

## **ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА С ДОХОДАМИ ПРИ ПРИНЯТИИ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ В ОТНОШЕНИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» ЧАЭС**

**Ю.В. Волков, А.В. Соболев**

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,  
г. Обнинск*



В работе рассматривается использование марковского процесса с доходами для поиска оптимальных стратегий «поведения» в условиях неопределенности. Предложена методика построения адекватной марковской модели процесса для объектов ядерных технологий на примере объекта «Укрытие» ЧАЭС.

При организации вывода из эксплуатации любого промышленного объекта имеют место мероприятия, которые можно объединить в блок принятия решения о судьбе объекта и способах (стратегиях) его реализации. В настоящее время решения и стратегии их реализации принимаются, зачастую, на основании конъюнктурных и/или политических соображений, а не на основе технико-экономических показателей. Однако такой подход чреват большими экономическими потерями и/или серьезными нарушениями требований безопасности. В этой статье рассматриваются только случаи, когда вопрос о судьбе объекта решается в связи с его техническим состоянием, и решения изолированы от субъективного влияния.

В рамках рассматриваемого вопроса целесообразно изучать процессы изменения технического состояния объектов (процессы переходов), а не технические состояния. Такой подход позволяет оценить эффективность предпринимаемых действий с экономической точки зрения. Перевод технической системы из состояния  $i$  с характерными для него техническими и/или экономическими показателями в состояние  $j$ , характеризующееся иными значениями технико-экономических показателей, сопровождается некоторыми затратами  $r_{ij}$ , связанными с привлечением рабочей силы для выполнения некоторых необходимых комплексов работ, с необходимостью разработки технической документации, проведением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, затрат на приобретение и/или изготовление необходимых материалов и оборудования. В зависимости от полноты информации и требуемой точности, затраты  $r_{ij}$  могут быть выражены в единицах трудозатрат или дозозатрат, денежных единицах и др.

---

© Ю.В. Волков, А.В. Соболев, 2007

Процесс изменения состояния системы характеризуется не только соответствующими ему затратами  $r_{ij}$ , но и вероятностью успешной реализации  $p_{ij}$ , т.е. вероятностью достижения ожидаемого результата. Таким образом, при изучении именно процессов переходов системы между состояниями, в рассмотрение включаются ситуации, при которых нет абсолютной уверенности в том, что предпринимаемые меры приведут к ожидаемому результату, т.е. в условиях неопределенности.

Под состоянием здесь и далее понимается техническое состояние объекта/системы с характерным набором технических показателей и их значений, предполагается, что число состояний  $n$  конечно. Под переходом понимается процесс перехода/изменения из состояния  $i$  в состояние  $j$  (по сути, процесс изменения набора технических показателей, характеризующих систему и/или их значений), с характерными для него значениями вероятности перехода  $p_{ij}$  и сопровождающих его затрат  $r_{ij}$ . Под стратегиями будем понимать возможные несколько вариантов переходов из состояния  $i$  в состояние  $j$  с разными значениями вероятностей переходов  $p_{ij}^l$  и  $p_{ij}^m$  и сопровождающих их затрат  $r_{ij}^l$  и  $r_{ij}^m$ . Количество стратегий, так же, как и количество состояний, является конечным числом.

Таким образом процесс изменения состояния системы во времени можно охарактеризовать посредством двух трехмерных матриц, матрицы вероятностей переходов  $P$  и матрицы затрат (доходов)  $R$ .

Пусть решение (выбор стратегии поведения) принимается для каждого возможного состояния из соображений оптимальности, и вероятность перехода  $i \rightarrow j$  не зависят от того, как система попала в состояние  $i$ , а определяется только индексами перехода и набором возможных стратегий. Тогда, согласно [1], процесс перехода системы между состояниями есть марковский процесс, поведение которого при выбранной стратегии  $k$  из множества стратегий  $K$  определяется матрицей переходов  $P^k = \{p_{ij}^k\}$  ( $i, j=1, N$ ). Эта матрица называется стохастической, поскольку ее элементы удовлетворяют условию

$$\sum_{j=1}^N p_{ij}^k = 1.$$

Таким образом, для описания поведения системы при принятии решений в процессе эволюции объекта можно применить модель марковского процесса с доходами [1].

