

УДК 621.311.25

С.Е. Кравцова, А.О. Лескив

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности,  
Севастополь, Украина*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ «УПРАВЛЕНИЕ СТАРЕНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ» СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА**

*Управление современными предприятиями, в том числе атомно-энергетического комплекса, в настоящее время все чаще обеспечивается путем внедрения систем менеджмента качества (СМК). Для успешного функционирования СМК актуальным является поиск подходов к эффективному управлению всеми видами ресурсов, в том числе таким как «инфраструктура». Данный вопрос особенно актуален для АЭС и исследовательских реакторов в виду выработки проектных сроков эксплуатации. Работа посвящена разработке методики управления старением оборудования на основе применения инструментов теории нечеткой логики.*

**Ключевые слова:** *исследовательский реактор, система менеджмента качества, инфраструктура, ресурс оборудования, управление старением, база знаний.*

### **Введение**

Эффективное управление ресурсами является основой успешного внедрения и функционирования систем менеджмента качества (СМК) любого предприятия. СМК активно внедряются на предприятиях атомно-энергетического комплекса Украины, и в организациях, эксплуатирующих ядерные реакторы, в том числе исследовательские. Для предприятий, создание, реконструкция и демонтаж которых требует значительных инвестиционных вложений, а работа связана со значительными потенциальными рисками техногенных аварий или негативных воздействий на окружающую среду, рациональное управление таким ресурсом как инфраструктура является одной из важнейших задач. Для многих подобных предприятий (в том числе АЭС, исследовательских реакторов (ИР) и т.п.), в связи с окончанием сроков эксплуатации, все более актуальной становится проблема продления ресурса оборудования на основе использования подходов управления старением.

Проблема старения не только энергетических, но и исследовательских реакторов является достаточно актуальной для Украины, в том числе для Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности, который эксплуатирует ИР. ИР необходимы для научных работ, связанных с безопасностью атомных электростанций, для фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной физики, физики твердого тела, радиационной химии, биологии, для испытания материалов, предназначенных для работы в интенсивных нейтронных потоках, для производства изотопов в медицинских целях.

Управление старением является новым направлением деятельности и в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ базируется на нескольких основных моментах. Это определение и изучение механизмов старения элементов энергоблока, постоянный контроль за техническим состоянием элементов и оптимизация мероприятий по техническому обслуживанию, ремонту и, при необходимости, замене элементов.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работах специалистов Обнинского ИАТЭ: Острейковского В.А. [1, 2], Саакяна С.П., а также Ястребенцкого М.А. [3], Сидоренко В.А. [4], Дубковского В.А., Бегуна В.В., Горбунова О.В. и др. [5], в изданиях по безопасности МАГАТЭ проведен комплексный анализ понятия «старение оборудования», «продление ресурса», разработаны подходы к оценке и назначению ресурса оборудования АЭС.

Основываясь на изучении работ упомянутых авторов, наиболее эффективными методами оценки ресурса оборудования можно считать: оценку ресурса на основе анализа интенсивности отказов как функции времени (постоянной и возрастной функции времени); оценку остаточного ресурса методами параметрического прогнозирования (аналитическое прогнозирование остаточного ресурса, обратное и прямое аналитическое прогнозирование, вероятностное прогнозирование остаточного ресурса, модели, основанные на диффузионных процессах); расчет остаточного ресурса по модели "нагрузка – несущая способность", оценку на основе обобщения моделей ресурса параметрического прогнозирования и моделей "нагрузка – несущая способность"; прогнозирование остаточного ресурса ме-

годами механики разрушения (пластическая деформация – ведущий процесс разрушения объекта, разрушение объекта из-за роста коррозионных трещин, разрушение объекта из-за эрозии, разрушение объекта вследствие роста усталостных трещин, разрушение объекта из-за роста трещин в условиях ползучести) [1 – 5]. Применение перечисленных методов требует осуществления значительного объема экспериментальных исследований, использования массивов статистических данных об отказах, что не всегда возможно в условиях ИР, к тому же в большинстве случаев при решении практических задач по управлению старением оборудования работа проводится с неполной и неточной информацией, что характерно для экспертной информации. Необходимым условием, позволяющим получать эффективные решения, является всесторонний учет неопределенности при обработке информации и принятии решения

**Цель статьи.** Разработать методику СМК «Управление старением оборудования ИР» на основе использования методов теории нечеткой логики при формировании базы знаний об условиях эксплуатации оборудования ИР.

