

УДК 621.039.56

*Розглянута математична формалізація задачі оцінювання ресурсних характеристик обладнання АЕС з використанням положень теорії вибору та прийняття рішень, удосконалено модель процесу аналізу надійності обладнання АЕС, проведено моделювання процесу оцінювання ресурсних характеристик обладнання*

*Ключові слова: ресурсні характеристики, надійність, модель процесу*

*Рассмотрена математическая формализация задачи оценивания ресурсных характеристик оборудования АЭС с использованием положений теории выбора и принятия решений, усовершенствована модель процесса анализа надежности оборудования АЭС, проведено моделирование процесса оценивания ресурсных характеристик оборудования*

*Ключевые слова: ресурсные характеристики, надежность, модель процесса*

*A mathematical formalization of the estimation problem of NPP equipment resource characteristics using the assumptions of the choice and decision-making theory was considered. Model of NPP equipment reliability analysis was improved*

*Keywords: resource characteristics, reliability, simulation of process*

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

**К.Н. Маловик**

Кандидат технических наук, доцент, профессор,  
руководитель института

Институт нанотехнологий, информационно-измерительных и специализированных компьютерных систем в энергетике  
Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности  
ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, Украина, 99015  
Контактный тел.: (0692) 71-01-80  
E-mail: tmp2@sinp.com.ua

## Введение

Процедура продления срока эксплуатации оборудования АЭС содержит работы по определению технического состояния оборудования, восстановлению его ресурса, оценке ресурсных характеристик [1,2].

## Обзор нормативной документации

Для назначения срока службы оборудованию, для которого эти показатели не определены в технической документации завода изготовителя, могут быть применены процедуры, предусмотренные в [3].

Продление срока эксплуатации информационных и управляющих систем (ИУС) и электротехнического оборудования (ЭТО), у которых истекает срок службы, регламентированный показателями долговечности, приведенными в нормативной документации на эти средства, осуществляется в соответствии с [4].

Продление срока эксплуатации электротехнического оборудования, важного для безопасности, для которого на ОП АЭС определена процедура технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), разрешается выполнять по результатам капитального ремонта в соответствии с КНД 95.1.08.01.55-2004.

Продление срока эксплуатации тепломеханического оборудования выполняется по результатам ка-

питального ремонта в соответствии с требованиями Отраслевого решения ТР-С 1234.03.032.02.

Продление срока эксплуатации выемных частей разборной и неразборной арматуры выполняется по результатам технического обслуживания и капитального ремонта в соответствии с Отраслевым решением ТР-С.0.03.031.02.

Продление срока эксплуатации электроприводов арматуры систем, важных для безопасности (СВБ), проводят на основании среднего или капитального ремонта, при этом ремонт электропривода и арматуры проводится совместно.

Продление срока эксплуатации устройств РЗА проводят по результатам профилактического восстановления в соответствии с [5].

Однако в рассмотренных нормативных документах применяются статистические методы, отсутствуют методики определения ресурсных характеристик на основе эксплуатационных данных для уникального высоконадежного оборудования, для которого отсутствует статистика отказов [6].

## Цель статьи

Выполнить математическую формализацию задачи оценивания ресурсных характеристик оборудования АЭС с использованием положений теории выбора

и принятия решений, усовершенствовать модель процесса анализа показателей надежности оборудования АЭС, провести моделирование процесса оценивания ресурсных характеристик оборудования АЭС по эксплуатационным данным с использованием математического аппарата нечетких множеств для разработки нормативной документации по оценке ресурсных характеристик уникального высоконадежного оборудования АЭС.

**Модель процесса анализа показателей надежности оборудования АЭС**

Работы по продлению срока эксплуатации оборудования СВВ проводятся на плановой основе. Процедура проведения работ на каждом блоке АЭС предусматривает проведение анализа надежности по эксплуатационным данным с использованием методов статистической оценки показателей надежности для оборудования, у которого в ТУ определены показатели надежности. Анализ эксплуатационной надежности оборудования в этом случае выполняется по действующим государственным стандартами или по утвержденным методикам. Анализ показателей надежности должен содержать [3]:

- основные задачи анализа надежности для продления срока эксплуатации оборудования: определение изменения надежности во времени (тренда параметра потока отказов);
- анализ изменения надежности во времени с целью выявления тенденции к снижению надежности;
- определение статических оценок показателей надежности оборудования, его составных частей и анализ их соответствия показателям надежности в технической документации;
- анализ причин отказов;
- анализ влияния отказов оборудования на нарушения в работе АЭС;
- разработка рекомендаций в части мер, компенсирующих снижение надежности, при выявлении такого снижения;
- оценку возможности, условий и срока продления эксплуатации по данным эксплуатационной надежности;
- применяемые методики проведения анализа, разработанные с учётом требований действующих стандартов и нормативных документов ДСТУ 3004, ДСТУ 3433 (ГОСТ 27.005), ДСТУ 3942 (ГОСТ 27.506) и др.;
- используемые источники получения исходных данных для проведения анализа надежности.



