

Формирование диаграмм состояний-переходов в условиях мониторинга технического состояния Defining state-transition diagrams as part of technical state monitoring

Борис П. Зеленцов, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация

Boris P. Zelentsov, Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russian Federation
zelentsov@mail.ru



Борис П.
Зеленцов

Резюме. Приведены диаграммы состояний-переходов в условиях мониторинга, при котором учитываются явные и скрытые отказы. **Цель.** Формирование диаграмм состояний-переходов, которые используются для разработки модели надежности и соответственно расчетных методов, в условиях мониторинга с периодическим контролем. **Методы.** В основу метода положена классификация отказов по признаку их обнаружения: явные и скрытые отказы. В соответствии с этим контроль состояния объектов может быть непрерывным и/или периодическим. При этом периодический контроль проводится с постоянным периодом. При формировании диаграммы состояний-переходов учтены причинно-следственные связи между состояниями и событиями: каждое состояние может быть причиной какого-либо события и в то же время состояние является следствием какого-то события. Аналогично каждое событие является причиной изменения состояния и в то же время событие является следствием какого-то состояния. На одном периоде между двумя операциями периодического контроля имеют место переходы в непрерывном времени, обусловленные отказами и происходящие в непрерывном времени. Этот процесс описывается теорией марковских процессов в непрерывном времени. После выполнения операции периодического контроля происходит переход в работоспособное состояние, если контролю подвергается работоспособный объект. Если объект оказался в неработоспособном состоянии, то он направляется на техническое обслуживание. Эти переходы в дискретные моменты времени описываются полумарковскими процессами. Для полного понимания излагаемого материала приведен перечень используемых терминов, взятых из государственных стандартов. **Результаты.** При принятых видах отказов на одном периоде контроля переходы между состояниями описываются в непрерывном времени, а после проведения операции контроля – в дискретном времени. На каждом периоде контроля составляется и решается система дифференциальных уравнений при начальном работоспособном состоянии. По полученным вероятностям вычисляются вероятности периода без отказа и с отказом, а также средняя продолжительность работоспособного и неработоспособного состояний на периоде с отказом. При обнаружении отказов происходит переход в состояние технического обслуживания. Вероятность такого перехода находится в рамках теории полумарковского процесса. По вероятностям полумарковского процесса вычисляются средние числа периодов без отказа. Такая модель адекватно отражает процессы надежности эксплуатируемого оборудования. При отклонении от такого подхода показатели надежности могут принимать существенно отличающиеся расчетные значения. Приведены три примера диаграмм состояний-переходов: с учетом только явных отказов, только скрытых отказов и с совместным учетом этих отказов. **Обсуждение и выводы.** Изложенный подход с использованием постоянного (регулярного) периода контроля позволяет формировать модели, адекватно отражающие процессы в реальных системах. Все операции по реализации моделируемых процессов выполняются на основе теории марковских процессов в непрерывном времени и полумарковских процессов. Эти операции выполняются в матричном виде. Такой подход дает возможность выполнять математические операции с применением средств компьютерной математики. Изложенный подход может быть использован для совершенствования моделей надежности технических систем.

Abstract. State-transition diagrams are given for the situation of monitoring that takes into consideration explicit and hidden failures. **Aim.** To generate state-transition diagrams that are used in the development of the dependability model and associated calculation methods under conditions of periodic monitoring. **Methods.** The method is based on the classification of failures by detection, i.e., explicit and hidden failures. Accordingly, facility condition inspection may be continuous and/or periodical. Periodical inspection is conducted at equal intervals. The state-transition diagram is generated taking into consideration the relations between the states and events, i.e., each state can be the cause of a certain event and, at the same time, a state is the consequence of an event. Similarly, each event is the cause of a state change,

