

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 519.718:519.873

DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-6

Б. П. Зеленцов

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТА ПРИ НЕДОСТОВЕРНОМ КОНТРОЛЕ

B. P. Zelentsov

DEPENDABILITY MODEL OF AN ITEM UNDER UNRELIABLE CHECK-OUT OPERATIONS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Приведена аналитическая модель при постоянном периоде между проверками и при недостоверном контроле технического состояния. Модель направлена на совершенствование технических систем при их проектировании и при обслуживании в процессе эксплуатации. Целью статьи является формирование такой модели. *Материалы и методы.* Модель основана на описании процессов при эксплуатации объекта с одновременным использованием марковской модели в непрерывном времени и полумарковского процесса. Модель применима для объектов и систем, в которых используется электронное оборудование. *Результаты.* Получена зависимость расчетных значений вероятностных и временных показателей надежности от периодичности проверок, интенсивности отказов и вероятностей ошибок контроля I и II рода. *Выводы.* Модель является результатом обобщения и совершенствования моделей эксплуатации технических систем, построенных на электронном оборудовании. Достоверность модели подтверждена математическими обоснованиями и представлениями о системе мониторинга технического состояния.

Abstract. *Background.* An analytic model of a functioning item under regular period between checks and unreliable check-out operations is represented. The model is intended for perfection of design and maintenance of technical systems. The aim of the article is forming such model. *Materials and methods.* The model is based on the theory of Markov processes in continuous time and semimarkov processes using matrix methods for mathematical operations. The model can be applied for items and systems based on electronic equipment. *Results.* Consideration of the model reveals the influence of check-out errors of the first and the second kind and other parameters on the dependability level. Relations between parameters are derived using the model. *Conclusions.* The model is the result of generalization and perfection of operation of systems based on electronic equipment. The truthfulness of the model is confirmed by mathematical argumentation and comprehension of system operation and condition monitoring.

Ключевые слова: надежность объекта, постоянный период между проверками, ошибки контроля I и II рода.

Keywords: dependability of an item, condition monitoring with regular period, check-out errors of the first and the second kind.

Введение

Известно, что надежность объекта зависит не только от параметров отказов, но и от качества системы технического обслуживания, составной частью которой является мониторинг технического состояния, который заключается в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Ввиду этого исследования надежности объектов с учетом мониторинга технического состояния остаются актуальными. Моделирование мониторинга позволяет решать проблемы исследования, проектирования и совершенствования технических систем. Для этих целей используют теорию дискретных марковских процессов в непрерывном и дискретном времени. Как в нашей стране, так и за рубежом проводятся разнообразные исследования в этой области.

Мониторинг технического состояния применяется в разных областях техники с учетом специфических особенностей. Так, в области энергетики одной из основных проблем является релейная защита энергосистем, где требуется контролировать такие события, как ложное срабатывание системы мониторинга, отказ в функционировании, внутренние и внешние короткие замыкания [1, 2]. Оборудование телекоммуникационных сетей относится к системам длительного использования, в которых проводится непрерывный и периодический мониторинг различных участков сети, что позволяет установить необходимый уровень готовности сети с учетом резервирования оборудования и характеристик восстановления [3].

С системой мониторинга тесно связаны задачи по эксплуатационным испытаниям, которые являются достоверным источником получения информации об исходных характеристиках надежности [4–6]. Эти характеристики используются при построении различных моделей, реально отражающих процессы в технических системах. От рациональной организации эксплуатационных испытаний зависит достоверность получаемой информации и стоимость системы мониторинга.

В работе [7] исследовано влияние полноты, глубины и безотказности контроля при моделировании надежности резервированных систем. Разработаны модели типовых структур надежности. Результаты моделирования позволяют обоснованно выдвигать требования к характеристикам систем контроля.

В работе [8] на основе аналитических методов мониторинга составлены модели обнаружения и диагностики отказов и повреждений в сложных системах. Конкретные исследования, связанные с периодичностью профилактических мероприятий, приведены в работе [9].