Рис. 1. Модель процесса анализа надежности оборудования

На рис. 1 представлена усовершенствованная модель процесса анализа надежности оборудования АЭС.

**Математическая формализация задачи принятия решений о продлении срока эксплуатации оборудования АЭС**

В задачах принятия решений имеется множество вариантов; нужно выделить из него некоторое подмножество, в частном случае - один вариант. Выделение требуемых вариантов производится на основе представления руководителя об их качестве [7]. Представление о качестве вариантов характеризуют принципом оптимальности. Задачей принятия управленческих решений является пара  $\langle Q, OP \rangle$ , где  $Q$  - множество вариантов,  $OP$  - принцип оптимальности; решением задачи  $\langle Q, OP \rangle$  является множество  $Q_{on} \subseteq Q$ , полученное с помощью принципа оптимальности  $OP$ . Отсутствие хотя бы одного из указанных элементов лишает смысла задачу в целом. Если нет множества  $Q$ , то выделять решение  $Q_{on}$  не из чего. Если нет принципа оптимальности, то найти решение невозможно. Математическим выражением принципа оптимальности  $OP$  служит функция выбора  $C_{on}$ . Она сопоставляет любому подмножеству  $X \subseteq Q$  его часть  $C_{on}(X)$ . Решением  $Q_{on}$  исходной задачи является множество  $C_{on}(Q)$ .

Задачи принятия решений о продлении срока эксплуатации оборудования АЭС можно различать в зависимости от имеющейся информации о множестве  $Q$  и принципе оптимальности  $OP$ . В общей задаче принятия управленческих решений как  $Q$ , так и  $OP$  могут быть неизвестными. Информацию, необходимую для выделения  $Q_{on}$ , получают в процессе решения. Задача с известным  $Q$  является задачей выбора, задача с известными  $Q$  и  $OP$  - общей задачей оптимизации. Таким образом, задача выбора и задача оптимизации являются частными случаями общей задачи принятия управленческих решений. Особенность развиваемого здесь подхода к решению задачи выбора состоит в том, что он в общем случае не требует полного восстановления принципа оптимальности, а позволяет ограничиться только информацией, достаточной для выделения  $Q_{on}$ . Общая задача оптимизации может не предполагать максимизации одной или нескольких числовых функций. Ее смысл состоит в выделении множества лучших элементов, т. е. в вычислении значения  $C_{on}(Q)$  при заданных  $Q$  и  $C_{on}$ . Если  $C_{on}$  - скалярная функция выбора на множестве  $Q$ , то получаем обычную оптимизационную задачу. Элементы множества  $Q$  являются управленческими альтернативами или вариантами. Принцип оптимальности задает понятие лучших альтернатив: лучшими считают альтернативы, принадлежащие  $C_{on}(Q)$ .

В вопросах продления срока эксплуатации оборудования АЭС управленческие альтернативы обладают многими свойствами, оказывающими влияние на решение. Пусть некоторое свойство альтернатив из  $Q$  выражается числом, т. е. существует отображение  $\phi: Q \rightarrow E_1$ . Тогда такое свойство называют критерием, а число  $\phi(x)$  - оценкой управленческой альтернативы  $x$  по данному критерию [7,8]. Экономическая эффективность является одним из кри-

териев, поскольку продление срока эксплуатации оборудования предусматривает затраты на процессы восстановления оборудования. При принятии решений в вопросах продления срока эксплуатации оборудования АЭС одновременный учет отдельных свойств может быть затруднительным. При этом выделяют группы свойств, которые агрегируют в виде аспектов.

Аспект представляет собой сложное свойство управленческих альтернатив, которое одновременно учитывает все свойства, входящие в соответствующую группу. В частном случае аспект может являться критерием.

Процесс решения задачи  $\langle Q, OP \rangle$  организуют по следующей схеме (рис. 2): формируют множество  $Q$ , т. е. подготавливают управленческие альтернативы, а затем решают задачу выбора. В процессе формирования множества  $Q$  используют условия возможности и допустимости управленческих альтернатив, которые определяются конкретными ограничениями задачи.

