

УДК 519.873:519.872

Н.А. СКАТКОВА, А.В. ТАРАСОВА, С.Б. ЮШКИНА

Севастопольский национальный технический университет, Украина

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГАРАНТОСПОСОБНОСТИ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Рассмотрена проблема моделирования процессов утилизации отработанного ядерного топлива. Предлагаемая модель является двойственной и может быть рассмотрена как в виде стационарной, так и в виде нестационарной одноканальной системы массового обслуживания, что обеспечивает дивергентность подхода к повышению её гарантоспособности. Проведена оценка системных свойств гарантоспособности в основных режимах. Представлены графические результаты сравнения абсолютных погрешностей для нестационарного и стационарного режимов работы при различных интенсивностях поступления и обслуживания заявок.

Ключевые слова: гарантоспособность модели, дивергентность, стационарные и нестационарные СМО, модель процесса переработки ОЯТ.

Введение

Потребности человечества в электроэнергии увеличиваются с каждым годом. По прогнозам экспертов, к 2050 году мировое потребление электричества возрастет на 160%. При этом все возрастающая озабоченность глобальным потеплением может привести к жесткому регулированию выбросов парниковых газов. Электростанции, работающие на природном газе, выделяют наименьшее количество углекислого газа, но цены на газ возрастают и являются нестабильными. Цены на уголь относительно невысоки и довольно стабильны, но при его использовании электростанциями в атмосферу выбрасываются огромные объемы углекислого газа. Установка оборудования для улавливания вредных выбросов и строительство хранилищ для их хранения сопряжены со значительными капиталовложениями, что приведет к росту цен на электроэнергию от электростанций, работающих на газе и угле.

Данная проблема может быть решена при использовании ядерной энергии. На сегодняшний день доля ядерной энергии в мировом потреблении электроэнергии составляет одну шестую часть и представляет собой важнейший источник безуглеродной энергии, а строительство новых АЭС может удовлетворить потребности в электроэнергии в будущем [1]. Однако при переходе на ядерную энергетику возникают две серьезные проблемы: обеспечение безопасности и радиоактивные отходы (РАО).

1. Системный анализ проблемы утилизации радиоактивных отходов

На сегодняшний день кардинального решения проблемы РАО не существует. Можно выделить два

основных направления работы с РАО: захоронение и переработка. При захоронении стоит вопрос об обеспечении долговременного и надежного хранения отходов, который также не решен. Потому практически все используемые сегодня для захоронения РАО могильники являются временными хранилищами, и в будущем необходимо будет решать проблему, что делать дальше с хранящимися в них отходами.

Другая концепция обращения с РАО – это их переработка, касающаяся высокоактивных отходов, а именно – отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Отработанное топливо содержит в своем составе до 1% делящегося изотопа U^{235} и несколько меньшее количество плутония. Его переработка позволяет сохранить до 30% природного урана. Следует отметить, что переработка ОЯТ является составной частью так называемого закрытого топливного цикла. В атомной энергетике различают два подхода в использовании ядерного топлива: закрытый и открытый ядерные топливные циклы. В открытом ядерном цикле топливо сжигается в реакторе однократно, образующиеся после этого ядерные отходы отправляются на захоронение в могильники. Такого прямого подхода в работе с ядерным топливом придерживаются, например, США и Швеция.

В закрытом топливном цикле (принят в Великобритании, Франции, Германии, Японии, России) из отработанного топлива химическим путем извлекаются уран и плутоний, которые, после дообогащения, повторно используются в качестве топлива для АЭС (рис. 1).

После извлечения из реактора и предварительного охлаждения в так называемых «бассейнах выдержки», отработанное ОЯТ (ТВЭЛы – тепло выделяющие элементы) отправляется на завод по переработке.