В теории марковских процессов с доходами широко используются понятия *непосредственно ожидаемый доход*

$$q_i^k = \sum_{j=1}^N p_{ij}^k \cdot r_{ij}^k, \quad (1)$$

прибыль системы

$$g^k = \sum_{i=1}^N \pi_i^k \cdot q_i^k,$$

где  $\pi_i^k$  – предельная вероятность состояния  $i$  для  $k$ -ой стратегии.

В работе [1], с использованием введенных параметров, предложена итерационная процедура, изображенная на рис. 1, позволяющая определять оптимальные стратегии (максимизирующие средний ожидаемый доход при большом количестве переходов) для всех рассматриваемых состояний системы.

Процедура состоит из двух блоков: блок определения весов, где определяется значения параметра  $v_j$  – вес; блок улучшения решения, где выполняется максимизация критерия  $\omega$ . Цикл останавливается, когда решение не улучшается. Под решением понимается вектор (вектор-решение), в котором каждому состоянию ставится в соот-

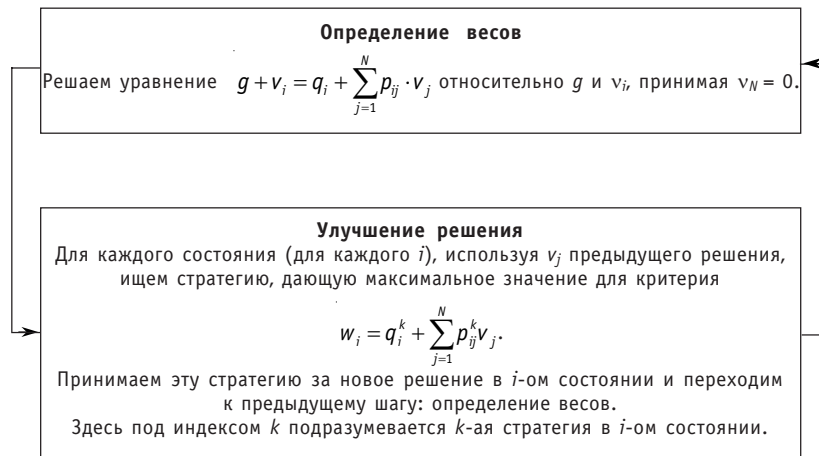


Рис. 1. Итерационная процедура определения оптимального решения

ветствие оптимальная стратегия для этого состояния. Так, цикл, изображенный на рис.1, останавливается тогда, когда вектора-решения, полученные в двух соседних итерациях, одинаковы.

Для построения марковской модели процесса изменения состояний системы необходимо:

- правильно сформулировать состояния системы; в случае неудачного соотнесения модель будет давать ложные результаты и ошибка выявится после проведения большого объема работы;
- сформулировать набор стратегий для каждого состояния и определиться с их трактовкой;
- заполнить матрицы **P** и **R** в соответствии с введенными состояниями и стратегиями.

Остановимся несколько подробнее на пункте формирования матрицы доходов **R**. Поскольку получить точные данные по затратам для всех переходов реальных систем почти невозможно, представляется целесообразным выделять элементарные/основные составляющие для элементов матриц расходов. Использование такого подхода позволяет построить более или менее адекватную модель данной системы.

Рассмотрим пример применения марковской модели с доходами для поиска оптимальной стратегии при принятии решений по объекту «Укрытие» 4 блока ЧАЭС. Несмотря на то, что существует большое количество проектов, предлагающих в той или иной мере решить проблему ликвидации последствий аварии 1986–1987 гг., большинство из них можно свести к нескольким принципиальным схемам инженерных решений. В качестве принципиальных схем решения проблемы могут быть представлены следующие: демонтаж объекта «Укрытие», захоронение части загрязненного оборудования и возведения нового укрытия; вариант «Зеленая лужайка»; возведение над существующим объектом еще одного укрытия.