while at the same time being a consequence of a state. Within the time between two periodic inspections, continuous-time transitions take place due to failures. This process is described by the theory of continuous-time Markov processes. Upon the completion of a periodic inspection operation, the up state ensues if an operable item is subjected to inspection. If an item proves to be down, it is submitted to maintenance. Such transitions in discrete moments in time are described by semi-Markov processes. For a better understanding of the information set forth in the paper, a list is provided of the used terminology referring to state standards. **Results.** Under the adopted failure modes within a single inspection period, state transitions are described in continuous time, while after the inspection operation they are described in discrete time. Within each inspection period, a system of differential equations is defined and solved based on the assumption of initial up state. Based on the deduced probabilities, the probabilities of a period without failures and with a failure are calculated along with the mean time of up and down states within the period with a failure. Should failures be detected, maintenance state is initiated. The probability of such transition is within the theory of semi-Markov processes. Based on the probabilities of the semi-Markov process, the mean failure-free periods are calculated. Such model adequately reflects the dependability processes of operated equipment. If the method is not fully observed, the dependability indicators may take significantly different values. Three examples of state-transition diagrams are given: taking into account only explicit failures, only hidden failures and both. **Discussion and conclusions.** The presented approach with a constant (regular) inspection period allows building models that adequately reflect processes occurring in actual systems. All operations involved in the implementation of simulated processes are performed based on the theory of continuous-time Markov processes and semi-Markov processes. The operations are performed in matrix form. Such method enables mathematical operations using computers. The presented approach can be used for improving dependability models of technical systems.

Ключевые слова: контроль состояния, скрытый отказ, явный отказ.

Keywords: state supervision, hidden failure, explicit failure.

Для цитирования: Зеленцов Б.П. Формирование диаграмм состояний-переходов в условиях мониторинга технического состояния // Надежность. 2022. №2. С. 22-29. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-22-29>

For citation: Zelentsov B.P. Defining state-transition diagrams as part of technical state monitoring. Dependability 2022;2:22-29. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-22-29>

Поступила 25.02.2022 г. / **После доработки** 26.04.2022 г. / **К печати** 17.06.2022 г.

Received on: 25.02.2022 / **Revised on:** 26.04.2022 / **For printing:** 17.06.2022.

Введение

Оборудование технических систем различного назначения обычно относится к сложным системам длительного использования. Одной из проблем исследования таких систем является построение моделей реальных систем, которые пригодны для теоретического и экспериментального изучения их свойств. Математическое моделирование является наиболее распространенным и перспективным методом изучения сложных систем, который позволяет проводить исследование на этапе проектирования, решать задачи анализа и синтеза, прогнозировать эффективность функционирования, обосновывать необходимую или оптимальную структуру при проектировании новых и совершенствовании существующих систем и правильно интерпретировать статистические данные.

Следует отметить, что на сложные системы в условиях эксплуатации воздействуют различные случайные факторы, ввиду чего вероятностные закономерности являются преобладающими при их моделировании. Детерминированные закономерности накладываются на случайные факторы, что определяет специфику модели в

каждом конкретном случае. Такие особенности актуальны для систем с механическим, электромеханическим и электронным оборудованием.

Надежность объектов зависит от многих факторов. В настоящей статье рассмотрены виды отказов по признаку их обнаружения и система мониторинга, которая заключается в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Исследование надежности объектов с учетом мониторинга технического состояния продолжает оставаться актуальным, поскольку это является составной частью проектирования и совершенствования технических систем.

Целью статьи является составление модели надежности объекта с постоянным периодом между проверками с учетом приведенных условий и ограничений.

Обзор источников

В научной и учебной литературе, а также в нормативных документах приводятся различные виды диаграмм состояний-переходов, в которых учтена специфика мо-

делируемых систем и их оборудования. При построении моделей надежности учитываются следующие факторы:

- различные виды отказов;
- применение системы мониторинга технического состояния;
- использование системы технического обслуживания;
- применение технического обслуживания с периодическим или непрерывным контролем;
- возможность ошибок контроля I и II рода и многое другое.

Необходимость моделирования процессов, связанных с мониторингом технического состояния объектов, подтверждается во многих исследованиях, например, [1, 2, 3].