При этом считают известным универсальное множество  $Q_v$  всех мыслимых альтернатив. Задача формирования  $Q$  является задачей выбора  $\langle Q_v, OP_1 \rangle$ , где  $OP_1$  - принцип оптимальности, выражающий условия допустимости управленческих альтернатив. Множество  $Q = C_{on}(Q_v)$ , полученное в результате решения указанной задачи выбора, является исходным множеством альтернатив (ИМА). Итак, общая задача принятия управленческих решений в вопросах продления срока эксплуатации оборудования АЭС сводится к решению двух последовательных задач выбора.

В процессе решения этой задачи участвуют: лицо, принимающее решение, эксперты, консультанты.



Рис. 2. Этапы принятия решений о продлении срока эксплуатации оборудования

Оптимальность принимаемых решений в процессе продления срока эксплуатации оборудования АЭС является обязательным условием, обеспечивающим экономическую эффективность. Оценка технических решений основывается на использовании двух принципов: технического и экономического. В соответствии с техническим принципом оборудование должно полностью обеспечивать выполнение всех функций.

Это требование выполняется на этапе генерации альтернатив. Согласно требованиям экономического принципа эксплуатация оборудования должна вестись с минимальными затратами труда и издержками производства.

Расчет экономических показателей для принимаемого технического решения производится с использованием общепринятых формул.

При продлении срока эксплуатации оборудования задача выбора оптимальных альтернатив с точки зрения экономической эффективности решается как задача нечеткого математического программирования (НМП) при нечетком множестве допустимых альтернатив  $\Omega$ .

Целевая функция себестоимости  $C$  минимизируется на множестве  $N_\alpha$  тех альтернатив, которые со степенью не меньшей  $\alpha$  считаются допустимыми в исходной задаче нечеткого математического программирования. Решение записывается в виде

$$\mu_0(\Omega) = \sup_{\alpha: \Omega \in N_\alpha} \alpha,$$

т.е. его функция принадлежности принимает значения, равные максимальному уровню  $\alpha$ , для которого соответствующая альтернатива  $\Omega$  доставляет экстремум целевой функции  $C$ . Его можно определить также как

$$\mu_0(\Omega) = \begin{cases} \mu(\Omega), & \text{если } \Omega \in N_\alpha \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Таким образом, если надлежит выбрать единственную альтернативу  $\Omega_0 \in \Omega$ , то выбор должен основываться не только на величине функции принадлежности (степени принадлежности альтернативы  $\Omega_0$  нечеткому множеству допустимых альтернатив  $\Omega$ ), но и соответствующим значением целевой функции  $C$ . Вместо задачи минимизации при НМП ставится задача удовлетворения исходной цели, решением которой кроме альтернативы, доставляющей минимум целевой функции  $C$  являются и другие альтернативы.

Таким образом, осуществляется выбор тех альтернатив из множества  $N_\alpha$ , себестоимость которых не превышает некоторого заданного значения, что позволяет решить, как продлить срок эксплуатации изделия при определенных затратах на процессы восстановления.

### Моделирование процесса оценивания ресурсных характеристик оборудования АЭС

Для разработки методик оценивания ресурсных характеристик оборудования АЭС необходима формализация процедурных знаний о ресурсоспособности оборудования.

Большинство этих знаний выражается в виде причинно-следственных знаний типа «Если - то» либо в виде функциональных зависимостей, обеспечивающих нахождение значения параметра в результате использования некоторой формулы. Однако в области оценки ресурсных характеристик оборудования для комплексных ресурсных характеристик (например,

остаточный ресурс (ОР) оборудования) функциональные зависимости  $Y = \Psi(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$  не установлены. Процедурные знания будем представлять в виде причинно-следственных знаний - экспертных правил «Если-То».

Пусть моделируемый процесс оценивания РХ оборудования определяется совокупностью нечетких множеств  $X(U) = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  и совокупностью нечетких множеств  $P(V) = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$  и при этом

$$X_i = \{(x, \mu(x))\};$$

$$Y_j = \{(y, \mu_j(y))\},$$

где  $U$  и  $V$  - конечные входное и выходное пространства объекта моделирования.

Тогда простое нечеткое экспертное правило  $RT_i$  представляет собою утверждение вида:

$$\text{Если } X_i R \dots R X_k \text{ то } Y_j R \dots R Y_s,$$

где  $Y_j = \{(y, \mu_j(y))\}$  - нечеткое множество возможных решений (одно или несколько),  $\mu_j(y)$  - функция принадлежности для  $j$  решения, принимающая значения в некотором упорядоченном множестве (на промежутке  $[0,1]$ ).  $Y_j, \dots, Y_s$  - следствия правила,  $X_i, \dots, X_k$  - посылки правила,  $R$  - отношения.