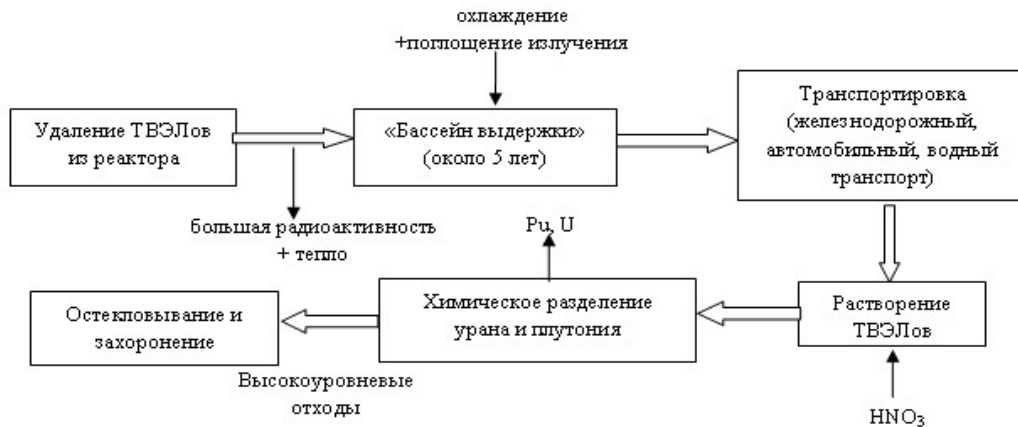


Рис. 1. Производственный цикл по переработке ОЯТ

Транспортировка ОЯТ и других высокоуровневых отходов осуществляется водным, автомобильным и железнодорожным транспортом и достаточно жестко регламентируется.

Сам процесс переработки начинается с растворения механически измельченных ТВЭЛов в азотной кислоте. Далее производится химическое разделение урана и плутония с их последующим возвратом в начало топливного цикла: плутоний непосредственно на предприятия по изготовлению ядерного топлива, а уран – на конверсионный завод для дообогащения. Оставшаяся после удаления урана и плутония жидкость представляет собой высокоуровневые отходы, содержащие около 3% ОЯТ. Уровень радиации таких отходов по-прежнему очень высок и они продолжают выделять большое количество тепла. Такие отходы остекловывают (процесс витрификации) и закладывают на промежуточное хранение с последующим долговременным размещением в могильниках.

2. Диверсный подход к повышению гарантийности моделирования

Каков бы ни был цикл переработки, ОЯТ относится к высокоактивным радиоактивным отходам, потому все действия с ним жестко регламентируются и контролируются. Требуется обеспечение безопасности как с точки зрения отсутствия контакта ОЯТ с окружающей средой (для этого используются специальные контейнеры с несколькими защитными барьерами), так и с точки зрения технологического процесса.

Процесс функционирования завода по переработке ОЯТ может быть представлен системой массового обслуживания (СМО) (рис. 2).



Рис. 2. Завод по переработке как СМО

Для такой системы входной поток заявок будет составлять поступающие на завод отработанные ТВЭЛы, а выходной – остеклованные высокоуровневые отходы, а также плутоний и уран для вторичного использования. Сам завод в этом случае является обслуживающим прибором, а поступающие на обслуживание контейнеры с отработанными ТВЭЛами – заявками на обслуживание.

Гарантоспособность [2] такой системы играет немаловажную роль. Для ее повышения может быть применен диверсный подход к рассмотрению модели поступления заявок в систему. Диверсность заключается в рассмотрении модели как с точки зрения стационарной, так и с точки зрения нестационарной одноканальной системы СМО.

2.1. Представление модели системы в виде стационарной одноканальной СМО

Все АЭС, как и заводы по переработке ОЯТ, являются государственными предприятиями, потому ведется жесткий учет всех изымаемых из обращения и поступающих на переработку ТВЭЛов. За каждым заводом по переработке закреплен ряд АЭС, с которых поступает ОЯТ. Срок выемки ТВЭЛов из реакторов также определен, он зависит от глубины выгорания топлива. Срок службы ТВЭЛов составляет около трех лет. После пятилетней выдержки с целью охлаждения ОЯТ отправляют на переработку. Если такой технологический процесс обеспечивается в полной мере, то частота поступления на завод по переработке отработанных ТВЭЛов с каждой конкретной АЭС составляет 3 года. В результате оценки имеющихся данных входной поток заявок можно считать стационарным. При отсутствии сбоев в процессе переработки ОЯТ на самом заводе, время обслуживания заявок будет постоянным. Поэтому при первом приближении завод по переработке ОЯТ может быть рассмотрен как одноканальная стационарная СМО.

Аналогичные одноканальные стационарные СМО представлены во многих литературных источ-

никах, например, [3, 4], разработаны различные типы моделей для их описания, методы вычисления параметров и характеристик, потому детально эта модель нами рассматриваться не будет. В последующем модель можно уточнить за счет введения в рассмотрение нестационарности двух видов: переменные интенсивность входного потока и время обработки.