Во многих исследованиях процесс переходов между состояниями описывается моделью в непрерывном времени. При этом, как правило, продолжительность нахождения в состояниях или продолжительность до событий распределена по показательному закону с постоянной интенсивностью. В частности, по показательному закону распределена также продолжительность между операциями контроля технического состояния [1, 4, 5, 6, 7, 8].

Если при эксплуатации объекта имеют место только явные отказы, то система мониторинга обнаруживает такой отказ в момент его возникновения, при этом начиная с момента отказа может производиться техническое обслуживание с непрерывным контролем. Этот простейший случай, включающий два состояния, представлен в [9]. Объект используется по назначению до появления отказа. Возникновение отказа совмещено с началом восстановления, то есть неработоспособное состояние совмещено с восстановлением и начинается оно в момент появления отказа. Из такого представления следует сделать вывод о том, что в этом случае имеет место явный отказ, ввиду этого организация мониторинга технического состояния не является актуальной.

Другие варианты отказов и восстановления в [9] также включают только явные отказы. Подобная ситуация с учетом только явных отказов повторяется во многих публикациях, посвященных моделированию надежности технических систем. Итак, в этом стандарте не содержится информация о виде отказа. Кроме того, приведенные диаграммы не содержат информации о мониторинге технического состояния и/или о техническом диагностировании объекта, а состояния и переходы полностью не раскрыты. Например, после восстановления отказавшего объекта он переводится в ухудшенное состояние, то есть восстановление полностью не устраняет отказ. С этим нельзя согласиться.

В [10] исследованы диаграммы состояний-переходов для разных вариантов систем: одиночный объект, последовательное, параллельное и другие соединения элементов системы, резервированные системы из однотипных элементов с активным и пассивным резервом, системы без восстановления и с восстановлением. Во

всех вариантах восстанавливаемых систем после отказа объекта или элемента системы начинается восстановление. Это означает, что учитываются только явные отказы, а скрытые отказы и система их обнаружения в этих моделях не учитываются. Следует также отметить, что процессы, моделируемые диаграммами состояний-переходов, происходят в непрерывном времени.

В [11] изложена система контроля технического состояния в процессе эксплуатации объекта. Для обнаружения отказов разного вида использован непрерывный и периодический контроль, при этом периодический контроль проводится со случайным периодом. Кроме того, учитывается также уровень достоверности контроля.

Работа [12] посвящена оптимизации периодичности контроля защищенности компьютерных систем. Все процессы протекают в непрерывном времени, продолжительности всех состояний являются случайными и распределены по показательному закону с постоянной интенсивностью, в том числе продолжительность интервала тестирования. Обоснование показательного распределения для интервалов тестирования не приводится. По некоторым критериям производится оптимизация среднего значения интервала тестирования.

Автор опирается на терминологию, установленную в государственных стандартах. Для полного и однозначного понимания приведен перечень используемых терминов.

Используемые термины и их определения

Вид отказа: Способ и характер возникновения отказа объекта (Failure mode) [13].

Внезапный отказ: Отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние (Sudden failure) [14].

Восстановление: Процесс и событие заключающиеся в переходе объекта из неработоспособного состояния в работоспособное (Restoration) [14].

Диаграмма состояний-переходов: Диаграмма, показывающая совокупность возможных состояний и возможных пошаговых переходов между состояниями (State-transition diagram) [15].

Интенсивность отказов: Условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник (Failure rate) [14].

Контроль состояния: Операции, выполняемые автоматически или вручную с целью определения и квалификации состояния (Condition monitoring) [15].

Коэффициент готовности: Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых его применение по назначению не предусмотрено (Availability factor) [16].

Коэффициент технического использования: Отношение математического ожидания суммарного времени

пробытия объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом, за тот же период (Utilization factor) [16].

Модель надежности: Математическая модель объекта, используемая для прогнозирования и расчета надежности (Dependability model) [14].