Системы со встроенным контролем изучались многими авторами. Так, в работе [10] исследован контроль правильности выполнения функции в системах с восстановлением. Модель основана на теории марковских процессов в непрерывном времени, при этом переходы между состояниями описаны с помощью системы дифференциальных уравнений. В исследованиях широко используются модели на основе полумарковских процессов [11, 12]. В работе [13] приведены теория и примеры применения полумарковских процессов. Применен метод вложенных цепей Маркова, на основе которого исследованы характеристики процессов в нестационарном режиме, в частности, временные характеристики в системах массового обслуживания.

Концептуальная модель

Мониторинг реализуется в виде операций контроля технического состояния, которые проводятся периодически. Система мониторинга заключается в том, что периодически проводятся проверки, контроль функционирования, измерения параметров и на основании этого устанавливается факт наличия отказа.

Во время эксплуатации объект используется по назначению (функционирует), подвергается разным видам технического обслуживания, в том числе проверкам технического состояния. С этой точки зрения эксплуатацию объекта можно представить состоящей из функционирования, проверок технического состояния и восстановления. С течением времени происходят переходы между этими фазами эксплуатации.

Во время функционирования объект может находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном. В неработоспособное состояние объект переходит при наступлении отказа, который обнаруживается при проверке технического состояния в рамках проведения контрольных операций. Объект используется по назначению как в работоспособном, так и в неработоспособном состоянии. Если проверке подвергается работоспособный объект, то после проверки он возвращается на функционирование. Если же проверке подвергается неработоспособный объект, то он направляется на восстановление, после которого он возвращается на функционирование.

При недостоверном контроле возможны ошибки контроля I и II рода. Если в конце периода объект окажется работоспособным, то при проверке возможна ошибка I рода, которая приводит к ложному восстановлению. Если же в конце периода объект окажется неработоспособным, то при проверке возможна ошибка II рода, которая приводит к тому, что на функционирование направляется неработоспособный объект.

В данной модели рассматриваются разные периоды, связанные с отказами объекта. Период между двумя последовательными проверками может быть:

- 1) работоспособным, если объект является работоспособным на всем периоде;
- 2) с отказом, если в течение периода происходит отказ, при этом период состоит из двух частей: работоспособной части и неработоспособной части;
- 3) неработоспособным, если объект является неработоспособным на всем периоде.

Замечание. Отказ на периоде не изменяет продолжительность периода.

В данной модели приняты следующие условия и допущения:

- 1) отказы происходят с постоянными интенсивностями, т.е. отказы наступают в случайный момент времени, а время до отказа распределено по показательному закону;
- 2) контроль состояния объекта производится с постоянным периодом, при этом начало каждого периода отсчитывается от начала функционирования после восстановления или очередной проверки;
- 3) при обнаружении отказа объект поступает на восстановление, после которого начинается функционирование в работоспособном состоянии.

- 4) продолжительности проведения проверок и восстановления приняты пренебрежимо малыми.

Последнее допущение принято для упрощения модели. Такое допущение позволяет оценить 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. Также следует отметить, что в результате выполнения последнего допущения получены простые формулы для вычисления показателей надежности.

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

Характеристики состояний на одном периоде

На одном периоде начальным может быть как работоспособное, так и неработоспособное состояние. Если работоспособное состояние является начальным, то вероятности этих состояний в момент времени $t \in [0; T]$ в соответствии с принятыми допущениями имеют вид

$$p_p(t) = e^{-\lambda \cdot t}; p_n(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \quad (1)$$

где T – установленный (постоянный) период между проверками, λ – интенсивность отказов.