Основываясь на материалах [2, 3] и принципиальных схемах были сформулированы следующие состояния:

- «первоначальное» – под которым подразумевается состояние объекта (системы) на момент устройства объекта «Укрытие» 1986–1987гг.;
- «разгерметизация» – под которым подразумевается обрушение части несущих и/или локализирующих конструкций (например, таких как «легкая кровля»); пребывание в этом состоянии или переход в него сопровождается выбросом в окружающую среду радиоактивной пыли и других источников радиационного загрязнения (негерметичность существующего защитного сооружения не включается в это состояние, поскольку она предусматривалась в проекте);

• «усовершенствованное» – под которым подразумевается усовершенствование изначального объекта (без его демонтажа) в сторону улучшения технических характеристик; в качестве примера такого усовершенствования может служить проект [4], в котором предлагается стабилизация аварийных плит перекрытия на отметке +38,600 м деаэрационной этажерки в осях 41–49 путем установки под них дополнительных металлических опор;

• «новый саркофаг» – устройство нового саркофага, превосходящего по своим техническим характеристикам существующий (примером такого состояния может служить проект «Укрытие-2»); стоит отметить, что возведение объекта идентичного существующему будет относиться к состоянию «первоначальное».

Под стратегиями в рассматриваемом примере понимаются мероприятия, направленные на изменение технического состояния объекта.

По материалам [2, 3] были сформулированы следующие стратегии:

• «ничего не делать» – эта стратегия поведения подразумевает отсутствие каких-либо мероприятий, направленных на улучшение технических характеристик системы;

• «латать» – мероприятия, направленные на улучшение технического состояния системы, созвучны названию стратегии (примером таких мероприятий может служить покрытие всех или части загрязненных поверхностей 4 энергоблока слоем тяжелого бетона/железобетона);

• «надстроить новый» – мероприятия, направленные на улучшение технического состояния для этой стратегии могут заключаться не только в надстройке нового саркофага, но и в возведении железобетонной стены над центральным развалом реакторного отделения с открывающимися проемами для доступа дистанционно управляемых механизмов и подобных мероприятий;

• «старый сломать и построить новый» – мероприятия, направленные на улучшение технического состояния для этой стратегии, могут заключаться также в демонтаже части конструкций и установке новых, возможно улучшающих технические характеристики системы в целом.

Стратегия, состоящая в реализации работ по ликвидации 4 блока ЧАЭС, аналогичная американскому проекту «Зеленая лужайка», здесь не рассмотрена, поскольку эти работы являются чрезвычайно дорогостоящими, и в них нет острой необходимости.

Матрица расходов была разбита на элементарные/основные составляющие, как представлено в табл. 1, что позволило упростить процесс ее формирования и построить правдоподобную модель.

Значения элементарных составляющих матрицы расходов для каждой стратегии определялись на основе материалов [2,3] и исходя из здравого смысла. В общем случае эти значения должны определяться на основании результатов экспертного

Таблица 1

#### Элементарные составляющие для матрицы расходов

	Первоначальное	Разгерметизация	Усовершенствованное	Новый саркофаг
Первоначальное	Эксплуатация	Пылеподавление	Пылеподавление +усовершенствование	Строительство + пылеподавление
Разгерметизация	Эксплуатация + восстановление	Пылеподавление + эксплуатация	Пылеподавление +усовершенствование + восстановление	Строительство + пылеподавление + восстановление
Усовершенствованное	Эксплуатация	Пылеподавление	Усовершенствование	Строительство + усовершенствование
Новый саркофаг	Эксплуатация	Пылеподавление	Усовершенствование	Строительство

опроса, в процессе которого эксперты дают оценки после ознакомления с технической документацией по существующим проектам, направленным на разрешения рассматриваемой проблемы.

Касательно формирования стохастической матрицы **P**, то, пожалуй, единственной возможностью определить значения вероятностей переходов является экспертный опрос. Оценки экспертов не должны противоречить в этом случае следующим соображениям:

- если что-то предпринимается, то вероятности того, что ситуация по крайней мере не ухудшится, должны быть выше, чем вероятности ухудшения (иначе работа становится бессмысленной);
- переход к заявленной (ожидаемой) цели (состоянию) должен быть более вероятен, чем к другому, даже лучшему, чем исходное, состоянию.

В табл. 2 представлена сводная таблица марковской модели объекта «Укрытие» 4 энергоблока ЧАЭС. В разделе «Доходы» содержатся данные по затратам в процентах от максимального значения затрат соответствующих переходу из состояния «разгерметизация» в состояние «новый саркофаг» для стратегии «Старый сломать и построить новый», и составляющих в единицах трудозатрат 188832 чел-год.