Мониторинг технического состояния: Составная часть технического обслуживания, заключающаяся в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах (Condition monitoring) [14].

Начальное состояние: Состояние объекта в момент времени $t = 0$ (Initial state) [9].

Неработоспособное состояние: Состояние объекта, в котором он не способен выполнять хотя бы одну требуемую функцию (Down state) [14].

Отказ: Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта (Failure) [14].

Периодичность технического обслуживания: Интервал времени или наработки между данным видом технического обслуживания и последующим таким же видом (Maintenance period) [16].

Поглощающее состояние: Состояние, из которого переходы невозможны (Absorbing state) [9].

Постепенный отказ: Отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта (Gradual failure) [14].

Работоспособное состояние: Состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции (Up state) [14].

Скрытый отказ: Отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики (Latent failure) [14].

Средняя продолжительность неработоспособного состояния: Математическое ожидание продолжительности неработоспособного состояния (Mean down time) [15].

Средняя продолжительность работоспособного состояния: Математическое ожидание продолжительности работоспособного состояния (Mean up time) [15].

Техническое диагностирование: Процесс определения технического состояния объекта (Technical diagnosis) [16].

Техническое обслуживание: Совокупность всех технических и организационных действий, направленных на поддержание или возвращение изделия в работоспособное состояние (Maintenance) [15].

Техническое обслуживание с непрерывным контролем: Техническое обслуживание, предусмотренное документацией и выполняемое по результатам непрерывного контроля технического состояния объекта (Maintenance with continuous control) [16].

Техническое обслуживание с периодическим контролем: Техническое обслуживание, выполняемое при контроле технического состояния объекта в объеме и с периодичностью, установленной в документации (Maintenance with periodic control) [16].

Техническое состояние: Состояние объекта, характеризующее совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях (Technical condition) [14].

Явный отказ: Отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения (Explicit failure) [14].

Концептуальная модель

Прежде всего, отметим несколько особенностей, связанных с моделированием мониторинга технических систем. В реальных технических системах имеют место различные виды отказов и различные модификации мониторинга, которые следует учитывать при моделировании процессов, связанных с надежностью. В связи с этим возможны следующие виды мониторинга, которые названы условно. Идеальный мониторинг, при котором обнаруживаются все виды отказов, из чего следует, что все виды отказов являются явными. Достоверный мониторинг, при котором обнаруживаются виды отказов, предусмотренные документацией. Недостоверный мониторинг, при котором возможны ошибки при выполнении операций контроля технического состояния объекта.

Приведенные соображения могут быть уточнены и расширены с учетом различных видов отказов и специфических особенностей мониторинга, заложенного в техническое обслуживание систем технического назначения.

В настоящей статье виды отказов рассматриваются по признаку их обнаружения: явные отказы и скрытые отказы. Явные отказы обнаруживаются в момент их возникновения, а скрытые отказы – при выполнении операций периодического контроля в рамках мониторинга технического состояния. Ввиду этого при возникновении явного отказа использование объекта по назначению прерывается, то есть неработоспособное состояние после явного отказа отсутствует. После возникновении скрытого отказа объект переходит в неработоспособное состояние. При таком подходе явный отказ может быть после скрытого, однако скрытый отказ после явного произойти не может. Такая ситуация возможна для технических систем, в частности, для электронного оборудования систем различного назначения.

В некоторых научных работах вид отказа устанавливается по скорости изменения параметров: внезапные и постепенные. Здесь имеется в виду, что скрытый отказ может быть внезапным или постепенным, а явный отказ – внезапным или постепенным, переходящим из скрытого в явный.

Техническое обслуживание производится с целью перевода объекта из неработоспособного состояния в работоспособное. При этом техническое обслуживание может быть с периодическим или непрерывным контролем.