### Основной материал

Для исследований в качестве объекта была выбрана система управления и защиты, которая согласно классификации относится к системам реакторной установки ИР важным для безопасности. Расчеты были проведены на примере прибора контроля уровня воды ЭС–1011 с использованием собранных данных относительно режима эксплуатации и количества отказов.

На первом этапе исследований был оценен остаточный ресурс работы прибора на основе анализа интенсивности отказов как функции времени [1-2].

$$T_p = -\frac{\ln P_{\text{доп}}}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{доп}}$  – вероятность безотказной работы (ВБР) оборудования, известная из соображений безопасности;  $\lambda$  – функция интенсивности отказов.

Время достижения предельного состояния оборудования  $T_{\text{пр.с.}}$  и соответствующая ему  $\lambda_{\text{пр.с.}}$  (по данным завода-изготовителя), то допустимое значение ВБР оборудования

$$P_{\text{доп}} = e^{-T_{\text{пр.с.}} \cdot \lambda_{\text{пр.с.}}} \quad (2)$$

Согласно данным расчетов,  $T_p = 23219$  ч., что в 22 раза превышает ресурс, назначенный производителем для данного прибора ( $T_{\text{пр.с.}} = 1011$  ч.)

Однако, из-за специфики работы ИР-100, связанной с тем, что оборудование эксплуатируется с определенной периодичностью, условия работы оборудования изменяются, применение данной модели является недостаточным (простое перена-

значение ресурса на рассчитанный срок неоправданно оптимистично), появляется необходимость дополнительного исследования и создания базы знаний для принятия решений по выбору режима управления старением оборудования ИР. Для создания базы знаний и методики управления старением предлагается использование подходов теории нечеткой логики.

Задача построения математической модели процесса управления старением оборудования на базе нечеткой логики полностью соответствует математической модели идентификации объекта с дискретным выходом. Для создания такой математической модели применительно к управлению старением оборудования и были заданы входные переменные  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Задача управления старением оборудования ИР может рассматриваться как поиск отображения:

$$X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \rightarrow d_j \in D = (d_1, d_2, \dots, d_n), \quad (3)$$

где  $X^*$  – множество параметров состояния оборудования ИР;  $D$  – множество возможных решений.

При помощи экспертных опросов были выделены влияющие на старение оборудования факторы, рассматриваемые как входные лингвистические переменные, а проведенные исследования позволили выделить шкалу качественных термов для оценки значений выделенных лингвистических переменных [6].

В качестве выходных были приняты лингвистические переменные, позволяющие принимать решение относительно дальнейшего жизненного цикла исследуемого объекта:  $d_1$  – автоматическое переназначение ресурса на «пол срока» (половина продолжительности назначенной наработки);  $d_2$  – дополнительная диагностика, изменение условий эксплуатации, интенсивности эксплуатации оборудования;  $d_3$  – необходимость замены комплектующих, модернизация, капитальный ремонт.

Входные параметры и их термы были определены следующим образом:

$x_1$  – условия эксплуатации (выражается через термы:  $a_1^{11}$  – оптимальные;  $a_1^{12}$  – нормальные;  $a_1^{13}$  – допустимые);

$x_2$  – интенсивность эксплуатации оборудования ( $a_2^{11}$  – редко эксплуатируется;  $a_2^{12}$  – регулярно эксплуатируется;  $a_2^{13}$  – часто эксплуатируется);

$x_3$  – время эксплуатации ( $a_3^{11}$  – большой запас наработки;  $a_3^{12}$  – достижение установленной наработки;  $a_3^{13}$  – превышение установленной наработки);

$x_4$  – техническое состояние оборудования ( $a_4^{11}$  – оптимальное;  $a_4^{12}$  – нормальное;

$a_4^{13}$  – допустимое);

$x_5$  – интенсивность потоков отказов ( $a_5^{11}$  – не превышает назначенную производителем норму;  $a_5^{12}$  – допустимая;  $a_5^{13}$  – превышает норму назначенную производителем).

Заданные переменные и их термы позволяют построить матрицу знаний (табл. 1), определяющую наиболее часто возникающие сочетания значений входных переменных для принятия решения при управлении старением оборудования ИР.