Результаты расчета итерационным методом по построенной марковской модели представлены в табл. 3. Необходимо отдельно отметить, что для реализации такого

Таблица 2

**Сводная таблица марковской модели системы саркофаг 4 энергоблока ЧАЭС**

Название состояния	Стратегии	Вероятности переходов				Доходы			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Первоначальное (1)	1. Ничего не делать	0,3	0,7	0	0	-0,011	-1,32	0	0
	2. Латать	0,8	0,15	0,05	0	-0,021	-9,46	-19,1	0
Разгерметизация (2)	1. Ничего не делать	0,4	0,6	0	0	-15,5	-1,32	0	0
	2. Латать	0,8	0,1	0,1	0	-2,93	-9,46	-22,0	0
	3. Над старым построить новый	0,2	0,1	0,2	0,5	-3,88	-9,94	-19,6	-33,2
	4. Старый сломать и построить новый	0,2	0,1	0,3	0,4	-6,66	-26,9	-43,5	-100
Усовершенствованное (3)	1. Ничего не делать	0,25	0,15	0,6	0	-0,011	-1,32	-11,6	0
	2. Латать	0,2	0,1	0,7	0	-0,021	-9,46	-9,68	0
	3. Над старым построить новый	0,05	0,05	0,2	0,7	-0,011	-9,94	-5,81	-25,2
	4. Старый сломать и построить новый	0,1	0,1	0,3	0,5	-0,011	-26,9	-9,97	-76,4
Новый саркофаг (4)	1. Ничего не делать	0,3	0,1	0,2	0,4	-0,011	-1,32	-11,6	-19,4
	2. Латать	0,05	0,05	0,3	0,6	-0,021	-9,46	-9,68	-19,4

Таблица 3

**Результат итерационного расчета**

Состояние	Стратегия	Доход $q$	Доход $g$	$v$	Решение
состояние №1	ничего не делать	-0,927	-3,39	12,13	ничего не делать
состояние №1	латать	-2,39	-3,39	12,06	
состояние №2	ничего не делать	-6,99	-3,39	6,41	
состояние №2	надстроить новый	-22,28	-3,39	-17,02	
состояние №2	латать	-5,49	-3,39	8,60	латать
состояние №2	старый сломать и построить новый	-57,07	-3,39	-51,34	
состояние №3	ничего не делать	-7,17	-3,39	1,37	ничего не делать
состояние №3	надстроить новый	-19,28	-3,39	-16,05	
состояние №3	латать	-7,73	-3,39	0,09	
состояние №3	старый сломать и строить	-44,10	-3,39	-39,08	
состояние №4	ничего не делать	-10,20	-3,39	-3,39	ничего не делать
состояние №4	латать	-15,00	-3,39	-12,19	

типа расчетов был создан программный код, позволяющий анализировать марковские модели с доходами с произвольным целым числом состояний и стратегий.

На основании полученных данных можно полагать, что оптимальными, с точки зрения минимизации трудозатрат, при проведении работ с объектом «Укрытие» для сформулированных исходных данных, являются следующие стратегии:

- для состояния «первоначальное» – стратегия «ничего не делать»;
- для состояния «разгерметизация» – стратегия «латать»;
- для состояния «усовершенствованное» – стратегия «ничего не делать»;
- для состояния «новый саркофаг» – стратегия «ничего не делать».

Видим, что такая линия поведения вполне разумна, т.к. только чрезмерная разгерметизация объекта должна инициировать определенные затраты, но они должны быть минимальными.

Необходимо отметить, что при формировании матрицы доходов (затрат) учтены только трудозатраты на обслуживание, ремонт или на проведение демонтажа оборудования и разборку строительных конструкций старого саркофага с учетом дозовых нагрузок на персонал, а также на строительство и обслуживание нового саркофага. Возможно, если бы были учтены еще какие-нибудь дополнительные факторы, результат бы изменился. Результаты анализа ситуации с объектом «Укрытие» могут также изменяться в зависимости

- от данных новых радиационных разведок;
- от выбранных методов выполнения работ с учетом последних достижений науки и техники;
- от эффективности работ по дезактивации и пылеподавлению;
- от более детального и подробного рассмотрения существующих проектов решений ситуации на 4-ом блоке ЧАЭС;
- от использования иных методик определения вероятностей переходов.

Результаты анализа в рассмотренном примере достаточно устойчивы к изменчивости исходных данных. Например, 7-кратное уменьшение исходных данных по «Объемам работ по локализации и пылеподавлению»[2] приводит к смене стратегии «ни-

чего не делать» в состоянии «первоначальное» на стратегию «латать», а все остальные стратегии, определенные как оптимальные, остаются неизменными.