В соответствии с изложенным представлением периодом контроля является продолжительность между двумя операциями контроля. На одном периоде между операциями контроля технического состояния отказ может произойти или не произойти. Поэтому период контроля может быть двух типов:

- без отказа (объект является работоспособным на всем периоде);
- с отказом (в течение периода происходит отказ).

На периоде без отказа операция контроля подтверждает работоспособное состояние и объект продолжает использоваться по назначению. Если объект отказывается на периоде, то отказ обнаруживается системой контроля и объект направляется на техническое обслуживание.

Примечание. Периодичность контроля следует отличать от периодичности технического обслуживания. Задачи, связанные с периодичностью технического обслуживания, здесь не рассматриваются. После проведения технического обслуживания работоспособный объект, как правило, используется по назначению в работоспособном состоянии.

Приняты следующие условия и ограничения, согласованные с используемой терминологией.

1. При использовании объекта по назначению могут произойти скрытые и/или явные отказы.
2. Явные отказы обнаруживаются непрерывным контролем, а скрытые отказы – периодическим контролем.
3. Как явные, так и скрытые отказы имеют показательное распределение и характеризуются соответствующими постоянными интенсивностями отказов λ_a и λ_c .
4. Контроль технического состояния производится периодически с постоянным (регулярным) периодом T между операциями контроля.
5. Контроль технического состояния является достоверным.
6. В состоянии восстановления или технического обслуживания объект не выполняет требуемые функции, то есть в этих состояниях применение объекта по назначению не предусматривается.
7. Работоспособное состояние всегда является начальным после технического обслуживания.
8. Продолжительность операций контроля технического состояния принята пренебрежимо малой по сравнению с периодом контроля T .

Последнее допущение принято для упрощения модели. Такое допущение позволяет учесть влияние различных факторов в «чистом виде». В частности, в соответствии с установленными нормами коэффициент готовности является вероятностью работоспособного состояния без учета планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусмотрено. В случае необходимости учесть конечное

время нахождения в состояниях контроля и восстановления в рамках данной модели не составляет затруднений.

Формирование диаграмма состояний-переходов

Следует отметить, что в опубликованных исследованиях имеются много вариантов диаграмм состояний-переходов, которые зависят от особенностей используемого оборудования и традиций составления математических моделей. В частности, в некоторые модели заложены различные виды отказов, предотказы оборудования, а также различные системы мониторинга технического состояния. Диаграмма состояний-переходов должна содержать все причинно-следственные соотношения между состояниями и событиями и в то же время удовлетворять требованиям государственных стандартов.

При формировании диаграммы состояний-переходов следует учитывать причинно-следственные связи между состояниями и событиями. Каждое состояние может быть причиной какого-либо события и в то же время состояние является следствием какого-то события. Аналогично каждое событие является причиной изменения состояния и в то же время событие является следствием какого-то состояния.

В соответствии с используемым определением коэффициента готовности при расчетах принимаются во внимание продолжительности работоспособных и неработоспособных состояний, то есть состояний, в которых объект используется по назначению, а продолжительность операций контроля и состояния технического обслуживания не учитываются. Продолжительность операций контроля и состояний технического обслуживания учитывается при расчете коэффициента технического использования.

При построении диаграмм приняты следующие обозначения состояний: Р – работоспособное состояние объекта; Н_с – состояние объекта со скрытым отказом; КР – контроль состояния объекта на периоде без отказа; КН_я – контроль состояния объекта при возникновении явного отказа; КН_с – контроль неработоспособного состояния объекта со скрытым отказом; ТО техническое обслуживание объекта.

Математическая модель

Как было отмечено, в некоторых публикациях продолжительность между операциями контроля технического состояния принимается распределенной по показательному закону с постоянной интенсивностью. При таком допущении формируется математическая модель и приводятся методы вычисления показателей надежности. Прежде чем использовать такую модель, следует обосновать это показательное распределение. В большинстве случаев такое обоснование не проводится.

