественная по условиям безопасности ЭБ целесообразность в определении рациональных объемов ремонтов «на ходу» технологических систем в допустимо кратковременный период времени.

### Содержание

В общем случае критерий управления  $Q$  технологическим комплексом, в частности энергоблоком, может быть записан в интегральном виде [7]:

$$Q = \int_{T_0}^T F(y, x, u, v, t) dt, \quad (1)$$

где  $T - T_0$  – рассматриваемый период эксплуатации объекта;  $t$  – время;  $y$  – вектор выходных контролируемых величин;  $x$  – собственный вектор управляющих воздействий;  $u$  – вектор управляющих воздействий от внешней управляющей системы;  $v$  – вектор возмущающих воздействий.

В состав вектора выходных контролируемых величин  $y$  могут быть включены показатели безопасности объекта, показатели надежности и ТС оборудования технологических систем ЭБ. Тогда часть параметров функции  $F$  окажется не только контролируемыми величинами в момент времени  $t$ , но и прогнозируемыми на период времени  $T - t$ .

Показатели надежности оборудования формируются на основании статистических данных по их отказам, по результатам наблюдений за параметрами ТС, по результатам дискретного или непрерывного контроля состояния металла или выходных данных компонент, а также путем применения физико-статистических моделей надежности типа «нагрузка – несущая способность». При наличии соответствующей выходной контролируемой информации показатели надежности могут быть скорректированы в любой момент времени  $t$ , а, следовательно, может быть дана уточненная прогнозная оценка безопасности и надежности ЭБ на интервале времени  $T - t$ .

В тех случаях, когда прогнозные оценки не соответствуют требованиям нормативных документов, регламентирующих качества ЭБ на этапе эксплуатации, возникает задача восстановления надежности технологических систем до требуемого уровня, без останова ЭБ. При этом затраты на восстановление надежности ЭБ должны быть минимальными, а также должны соблюдаться ограничения на длительность времени выполнения ремонта. В таких случаях роль АС управления ремонтами состоит в своевременной подготовке эффективных рекомендаций.

В целях конкретизации задачи в качестве объекта управления ремонтами примем ЭБ АЭС. Важнейшим его свойством является безопасность, в частности, вероятность плавления твэлов или вероятность радиационной аварии.

Для оценки вероятности РА энергоблока АЭС разработан специальный метод «дерева» событий и «дерева» отказов [8]. При ряде упрощающих задачу предположений, вероятность РА  $P_A(T_0 = 0, t)$  за

время длительности  $t$  может быть получена путем применения некоторого алгоритма расчета. В основу расчета вероятности РА должно быть положено рассмотрение всех возможных исходных событий, и всех возможных путей протекания РА. Такой путь решения задачи невозможен, в силу огромного числа исходных событий и путей протекания аварий. Однако, если ограничиться рассмотрением задачи не на уровне единиц оборудования, а на уровне систем ЭБ, то задача становится вполне решаемой. То есть, с соответствующими оговорками, можно считать, что  $P_A(t)$  есть некоторая известная функция  $f$  от вероятности безотказной работы (ВБР) систем энергоблока  $S_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ :

$$P_A(t) = f(R_1(t), R_2(t), \dots, R_N(t)), \quad (2)$$

где  $R_i(t)$  – ВБР  $S_i$  системы за время  $t$ .

Если дополнительно принять условие о независимости отказов систем  $S_i$ , то нетрудно показать, что из условия безопасности:  $P_A(t) \leq 10^{-5}$  на один реактор в год, регламентированного нормативными документами, следует требование к ВБР систем  $S_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ . Действительно, величину  $10^{-5}$  требуется распределить по всем системам ЭБ. Это можно сделать различным образом. В частности, множество допустимых распределений величины  $10^{-5}$  по системам блока можно найти из решения экстремальной задачи:

$$\omega^* = \min_i [10^{-5} - P_A(t)], \quad \omega^* \geq 0. \quad (3)$$

В результате ремонта оборудования ЭБ в период ППР (в момент времени  $T_0 = 0$ ) формируется надежность ЭБ, и, следовательно, вероятность РА  $P_A(T)$  за время до  $T$ . Наибольшую вероятность РА до  $T$ , которую можно было бы допустить по требованиям безопасности, обозначим  $P_A^*(T)$ . Предположим, что в момент времени  $T_0$  всем элементам ЭБ сделан капитальный ремонт, который восстанавливает ВБР элементов до единицы. Тогда может быть оценена, поскольку функцию  $f$  можно считать известной, минимально возможная вероятность РА  $P_A^{**}(T)$  на ЭБ до момента времени  $T$ . То есть, по условию безопасности ЭБ для любого момента времени  $t$  на интервале  $[T_0 = 0, T]$  должно выполняться условие:

$$P_A^{**}(T) \leq f(R_1(t), R_2(t), \dots, R_N(t)) \leq P_A^*(T). \quad (4)$$

Из решения задачи (3), а также из оценки (4) следует, что распределение значений ВБР  $R_i(t)$  систем  $S_i$  не единственно. Однако любое одно распределение, удовлетворяющее (3) или (4) и реалистичным значениям ВБР систем, законно.

Пусть в момент времени  $\tau_k$  произошел отказ оборудования, принадлежащего системе  $S_m$ , и, сле-

довательно, изменилось значение  $R_m(\tau_k, T)$ . Допустим, что расчетным путем установлено, что до момента времени  $\tau_k + \Delta t \leq T$  вероятность РА  $P_A(\tau_k + \Delta t) > P_A^*(T)$ . Тогда надо определить такой план восстановления ВБР системы  $S_m$ , чтобы удовлетворялось условие безопасности  $P_A(T) \leq 10^{-5}$ . Поскольку все параметры функции  $f$  (ВБР систем), можно считать, известными, то, решая уравнение  $f(R_1(\tau_k + \Delta t), \dots, R_N(\tau_k + \Delta t)) = 10^{-5}$  относительно  $R_m(\tau_k + \Delta t)$ , получим предельно-допустимое значение  $R_m^*$  ВБР системы  $S_m$ . Тогда построение математической модели планирования ремонтов можно осуществить по схеме метода, изложенного в [9].

Объемы ремонтов элементов  $e_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , функционально обособленной системы, содержащей  $n$  элементов, можно количественно характеризовать произведенными затратами  $c_i$  на ремонт элементов. Определяя связь между величиной повышения ВБР  $r_i(\tau_k)$  элемента  $e_i$  в момент времени  $\tau_k$  и произведенными затратами  $c_i$  на его ремонт через удельную ВБР  $\delta r_i(\tau_k)$  элемента  $e_i$ , как величину повышения ВБР элемента, приходящуюся на одну условную единицу затрат на ремонт этого элемента, получим:

$$\bar{r}_i(\tau_k) = r_i(\tau_k) + c_i \delta r_i(\tau_k). \quad (4)$$

В свою очередь, ВБР  $R_m(t)$  системы  $S_m$  является известной функцией  $\phi$  от ВБР элементов  $\bar{r}_i(\tau_k)$ :

$$R_m(\tau_k, T) = \phi(\bar{r}_1(\tau_k)r_1(\tau_k, T), \dots, \bar{r}_n(\tau_k)r_n(\tau_k, T)).$$

Тогда задача оперативного планирования объемов ремонтов может быть записана следующим образом. Требуется найти такие значения  $c_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , чтобы

$$\Omega^* = \min_{c_i} [R_m(\tau_k, T) - R_m^*], \quad \Omega^* \geq 0; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i \leq C_m^*, \quad \theta_m \leq \theta_m^*,$$

где  $\theta_m, \theta_m^*$  – время ремонта и предельно-допустимое время ремонта системы  $S_m$ , содержащей отказавшее оборудование;  $C_m^*$  – предельно-допустимые затраты на ремонт системы «на ходу».

Решение задачи (5) не единственно. Однако все решения задачи автоматически удовлетворяют условию безопасности:  $P_A(T) \leq 10^{-5}$ , поскольку из него получено значение  $R_m^*$ . Выбор из множества эффективных решений задачи одного решения, которое будет реализовано на практике, предоставляется специалисту.

Однако никаких решений задачи (5) может и не быть из-за очень ограничительного условия  $\theta_m \leq \theta_m^*$ , и по другим причинам.