2.2. Представление модели системы в виде нестационарной одноканальной СМО

Рассмотрение описываемой системы только в условиях стационарности приводит к серьезным системным ошибкам в процессе принятия решений. Причинами нарушения стационарности являются сбои в технологическом процессе переработки, аварийные ситуации, возможные транспортные проблемы, человеческий фактор, различное время работы ТВЭЛов, и, как следствие, разное время их замены, и т.д. Потому более адекватным является представление завод по переработки ОЯТ в виде одноканальной нестационарной СМО. Источниками нестационарности являются переменные значения интенсивностей поступления и обслуживания заявок. Подобную систему предлагается описать следующим образом.

На вход системы последовательно поступает N заданий (заявок, запросов). Распределения временных интервалов между моментами поступления заданий описываются экспоненциальными законами с интенсивностями, зависящими от номера задания, $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$ соответственно. Закон распределения времени обслуживания – экспоненциальный с интенсивностями, зависящими от номера поступающей заявки, $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N\}$ соответственно. Состояния системы в каждый момент времени можно охарактеризовать числом находящихся в системе запросов i ($i=0, N$) и числом запросов, получивших обслуживание в системе, j ($j=0, N-i$). Вероятности пребывания системы в этих состояниях обозначим через $P_{i,j}(t)$. Представим описанную систему обслуживания марковской цепью с дискретным множеством состояний и непрерывным временем.

Номер состояния кодируется как <Номер строки – число находящихся в системе запросов>, <Номер столбца – число запросов, получивших обслуживание в системе>. Изначально система находится в состоянии (0,0). Затем на вход системы поступает заявка и происходит переход в состояние (1,0). Если в следующий момент времени на вход системы поступит еще одна заявка, то система перейдет в состояние (2,0). Если же новая заявка не поступит, то начнется выполнение текущей заявки и система перейдет в состояний (0,1) – заявок в системе нет, 1 заявка уже выполнена. Диаграмма переходов между состояниями системы показана на рис. 3.

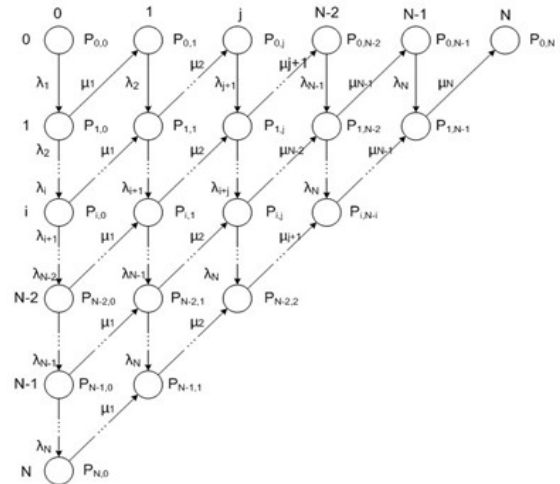


Рис. 3. Граф состояний и переходов системы

Число состояний системы можно рассчитать как

$$N_c = \sum_{k=1}^{k=N+1} k. \tag{1}$$

Чтобы найти значения вероятностей нахождения системы в каждом из состояний, необходимо решить относительно $P_{i,j}(t)$ систему дифференциальных уравнений Колмогорова, i, j -ое уравнение которой в общем виде может быть представлено как

$$\frac{dP_{i,j}}{dt} = \delta(i)(P_{i-1,j}\lambda_{i+j} - P_{i,j}\mu_{j+1}) + \delta(j)P_{i+1,j-1}\mu_j - \delta(N-i-j)P_{i,j}\lambda_{i+j+1}, \tag{2}$$

где $\delta(x)$ – функция Хевисайда.

Для определения значений вероятностей нахождения системы в состояниях i, j необходимо решить относительно $P_{i,j}(t)$ систему дифференциальных уравнений (2) при следующих начальных условиях: $P_{i,j}(0)=1$, если $i+j=0$ и $P_{i,j}(0)=0$ в остальных случаях.

Систему дифференциальных уравнений можно решать различными способами, например, с помощью метода Рунге-Кутты, достоинством которого является простота его программной реализации.