При постоянном (регулярном) времени между операциями контроля использование объекта по назначению разбивается на интервалы времени с постоянной продолжительностью. При этом между двумя последовательными операциями контроля переходы между состояниями происходят в непрерывном времени, а при проведении операции контроля – в дискретные моменты времени. Поэтому представление процесса эксплуатации только в непрерывном времени неприемлемо.

На каждом периоде вероятности состояний являются решением системы дифференциальных уравнений. По этим вероятностям могут быть вычислены:

- 1) средние времена нахождения в состояниях;
- 2) вероятности периодов без отказа и с отказом.

Последние вероятности зависят не только от интенсивностей отказов, но и от периода контроля T . Они являются исходными для описания смены состояний с помощью полумарковского процесса. Процесс смены состояний полумарковского процесса задается вероятностями p_{ij} . Вероятностью p_{ij} является условной вероятностью непосредственного перехода из состояния s_i в состояние s_j при условии, что состояние s_i меняется. Вероятности p_{ij} описывают процесс только в момент перемены состояния.

Переходы между состояниями при обнаружении отказов могут быть описаны с помощью полумарковского процесса [17, 18]. По этим вероятностям вычисляются средние числа вхождений (попаданий) в состояния, что используется для вычисления различных характеристик процесса и показателей надежности. В частности, такой подход позволяет рассчитать среднюю продолжительность работоспособного и неработоспособного состояния между двумя последовательными техническими обслуживаниями.

Примеры построения диаграмм состояний

Приведем несколько диаграмм с различными представлениями явных и скрытых отказов. В каждом примере используется разная нумерация состояний, но приведенные обозначения и их определения сохраняются. Изменение нумерации состояний не изменяет числовые характеристики процесса.

Рассмотрим сначала случай, когда система мониторинга позволяет обнаруживать все виды отказов в момент их возникновения. Это означает, что имеют место только явные отказы. Контроль состояния практически совпадает с появлением явного отказа. После обнаружения явного отказа объект направляется на техническое обслуживание. Очевидно, что необходимости в периодическом контроле нет. Соответствующая диаграмма приведена на рис. 1. Период использования по назначению продолжается от момента завершения технического обслуживания до момента появления явного отказа и его обнаружения. Этот простейший вариант приведен в [9]. Средняя продолжительность работоспособного

состояния равна $1 / \lambda_{я}$, а неработоспособное состояние отсутствует. Поэтому коэффициент готовности с учетом принятых условий равен 1.



Рис. 1. Диаграмма состояний-переходов с учетом только явных отказов

В следующей диаграмме учтены только скрытые отказы. Поскольку скрытые отказы выявляются при проведении операций периодического контроля, то продолжительность периода контроля без отказа и с отказом одна и та же. Использование по назначению продолжается до возникновения скрытого отказа и его обнаружения при очередной операции периодического контроля [19]. Соответствующая диаграмма приведена на рис. 2.

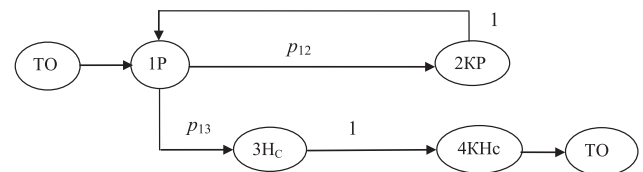


Рис. 2. Диаграмма состояний-переходов с учетом только скрытых отказов

Далее приведена диаграмма при наличии явных и скрытых отказов. Как было отмечено ранее, явный отказ может наступить после скрытого. При наступлении только скрытого отказа он обнаруживается при очередной операции периодического контроля и объект направляется на техническое обслуживание. При наступлении явного отказа он обнаруживается внутри периода контроля и после этого объект направляется на техническое обслуживание. Диаграмма состояний-переходов приведена на рис. 3. Из приведенных диаграмм видно различие между явными и скрытыми отказами: при скрытом отказе имеется часть периода контроля, на которой объект находится в неработоспособном состоянии, а после явного отказа такая часть отсутствует.