Таблица 1

Матрица знаний

Номер входной комбинации значений	Входные переменные					Выходные параметры
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
11	$a_1^{11}$	$a_2^{11}$	$a_3^{11}$	$a_4^{11}$	$a_5^{11}$	$d_1$
12	$a_1^{12}$	$a_2^{11}$	$a_3^{11}$	$a_4^{11}$	$a_5^{11}$	
13	$a_1^{11}$	$a_2^{12}$	$a_3^{11}$	$a_4^{11}$	$a_5^{11}$	
14	$a_1^{11}$	$a_2^{11}$	$a_3^{12}$	$a_4^{11}$	$a_5^{11}$	
15	$a_1^{11}$	$a_2^{11}$	$a_3^{11}$	$a_4^{12}$	$a_5^{11}$	
16	$a_1^{11}$	$a_2^{11}$	$a_3^{11}$	$a_4^{11}$	$a_5^{12}$	
21	$a_1^{12}$	$a_2^{12}$	$a_3^{12}$	$a_4^{12}$	$a_5^{12}$	$d_2$
22	$a_1^{12}$	$a_2^{12}$	$a_3^{11}$	$a_4^{11}$	$a_5^{11}$	
23	$a_1^{12}$	$a_2^{11}$	$a_3^{12}$	$a_4^{11}$	$a_5^{11}$	
24	$a_1^{12}$	$a_2^{11}$	$a_3^{11}$	$a_4^{12}$	$a_5^{11}$	
25	$a_1^{12}$	$a_2^{11}$	$a_3^{11}$	$a_4^{11}$	$a_5^{12}$	
26	$a_1^{11}$	$a_2^{12}$	$a_3^{12}$	$a_4^{11}$	$a_5^{11}$	
27	$a_1^{11}$	$a_2^{12}$	$a_3^{11}$	$a_4^{12}$	$a_5^{11}$	
31	$a_1^{13}$	$a_2^{13}$	$a_3^{13}$	$a_4^{13}$	$a_5^{13}$	$d_3$
32	$a_1^{12}$	$a_2^{13}$	$a_3^{13}$	$a_4^{13}$	$a_5^{13}$	
33	$a_1^{13}$	$a_2^{12}$	$a_3^{13}$	$a_4^{13}$	$a_5^{13}$	

Это позволяет определить систему логических высказываний типа «если – то, иначе», связывающих значения входных переменных  $x_1 \div x_5$  с одним из возможных типов решения, образующих мате-

матическую модель принятия решения о продлении ресурса оборудования (сформировать базу знаний о системе):

$$\begin{aligned}
 & \text{ЕСЛИ } (x_1 = a_1^{11}) \text{ и } (x_2 = a_2^{11}) \text{ и } (x_3 = a_3^{11}) \text{ и } (x_4 = a_4^{11}) \text{ и } (x_5 = a_5^{11}) \\
 & \text{или } (x_1 = a_1^{12}) \text{ и } (x_2 = a_2^{11}) \text{ и } (x_3 = a_3^{11}) \text{ и } (x_4 = a_4^{11}) \text{ и } (x_5 = a_5^{11}) \\
 & \text{или } (x_1 = a_1^{11}) \text{ и } (x_1 = a_1^{12}) \text{ и } (x_3 = a_3^{11}) \text{ и } (x_4 = a_4^{11}) \text{ и } (x_5 = a_5^{11}) \text{ или} \\
 & \quad \dots \text{ или } (x_1 = a_1^{11}) \text{ и } (x_2 = a_2^{11}) \text{ и } (x_3 = a_3^{11}) \text{ и } (x_4 = a_4^{11}) \\
 & \quad \text{и } (x_5 = a_5^{12}), \text{ ТО } y = d_1, \text{ ИНАЧЕ} \\
 & \text{ЕСЛИ } (x_1 = a_1^{12}) \text{ и } (x_2 = a_2^{12}) \text{ и } (x_3 = a_3^{12}) \text{ и } (x_4 = a_4^{12}) \text{ и } (x_5 = a_5^{12}) \\
 & \text{или } (x_1 = a_1^{12}) \text{ и } (x_2 = a_2^{12}) \text{ и } (x_3 = a_3^{11}) \text{ и } (x_4 = a_4^{11}) \text{ и } (x_5 = a_5^{11})
 \end{aligned}$$