2.3. Оценка системных свойств гарантоспособности при стационарном и нестационарном режимах

Реализация системы на основе описанных подходов требует специальной подсистемы распознавания ситуаций, цель которой дать лицу, принимающему решение (ЛПР), информацию о необходимости смены режима работы модели. В простейшем случае принятие решения о смене версии можно выполнить на основе анализа тенденции изменения расхождения между результатами, получаемыми в процессе использования разных версий модели. При работе СМО в течение относительно небольших промежутков времени характерны переходные процессы, которые существенно изменяют характеристики оценок функционирования системы по сравнению с теми, что могут быть

получены при условиях стационарности. Оценим влияние нестационарности на вероятности пребывания системы в выделенных состояниях. Для этого введем в рассмотрение элементарный граф (рис. 4) как фрагмент графа, представленного на рис. 3.

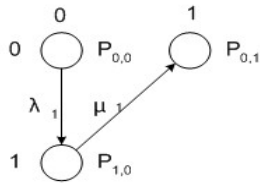


Рис. 4. Элементарный граф состояний и переходов системы

Запишем уравнения вида (2) для данной системы:

$$\begin{cases} \frac{dP_{0,0}(t)}{dt} = -P_{0,0}(t)\lambda_1; \\ \frac{dP_{1,0}(t)}{dt} = P_{0,0}(t)\lambda_1 - P_{1,0}(t)\mu_1; \\ \frac{dP_{0,1}(t)}{dt} = P_{1,0}(t)\mu_1. \end{cases} \quad (3)$$

После решения системы для стационарного процесса можно получить следующие вероятности состояний, которые не зависят от t и являются постоянными: $P_{0,0} = 0$, $P_{1,0} = 0$, $P_{0,1} = 1$. Как видно, полученные вероятности состояний совпадают с начальными условиями.

Однако если система работает в нестационарном режиме, независимо от значений λ и μ , нельзя адекватно оценить влияние нестационарности на вероятности состояний системы. Заменим состояния

$S_{0,0}$ и $S_{0,1}$ на одно объединенное состояние S_0 и будем считать, что номер состояния является кодом заявок в системе. Такая система имеет два состояния.

Вероятность нахождения стационарной системы в состоянии S_0 совпадает по смыслу с суммой вероятностей нахождения нестационарной системы в состояниях $S_{0,0}$ и $S_{0,1}$. вероятности нахождения в состояниях S_0 и S_1 соответственно P_0^c и P_1^c для стационарного случая и P_0^{nc} и P_1^{nc} для нестационарного случая.

Из уравнений Колмогорова для данной системы следует:

$$\begin{cases} \lambda_1 P_0^{nc} = \mu_1 P_1^{nc}; \\ P_0^{nc} + P_1^{nc} = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Решив систему (4) и сравнив значения основных параметров функционирования модели для неустановившегося и стационарного режимов работы, получим абсолютные погрешности:

$$M_i = |P_i^c - P_i^{nc}|. \quad (5)$$

Для оценки расхождения между результатами, получаемыми в зависимости от применяемой версии модели, введем коэффициент диверсности:

$$\Delta M_i = \frac{M_i}{P_i^c}, \quad (6)$$

который характеризует расхождение между версиями.

Графики зависимостей коэффициента диверсности при различных интенсивностях поступления и обслуживания заявок от времени, полученные с помощью системы Mathcad, представлены на рис. 5.

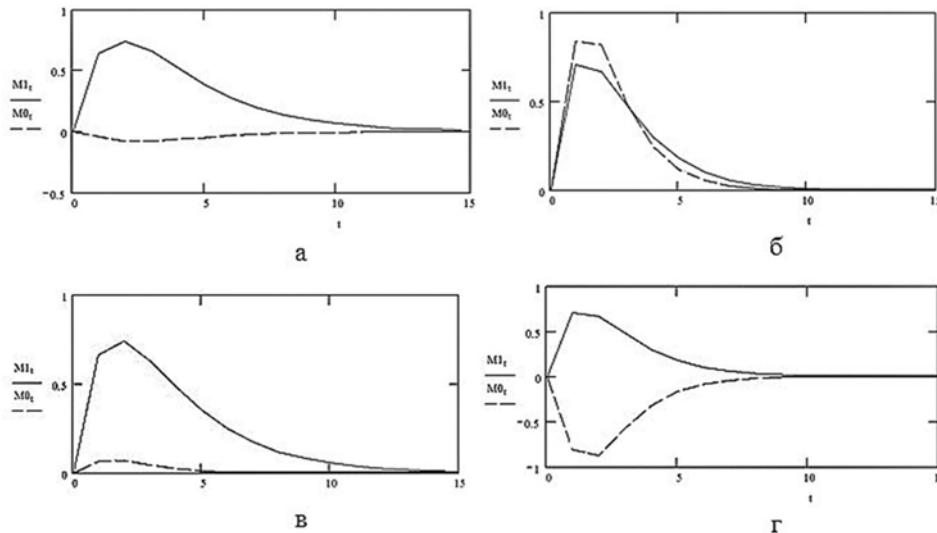


Рис. 5. Графики зависимостей коэффициента диверсности при различных интенсивностях поступления и обслуживания заявок от времени