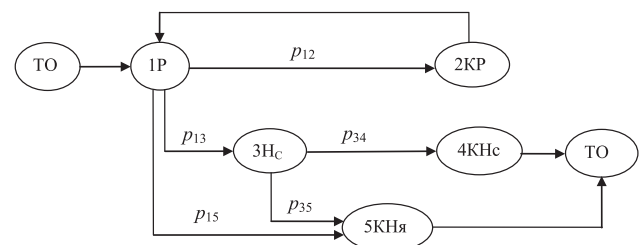


Рис. 3. Диаграмма состояний-переходов с учетом явных и скрытых отказов

Результаты

При моделировании процессов надежности с учетом явных и скрытых отказов и при постоянном периоде контроля целесообразно исследовать два процесса: в

непрерывном времени между двумя операциями контроля и в дискретном времени по результатам контроля технического состояния. В непрерывном времени вычисляются продолжительности работоспособных и неработоспособных состояний и переходные вероятности полумарковского процесса.

Таким образом, основная идея, изложенная в настоящей статье, заключается в совместном использовании двух моделей: в непрерывном времени и в дискретном времени. Переходы в непрерывном времени обусловлены явными и скрытыми отказами, а переходы в дискретном времени обусловлены результатами контроля технического состояния.

Приведенный подход с использованием периодического контроля с постоянным (регулярным) периодом может быть использован для моделирования процессов надежности как для относительно простых случаев, так и для более сложных вариантов, в которых учитывается недостоверность операций контроля, использование предостережений, последствия от отказов разного вида и др.

Обсуждение и выводы

При проектировании и совершенствовании обслуживания оборудования технических систем следует принимать во внимание явные и скрытые отказы и вид периодичности контроля технического состояния. В аналитических моделях, применяемых для описания мониторинга технических систем, зачастую используют случайный период между проверками. Использование в таких моделях разных способов задания периодичности контроля может существенно изменить расчетные значения показателей надежности.

Изложенный подход с использованием постоянного (регулярного) периода контроля позволяет формировать модели, адекватно отражающие процессы в реальных системах. Все операции по реализации моделируемых процессов выполняются на основе теории марковских процессов в непрерывном времени и полумарковских процессов. Эти операции целесообразно выполнять в матричном виде [20]. Такой подход дает возможность использовать средства компьютерной математики для проведения численных расчетов. Пример модели надежности с описанием процессов в непрерывном и дискретном времени приведен в [21].

Следует отметить, что приведенные соображения отражают мнение автора. Они имеют методический характер и могут быть полезны при формировании адекватных моделей надежности технических объектов и систем.

Библиографический список

1. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
2. Шайхутдинов Д.В. Методы мониторинга и диагностики сложных технических систем на базе имита-

ционного моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11 (часть 1). С. 146-153.

3. Егунов М.М., Шувалов В.П. Резервирование и восстановление в телекоммуникационных сетях // Вестник СибГУТИ. 2012. № 2. С. 3-9.

4. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. Выпуск 85. С. 1-27.

5. Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Том 2: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов. М.: МЦНМО, 2009. 588 с.

6. Половко А.М., Гуров С.М. Основы теории надежности. БХВ-СПБ, 2008. 702 с.

7. Рахман П.А. Показатели надежности восстанавливаемых систем с заданным порогом аварийного отключения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9. С. 146-153.

8. O'Connor P.D.T., Klerner A. Practical Reliability Engineering: 5th ed. John Wiley & Sons, 2012. 504 p.

9. ГОСТ Р МЭК 61165-2019. Надежность в технике. Применение марковских методов. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 26 с.

10. Birolini A. Reliability Engineering. Ntheory and Practice: 8th ed. Springer, 2017. 651 p.

11. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем. М.: Дрофа, 2008. 239 с.

12. Богатырев В.А., Богатырев А.В. Оптимизация периодичности контроля защищенности компьютерных систем // Научно-технический вестник информационных технологий и оптики. 2015. Т.15. № 2. С. 300-304.

13. ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Методы анализа видов и последствий отказов. М.: Стандартинформ, 2008. IV, 35 с.

14. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. IV, 23 с.

15. ГОСТ Р 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. 32 с.

16. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. II, 13 с.

17. Королук В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев: Наукова думка, 1982. 236 с.

18. Сильвестров Д.С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний. М.: Сов радио, 1980. 272 с.

19. Зеленцов Б.П., Трофимов А.С. Исследование моделей расчета надежности при разных способах задания периодичности проверок // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1 (25). С. 35-44.

20. Зеленцов Б.П. Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017. 133 с.

21. Зеленцов Б.П. Модель системы мониторинга объекта при недостоверном контроле // Надежность. 2020. № 4. С. 3-12.

References

1. Ostreykovsky V.A. Dependability theory. Moscow: Vysshaya Shkola, 2003. (in Russ.)
2. Shaykhutdinov D.V. Methods for dynamic complex technical systems monitoring and diagnosis based on imitation simulation. *Modern High Technologies* 2018;11(1):146-153. (in Russ.)
3. Egunov M.M., Shuvalov V.P. Reservation and restoration in telecommunication networks. *Vestnik SibGUTI* 2012;2:3-9. (in Russ.)
4. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepaniants A.S. [The effect of inspection characteristics on the dependability indicators of systems]. *Trudy MAI* 2016;85:1-27. (in Russ.)
5. Kelbert M.Ya., Sukhov Yu.M. [Probability and statistics in examples and problems. Vol. 2: Markov chains as the foundation of the theory of random processes]. Moscow: MCCME; 2009. (in Russ.)
6. Polovko A.M., Gurov S.M. [Introduction into the dependability theory]. BHV-SPB; 2008. (in Russ.)
7. Rahman P.A. Reliability indices of repairable systems with predefined threshold of emergency shutdown. *International Journal of Applied and Fundamental Research* 2015;9:146-153. (in Russ.)
8. O'Connor P.D.T., Klener A. Practical Reliability: 5th ed. John Wiley & Sons; 2012.
9. GOST R IEC 61165-2019. Dependability in technics. Application of Markov techniques. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)
10. Birolini A. Reliability Engineering. Theory and Practice. 8th edition. Springer; 2017.
11. Ushakov I.A. [Course of systems dependability theory]. Moscow: Mir; 2008.
12. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Frequency optimization for security monitoring of computer systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 2015;15(2):300-304. (in Russ.)
13. GOST R 51901.12-2007. Risk management. Procedure for failure mode and effects analysis. Moscow: Standartinform; 2008. (in Russ.)
14. GOST 27.002-2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)
15. GOST R 53480-2009. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2010. (in Russ.)
16. GOST 18322-2016. Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2017. (in Russ.)
17. Koroliuk V.S., Turbin A.F. [Semi-Markovian processes and their applications]. Kiev: Naukova dumka; 1982. (in Russ.)
18. Silvestrov D.S. [Semi-Markov processes with discrete set of states]. Moscow: Sovetskoye Radio; 1980. (in Russ.)
19. Zelentsov B.P., Trofimov A.S. Research models of reliability calculation with different ways of task the periodic inspection. *Reliability and Quality of Complex Systems* 2019;1(25):35-44. (in Russ.)
20. Zelentsov B.P. [Matrix methods of simulating homogeneous Markov processes]. Academic Publishing; 2017. (in Russ.)
21. Zelentsov B.P. Model of item monitoring system in presence of inspection errors. *Dependability* 2020;4:3-12.

Сведения об авторе

Зеленцов Борис Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: zelentsovb@mail.ru

About the author

Boris P. Zelentsov, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Further Mathematics, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: zelentsovb@mail.ru.

Вклад автора в статью

Автор изложил подход к использованию диаграмм состояний-переходов с регулярным периодом контроля, что позволяет формировать модели надежности, адекватно отражающие процессы в реальных системах.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.