При $t = T$ получаем вероятности работоспособного и неработоспособного состояний в конце периода при условии, что работоспособное состояние является начальным:

$$p_p = p_p(T) = e^{-\lambda \cdot T}; p_n = p_n(T) = 1 - e^{-\lambda \cdot T}. \quad (2)$$

Средние времена нахождения в этих состояниях на одном периоде при начальном работоспособном состоянии:

$$\theta_p = \int_0^T p_1(t) dt = \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T}}{\lambda}; \theta_n = \int_0^T p_2(t) dt = \frac{\lambda \cdot T - (1 - e^{-\lambda \cdot T})}{\lambda}. \quad (3)$$

Замечание. θ_p и θ_n – это средние времена нахождения в работоспособном и неработоспособном состояниях на периоде с отказом.

Если неработоспособное состояние является начальным на периоде, то в этом случае следующий за ним период является неработоспособным:

$$\theta_p = 0; \theta_n = T. \quad (4)$$

Замечание. Продолжительность периода не зависит от наличия или отсутствия отказа.

Переходы между состояниями фаз эксплуатации объекта

Диаграмма состояний приведена на рис. 1. На диаграмме обозначено: $1P_1$ – работоспособное состояние объекта в начале периода; $2P_2$ – работоспособное состояние объекта в конце работоспособного периода; $3H_1$ – неработоспособное состояние объекта в конце периода с отказом; $4H_2$ – неработоспособное состояние в конце неработоспособного периода, является результатом ошибки контроля II рода; $5ПР$ и $6ПН$ – проверка работоспособного и неработоспособного объекта; $7В$ – восстановление работоспособности объекта; α – вероятность ошибки контроля I рода; β – вероятность ошибки контроля II рода.

С вероятностью ошибки контроля I рода происходит переход $5 \rightarrow 7$ (ложное восстановление) и с вероятностью ошибки контроля II рода происходит переход $6 \rightarrow 4$ (необнаруженный отказ), где состояние 4 является неработоспособным, при этом неработоспособное состояние является начальным состоянием неработоспособного периода.

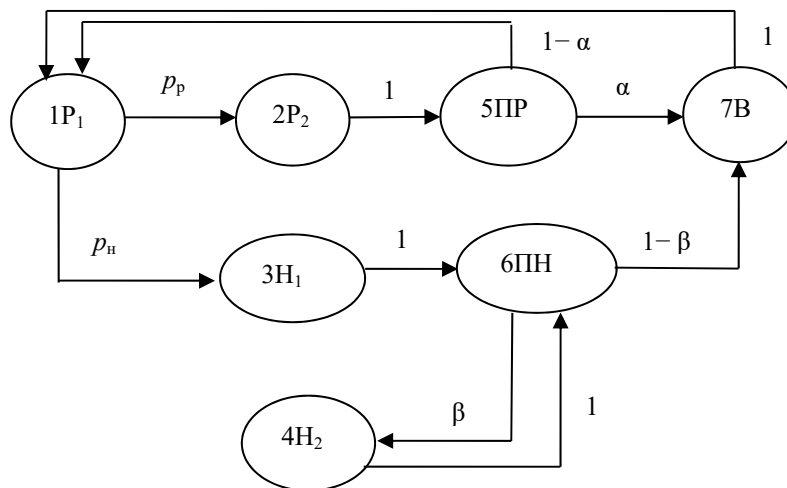


Рис. 1. Диаграмма состояний объекта

Из приведенной диаграммы видно, что работоспособное состояние является начальным после восстановления или очередной проверки работоспособного объекта. Следующий за этим период может быть работоспособным (переход $1 \rightarrow 2$) или с отказом (переход $1 \rightarrow 3$). Таким образом, работоспособное состояние 2 и неработоспособное состояние 3 – это состояния в конце периода.

После состояний 2 и 3 в рамках контроля технического состояния производится проверка соответственно работоспособного и неработоспособного объекта. Если объект является работоспособным, то после проверки он направляется или на функционирование, или на восстановление в результате ошибки контроля I рода. Если же проверке подвергается неработоспособный объект, то он направляется на восстановление или продолжается его использование в неработоспособном состоянии в результате ошибки контроля II рода. После восстановления объект всегда направляется на функционирование в работоспособном состоянии.