Анализ модели показал, что при малом времени работы системы применение формул для стационарного режима ведет к погрешностям, величина которых возрастает с уменьшением времени. Если же продолжительность процесса достаточно велика,

то погрешности, связанные с использованием стационарной модели, станут практически неразличимыми.

На основании этого может быть принято решение о смене модели.

Заключення

Предложенные модели соответствуют принципу диверсности и построены в предположении, что входной поток заявок и времена их обслуживания в общем случае могут не соответствовать стационарности. Её отличительной особенностью является регулярная структура, представленная графом состояний и переходов (рис.2). Исследование системы при различных значениях интенсивности входного потока и обслуживания заявок показало, что на больших интервалах времени её работы коэффициент диверсности приближается к нулю, что дает основания для перехода к стационарной модели как к более простой. При малом же времени работы наблюдается резкое возрастание коэффициента диверсности, что дает основания для принятия решения о смене модели. Совместное применение этих двух подходов обеспечивает реализацию принципа диверсности как средства повышения гаранто-способности рассматриваемой модели в целом.

Направлениями дальнейших исследований являются анализ устойчивости полученных решений и построение адекватных моделей при разнотемповом входном потоке.

Литература

1. Дойч Д. Ядерный вариант / Д. Дойч, Э. Мониц // В мире науки. – 2007. – № 1. – С. 45-51.
2. Бахмач Е.С. Отказобезопасные информационно-управляющие системы на программируемой логике / Е.С. Бахмач, А.Д. Герасименко, В.А. Головир и др.; под ред. В.С. Харченко, В.В. Скляра. – Х.: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ»; Кировоград: НПО «Радий», 2008. – 380 с.
3. Новиков О.А. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. / О.А. Новиков, С.И. Петухов. – М.: Сов. радио, 1969. – 400 с.
4. Ларіонов Ю.І. Дослідження операцій. Частина II: Навчальний посібник. / Ю.І. Ларіонов, Л.С. Марченко, М.А. Хажмурадов. – Х.: ВД «ИНЖЕУК», 2005. – 288 с.

Поступила в редакцию 20.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой В.Я. Копп, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

Н.О. Скаткова, Г.В. Тарасова, С.Б. Юшкіна

Розглянуто проблему моделювання процесів утилізації відпрацьованого ядерного палива. Пропонована модель є подвійною і може бути розглянута як у вигляді стаціонарної, так і у вигляді нестаціонарної одно-канальної системи масового обслуговування, що забезпечує диверсність підходу до підвищення її гарантоздатності. Проведено оцінку системних властивостей гарантоздатності в основних режимах. Представлено графічні результати порівняння абсолютних погрешностей для нестаціонарного й стаціонарного режимів роботи при різних інтенсивностях надходження й обслуговування заявок.

Ключові слова: гарантоздатність моделі, диверсність, стаціонарні та нестаціонарні СМО, модель процесу переробки ВЯП

PROVIDENCE OF DEPENDABILITY OF UTILIZATION PROCESS MODEL OF SPENT FEUL

N.A. Skatkova, A.V. Tarasova, S.B. Yshkina

The problem of utilization process modeling of spent fuel is observed. Proposed model is dual and can be concerned as stationary as well as nonstationary single-channel mass queuing which provides diversity of approach to the rise of its dependability. Estimation of system features of dependability in common routine is conducted. Graphical figures of absolute inaccuracies comparison for nonstable and stationary modes of work under different activities of receipt and service of applications are represented.

Key words: model dependability, stationary and nonstationary SMS, model of fulfilled nuclear fuel reprocessing.

Скаткова Наталья Александровна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри кібернетики і вичислительной техники Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина, e-mail: kvt@sevgtu.sebastopol.ua.

Тарасова Анна Владимировна – студентка 5 курса факультета автоматики и вычислительной техники Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина, e-mail: anna_tarasowa@rambler.ru.

Юшкіна Светлана Борисовна – магистрант факультета автоматики и вычислительной техники Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина, e-mail: kvt@sevgtu.sebastopol.ua.