или  $(x_1 = a_1^{12})$  и  $(x_1 = a_1^{11})$  и  $(x_3 = a_3^{12})$  и  $(x_4 = a_4^{11})$  и  $(x_5 = a_5^{11})$  или  
 ... или  $(x_1 = a_1^{11})$  и  $(x_2 = a_2^{11})$  и  $(x_3 = a_3^{12})$  и  $(x_4 = a_4^{12})$  и  
 $(x_5 = a_5^{11})$  ТО  $y = d_2$ , ИНАЧЕ  
 ЕСЛИ  $(x_1 = a_1^{13})$  и  $(x_2 = a_2^{13})$  и  $(x_3 = a_3^{13})$  и  $(x_4 = a_4^{13})$  и  $(x_5 = a_5^{13})$   
 или  $(x_1 = a_1^{12})$  и  $(x_2 = a_2^{13})$  и  $(x_3 = a_3^{13})$  и  $(x_4 = a_4^{13})$  и  $(x_5 = a_5^{13})$   
 или  $(x_1 = a_1^{12})$  и  $(x_1 = a_1^{11})$  и  $(x_3 = a_3^{12})$  и  $(x_4 = a_4^{11})$  и  $(x_5 = a_5^{11})$  или  
 ... или  $(x_1 = a_1^{13})$  и  $(x_2 = a_2^{12})$  и  $(x_3 = a_3^{13})$  и  $(x_4 = a_4^{13})$  и  
 $(x_5 = a_5^{13})$  ТО  $y = d_3$ .

Данная математическая модель позволяет при имеющихся параметрах, режимах эксплуатации, характеристиках прибора контроля уровня воды ЭС-1011 принять решение относительно дальнейшей эксплуатации этого прибора. Согласно собранной и обработанной статистической информации применительно к вышеизложенным аспектам, рассматриваемый прибор имеет такие характеристики:

- условия эксплуатации: оптимальные;
- интенсивность эксплуатации оборудования: эксплуатируется редко;
- время эксплуатации: превышение установленной наработки;
- техническое состояние оборудования: оптимальное;
- интенсивность потоков отказов: не превышает назначенную производителем норму.

Подставляя имеющиеся данные в наиболее часто возникающие сочетания значений входных переменных для принятия решения, в систему логических высказываний типа «если – то, иначе», определяем одно из возможных, решений для рассматриваемого прибора:

$$(x_1 = a_1^{11}) \text{ и } (x_1 = a_1^{12}) \text{ и } (x_3 = a_3^{11}) \text{ и } (x_4 = a_4^{11}) \\ \text{ и } (x_5 = a_5^{11}), \text{ то } y = d_1,$$

что означает автоматическое переназначение ресурса не менее чем на половину продолжительности назначенной наработки с учетом фактически наработанных часов.

Проведенный анализ существующих подходов к определению остаточного ресурса и практики функционирования оборудования при помощи модели оценки ресурса на основе анализа интенсивности отказов как функции времени на примере элемента системы СУЗ – прибора контроля уровня воды ЭС-1011, подтверждает правильность принятия решения относительно этого элемента при помощи математической модели на основе теории

нечетких множеств на базе модели идентификации объекта с дискретным выходом.

На основе проведенных исследований была предложена методика СМК «Управление старением оборудования ИР», основными элементами которой являются:

1. Общие положения.
2. Нормативные ссылки.
3. Термины и определения.
4. Классификация оборудования по степени важности для безопасности.
5. Оценка технического состояния, определение необходимости продления ресурса оборудования.
6. Планирование выполнения работ по управлению старением оборудования ИР.
7. Определение возможности переназначения ресурса:
  - 7.1. Определение факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс старения оборудования (экспертная оценки и FMEA-анализ).
  - 7.2. Определение входных переменных  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  при помощи экспертных опросов и FMEA – анализа.
  - 7.3. Определение выходных переменных  $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ .
  - 7.4. Определение шкалы качественных термов для оценки значений заданных лингвистических переменных.
  - 7.5. Построение матрицы знаний об условиях эксплуатации оборудования.
  - 7.6. Определение системы логических высказываний при помощи высказываний типа «если – то, иначе», связывающих значения входных переменных  $x_1 \div x_5$  с одним из возможных типов решения в реальных условиях.
8. Изучение и мониторинг процессов старения элементов.
9. Принятие решения о переназначении сроков эксплуатации устаревающего оборудования.

10. Оценка эффективности управления старением элементов.