**Литература**

1. Ховард Р.А. Динамическое программирование и марковские процессы. – М.: Советское радио, 1964.
2. Техничко-экономическое обоснование создания объекта «Укрытие-2». Механомонтажные и специальные работы/Документ № ТМ 38.686.00 ПЗ – НИКИМТ, 1990г.
3. «Укрытие-2». Техничко-экономическое обоснование/Инв. № ЧБ-90-Т-1352 – ОРГСТРОЙНИ-ИПРОЕКТ, 1990г.
4. УПКИ «АТОМЭНЕРГОБУДПРОЕКТ»: План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие». Стабилизационные мероприятия. Услуги, оборудование и материалы/Контракт SIP 07-1-001-02, Мероприятие № 3С. Проект производства работ, SIP CON 02 WEP-CP 005 00, 534-03-00-ППР, 2004.

Поступила в редакцию 15.12.2006



## ABSTRACTS OF THE PAPERS

---

### **УДК 621.039.546**

*Example of Application Markovs Process with Incomes at Acceptance of Engineering Decisions Concerning Objects of Nuclear Technologies in Conditions of Uncertainty on an Example of Object «Shelter» Chernobyl NPP\ Yu. V. Volkov, A. V. Sobolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 3 tables, 1 illustration. – References – 4 titles.*

Application of markovs process with incomes for search of optimum strategy of «behavior» in conditions of uncertainty is considered. The technique of construction adequate markov is offered to model of process for objects of nuclear technologies, on an example of object «Shelter» Chernobyl NPP.

### **УДК 621.039.58**

*NPP Equipment Life Time Prediction Methods\ O.M. Gulina, N.L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 3 tables, 4 illustrations. – References – 4 titles.*

Its shown that problem of NPP equipment life time prediction is based on the estimation of moment the parameter observed or calculated achieves limited level. There are considered some mathematical models for different kinds of degradation processes and information obtained. Some results are presented.

### **УДК 621.039.58**

*Method for Processing of Statistical Data on Equipment Reliability During NPP Operation\ S.P. Saakian, V.A. Ostreikovskiy, V.A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 6 illustrations. – References – 3 titles.*

The records of failures during NPP operation are one of the highest importance for determination of NPP equipment reliability performance. These records however due to objective and subjective reasons are no more than the homogeneous stream of events, the fact that brings difficulties into the process of calculating the equipment reliability characteristics. The given paper proposes the new methods of data handling for heterogeneous stream of statistical data on equipment failures which gives the possibility of getting more truthful information about NPP equipment and systems reliability performance.

### **УДК 621.039.58**

*The Residual Life Time Estimation for the Nonrestorable Elements of the RBMK-1000 PCS Electrical Equipment of the Smolensk NPP's First Power Unit\ S.V. Sokolov, A.V. Antonov, V.A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References – 3 titles.*

In the paper the statistical methods of residual life time estimation for nuclear power plants' (NPP) electrical equipment are considered. The mathematical model of the reliability characteristics calculation for the nonrestorable elements is given. The results of the residual life time calculations for elements of the protection control system's electrical equipment are represented in the paper. As a basis for calculation the statistical data about failures of the RBMK-1000 protection control system equipment of the Smolensk NPP's first power unit were used.

### **УДК 621.039.5**

*Application of PSA for NPPs with VVER-type Reactors of New Generation under Design\ G.V. Tokmachev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages. – References – 20 titles.*

The paper discusses the use of probabilistic safety assessments (PSA) to support design evaluation for a new generation of advanced nuclear power plants with VVER-type reactors. The concept of the new VVER plants is briefly described. The design solutions to improve safety, which are based on in-depth principles and results of PSAs performed for operating VVER plants, are characterized. The evaluation whether the advanced VVER plant design meets deterministic principles is performed at a qualitative level using the PSA results. The approach to quantitative assessment of safety of the NPPs in design is described that is based on the PSA results.

### **УДК 621.039.524**

*Technical and Numerical Substantiation of Procedures Preventing Accident at VVER-1000 Based NPP\ A.N. Shkarovskiy, V.I. Aksenov, A.P. Kolevatykh, N.P. Serdun, A.A. Roslyakov; Editorial board of journal «Izvestia*