Собственно решение задачи (5) состоит в выборе таких значений  $c_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , а, следовательно, таких объемов ремонтов элементов системы в момент времени  $\tau_k$ , чтобы в этот момент времени изменились значения  $\bar{f}(\tau_k)$  до уровней, обеспечивающих оптимум ведущей целевой функции, и чтобы при этом удовлетворялись ограничения задачи (5). Если число  $n$  элементов системы достаточно большое, то получить решение задачи методом перебора вариантов, практически, невозможно. Для решения оптимизационной задачи (5) удобно применить метод покоординатного спуска по координатам  $\bar{f}(\tau_k)$  с выбором ведущего элемента по критерию максимальной эффективности спуска. Критерий определяется как изменение ВБР системы, приходящейся на единицу затрат на ремонт элемента. При этом должна осуществляться проверка выполнения ограничений. В результате применения метода решения задачи, получим план ремонта, который будет удовлетворять требованию безопасности энергоблока, будет самым экономным по затратам на ремонт, и будет выполнимым в силу удовлетворения условия  $\theta_m \leq \theta_m^*$ .

Такой вывод будет верным, если время ремонта системы мало по сравнению со временем  $T - \tau_k$ , и им можно пренебречь. В противном случае целесообразность построения оперативного плана ремонта системы будет сомнительна.

Как уже было отмечено, решение задачи (5) для одной системы  $S_m$  может и не существовать. Тогда естественно рассмотреть эту же задачу сразу для двух систем, организовывая их в одну систему. Однако заметим, что в этом случае возникают трудности в получении из условия безопасности ЭБ предельной надежности объединенной системы.

#### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЛАНУВАННЯ РЕМОНТІВ ФУНКЦІОНАЛЬНО ВІДОКРЕМЛЕНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОБЛОКУ ПРИ ЙОГО РОБОТІ НА ПОТУЖНОСТІ

С.В. Коваленко, О.С. Куценко, Л.І. Зевін

*Розглянуто одну з задач підтримки прийняття технічних рішень, що може бути включено у склад нових інформаційних та управляючих систем енергоблоків АЕС. Задача відноситься до класу задач оперативного планування оптимальних об'ємів ремонтів обладнання технічних систем енергоблоку у режимі його роботи на потужності.*

**Ключові слова:** автоматизовані системи, організаційно-технічні об'єкти, надійність, безпечність, ТЕС и АЕС, оптимізація об'ємів ремонтів.

#### SIMULATOR OF REPAIR PLANNING OF FUNCTIONALLY ISOLATED SYSTEM OF POWER-GENERATING UNIT IN FULL OPERATION

S.V. Kovalenko, A.S. Kutchenko, L.I. Zevin

*One of problem of support of acceptance of technical decisions, which can be included in the complement of new informative and controlling systems of power units of nuclear power plan, is considered. A problem behaves to the class of tasks of the operative planning of optimum volumes of repairs of equipment of the technological systems of power unit in the mode of his operations on power.*

**Keywords:** automated systems, organizationally technical objects, reliability, safety, thermal power-station and nuclear power plan, optimization of volumes of repairs.

## Выводы

Математическая модель (5) оперативного (в момент времени появления необходимости) планирования оптимальных объемов ремонтов и намеченный путь ее решения позволяют разработать соответствующее программное обеспечение, и включить его в состав информационных систем энергоблока в качестве автоматизированного инструмента подготовки технических решений.

## Список литературы

1. Андрюшин А.В. Основы создания автоматизированной системы управления ремонтами // Теплоэнергетика. – 2001. – № 10. – С. 53-56.
2. Андрюшин А.В., Шныров Е.Ю. Применение идеологии управления проектами для создания системы организации ремонтов энергетического оборудования // Теплоэнергетика. – 2004. – № 10. – С. 17-21.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – С.-ПБ.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
4. К вопросу учета ущерба потребителей из-за перерывов электроснабжения в задачах планирования развития энергосистем / Г.А. Волков, П.И. Головкин, А.А. Крюков, И.М. Маркович // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1968. – № 4. – С. 75-78.
5. Прогнозирование технического состояния систем управления / Ю.Т. Костенко, Л.Г. Раскин и др. – Х.: Основа, 1996. – 303 с.
6. Еременко В.А. Пути обеспечения безопасного управления атомными энергетическими установками. – К.: Техника, 1988. – 256 с.
7. Плютинский В.И., Погорелов В.И. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
8. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 136 с.
9. Куценко А.С., Коваленко С.В. Планирование ремонтов оборудования энергоблоков АЭС по критерию надежности // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2006. – № 19. – С. 176-181.

Поступила в редколлегию 8.07.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.М. Любчик, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.