11. Формирование плана-графика проведения дальнейших действий по управлению старением оборудования.

### Выводы

1. Эффективное управление таким важнейшим ресурсом процессов СМК как «инфраструктура» является залогом успешного функционирования любого предприятия, но особенно актуально для предприятий оборудование, которых исчерпало установленный проектный срок эксплуатации, в том числе для украинских исследовательских реакторов.

2. Для обеспечения управления инфраструктурой необходима реализация постоянных мероприятий для управления старением, которое включало бы в себя и вопросы по определению остаточного ресурса оборудования в реальных эксплуатационных условиях.

3. Проанализированные методы управления старением и оценки ресурса свидетельствуют о том, что в них не в полной мере учитываются специфические условия эксплуатации отдельных видов оборудования.

4. Проблему обеспечения информацией деятельности по управлению старением позволяет решить база знаний об условиях и режимах эксплуатации оборудования в реальных условиях.

5. Сформирована математическая модель принятия решения по продлению ресурса на основе подходов теории нечеткой логики.

6. Данная математическая модель позволяет при изменяющихся параметрах эксплуатации оборудования создать базу знаний, которая позволит

принимать обоснованные решения относительно дальнейших действий по управлению старением оборудования выработавшего срок эксплуатации.

7. Разработанная математическая модель легла в основу методики «Управление старением оборудования исследовательского реактора».

### Список литературы

1. Острейковский В.А. Физико-статистические модели надежности элементов ЯЭУ / В.А. Острейковский. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

2. Острейковский В.А. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ / В.А. Острейковский, Н.Л. Сальников. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

3. Безопасность атомных станций: Информационные и управляющие системы / [М.А. Ястребенецкий, В.Н. Васильченко, С.В. Виноградская и др.]; под ред. М.А. Ястребенецкого. – К: Техніка, 2004. – 472 с.

4. Сидренко В.А. Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР / В.А. Сидренко. – М.: Атомиздат, 1977. – 216 с.

5. Вероятностный анализ безопасности атомных станций / В.В. Безун, О.В. Горбунов, И.Н. Каденко, Е.Н. Письменный, А.Ю. Зенюк, Л.Л. Литвинский. – К.: Техника, 2000. – 568 с.

6. Лескив А.О. Качество, стандартизация и сертификация: Разработка методики управления старением оборудования ИР-100: квалификационная работа магистра по специальности «Качество, стандартизация и сертификация» / Лескив Анна Олеговна; Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности. – Севастополь, 2011. – 120 с.

Поступила в редколлегию 20.08.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.П. Мачехин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

### РОЗРОБКА МЕТОДИКИ «УПРАВЛІННЯ СТАРІННЯМ ОБЛАДНАННЯ» СИСТЕМИ МЕНЕДЖМЕНТУ ЯКОСТІ ДОСЛІДНИЦЬКОГО РЕАКТОРА

С.Є. Кравцова, Г.О. Лесків

*Управління сучасними підприємствами, у тому числі атомно-енергетичного комплексу, нині все частіше забезпечується впровадженням систем менеджменту якості (СМЯ). Для успішного функціонування СМЯ актуальним є пошук підходів до ефективного управління усіма видами ресурсів, у тому числі таким як «інфраструктура». Це питання є особливо актуальним для АЕС та дослідницьких реакторів з точки зору закінчення проектних термінів експлуатації. Робота присвячена розробці методики управління старінням обладнання на основі застосування інструментів теорії нечіткої логіки.*

**Ключові слова:** дослідницький реактор, система менеджменту якості, інфраструктура, ресурс обладнання, управління старінням, база знань.

### THE DEVELOPMENT OF PROCEDURE «MANAGEMENT OF EQUIPMENT AGEING» OF THE RESEARCH REACTOR QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

S.E. Kravtsova, A.O. Leskiv

*Management of the modern enterprises, including the nuclear-power complex, become more and more often provided by the implementation of quality management systems (QMS) now. It is actual to search for the approaches to the efficient control of all kinds of resources, including such as "infrastructure" for the successful functioning QMS. This question is especially actual for the atomic power station and research reactors because of designed operation terms termination. This work is devoted to the development out of the equipment aging management procedure on the basis of application of the indistinct logic theory tools.*

**Keywords:** the research reactor, a quality management system, an infrastructure, a service life, the management of aging, the knowledge base.