Если  $RT = \{rt_i\}$  - система экспертных правил,  $X, Y$  - множество входных и выходных параметров, то справедливо высказывание:

$$X \overset{R}{\Rightarrow} Y.$$

Входными данными являются эксплуатационные данные об оборудовании (рис. 1), выходными данными являются значения ресурсных характеристик оборудования

### Выводы

В статье проведена математическая формализация задачи оценивания ресурсных характеристик оборудования АЭС с использованием положений теории выбора и принятия решений, усовершенствована модель процесса анализа показателей надежности оборудования АЭС, проведено моделирование процесса оценивания ресурсных характеристик оборудования АЭС по эксплуатационным данным с использованием математического аппарата нечетких множеств.

Полученные результаты исследований позволят разработать нормативную документацию для оценки ресурсных характеристик уникального высоконадежного оборудования АЭС.

В дальнейшем необходима разработка методов мониторинга и оценки нагруженности оборудования АЭС, сравнение индивидуальной нагруженности и типовых нагрузок, определение расходования ресурса на основе эксплуатационных данных о дефектах и отказах оборудования.

## Литература

1. Glossary of Nuclear Power Plant Ageing, OECD/NEA, 2008.
2. Методология управления старением компонентов атомных электростанций, важных для безопасности// Серия технических докладов №338. – Вена: МАГАТЭ. – 1992. – 38 с.
3. Положение о порядке продления срока эксплуатации оборудования систем, важных для безопасности: Пл-д.0.03.126-10. – Киев, – НАЭК «Энергоатом». – 2010. – 32 с. (Нормативный документ ГП НАЭК «Энергоатом». Положение).
4. Требования к порядку и содержанию работ для продления срока эксплуатации информационных и управляющих систем, важных для безопасности атомных электростанций: НП.306.5.02/2.068-2003. (Нормативный документ ГП НАЭК «Энергоатом». Требования).
5. Техническое обслуживание устройств релейной защиты, противоаварийной автоматики, электроавтоматики, дистанционного управления и сигнализации электростанций и подстанций 110-750 кВ: ГКД 34.35.604-96. (Нормативный документ ГП НАЭК «Энергоатом»).
6. Отраслевой обобщенный отчет по надежности оборудования энергоблоков АЭС за 2008 год. – Киев, – НАЭК «Энергоатом». – 2009. – 113 с.
7. Макаров, І.М. Теорія вибору і прийняття рішень: Навчальн. посібник [Текст] / І.М. Макаров, Т.М. Виноградська, А.А. Рубчинський, В.Б. Соколов. – М.: Наука, 1982. – 328 с.
8. Лапа, М.В. Сучасні моделі процесів прийняття управлінських рішень. Навч.-метод. посібник. [Текст]/ М.В. Лапа// Чернівці: ЦППК працівників органів держ. влади, органів місцевого самоврядування, держ. підприємств, установ і організацій. – 2008. – 79 с.

*Розроблено методику проведення кореляційно-регресійного аналізу ресурсних характеристик складних виробів. Підхід, що пропонується, проілюстровано прикладом*

*Ключові слова: кореляційно-регресійний аналіз, ресурсні характеристики*

*Разработана методика корреляционно-регрессионного анализа ресурсных характеристик сложных изделий. Предлагаемый подход проиллюстрирован примером*

*Ключевые слова: корреляционно-регрессионный анализ, ресурсные характеристики*

*The method of cross-correlation-regressive analysis of resource descriptions of difficult wares is developed. Offered approach illustrated by an example*

*Keywords: correlative regression analysis, resource characteristics*

УДК 004.67:519.257

## КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

**К. Н. Маловик**

Кандидат технических наук, доцент, профессор, руководитель института

Институт нанотехнологий, информационно-измерительных и специализированных компьютерных систем в энергетике Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, Украина, 99015

Контактный тел.: (0692) 71-01-80,

E-mail: tmp2@sinp.com.ua

**И. А. Скاتков**

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра автоматизированных приборных систем Севастопольский национальный технический университет ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

Контактный тел.: (0692) 49-63-17

E-mail: skatkov@ua.fm

### 1. Введение

Известны ресурсные характеристики, определяющие наступление предельных состояний сложных

изделий при исследовании их долговечности [1]. Под сложным изделием можно понимать оборудование энергоблоков атомных станций, комплексов металлургических и машиностроительных предприятий,