Метод исследования

В данной модели имеют место события, происходящие в непрерывном и дискретном времени. Отказ объекта на работоспособном периоде происходит в непрерывном времени, однако переходы

$1 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 3$, $6 \rightarrow 4$ происходят в дискретном времени. Поскольку принято, что время проверки и время восстановления являются пренебрежимо малыми, то фактически происходит отражение от состояний 5, 6, 7 после попадания в них. Переходы между состояниями описаны с помощью полумарковского процесса [11–13]. Исходными характеристиками при этом являются переходные вероятности, названные вероятностями проходов. Вероятность прохода q_{ij} – это вероятность перехода из i -го состояния в j -е состояние при условии, что происходит выход из i -го состояния. Вероятности проходов приведены на диаграмме состояний. По этой диаграмме формируется матрица вероятностей проходов Q .

В данной модели применен метод относительных частот, основанный на использовании вероятностей проходов [14, 15].

Пусть U – некоторое множество несущественных состояний. В матрице вероятностей проходов на множестве U , Q_{UU} отображены переходы только между состояниями множества U . По матрице Q_{UU} находится матрица относительных частот N_U множества U :

$$N_U = \|n_U(i, j)\| = (E - Q_{UU})^{-1}, \quad (5)$$

где $n_U(i, j)$ – среднее число вхождений (попаданий) в j -е состояние до выхода из множества U при условии, что i -е состояние является начальным при вхождении в множество U . Элементы матрицы относительных частот названы относительными частотами состояний. Если известно начальное распределение вероятностей состояний $q(0)$, то относительные частоты состояний можно представить в виде строки

$$n_U = \|n_U(j)\| = q(0) \cdot N_U. \quad (6)$$

Разобьем множество состояний на два подмножества: $U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $V = \{7\}$. В результате такого разбиения эксплуатацию объекта можно представить в виде последовательных переходов между этими подмножествами: $U \rightarrow V \rightarrow U \rightarrow V \dots$. Будем называть циклом нахождение объекта в состояниях подмножества U и следующее за ним нахождение в состояниях подмножества V . Из диаграммы рис. 1 следует, что подмножество U всегда начинается с состояния 1.

Матрицы вероятностей проходов на всем множестве состояний и на подмножестве U , Q и Q_{UU} соответственно:

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & p_p & p_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 & 1-\beta \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad Q_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & p_p & p_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

По матрице Q_{UU} вычисляется матрица относительных частот N_U по формуле (5). Поскольку состояние 1 всегда является начальным при переходе $V \rightarrow U$, то средними относительными частотами состояний являются элементы первой строки матрицы N_U :

$$n_U = \|n_U(j)\| = \frac{1}{1 - (1-\alpha) \cdot p_p} \cdot \|1 \quad p_p \quad p_n \quad \frac{\beta \cdot p_n}{1-\beta} \quad p_p \quad \frac{p_n}{1-\beta}\|. \quad (7)$$

Средние относительные частоты состояний:

$$\begin{aligned} n_U(1) &= \frac{1}{A}; \quad n_U(2) = n_U(5) = \frac{e^{-\lambda T}}{A}; \quad n_U(3) = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{A}; \\ n_U(4) &= \frac{\beta \cdot (1 - e^{-\lambda T})}{(1-\beta) \cdot A}; \quad n_U(6) = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{(1-\beta) \cdot A}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $A = 1 - (1-\alpha) \cdot e^{-\lambda T}$.

Показатели надежности объекта

Показатели надежности будем определять через временные характеристики состояний. Среднее время нахождения в одном состоянии на одном цикле определяется произведением средней относительной частоты состояния и среднего времени нахождения в этом состоянии после попадания в него.

В рамках приведенной модели будут вычислены:

- средняя продолжительность работоспособного и неработоспособного состояний;
- среднее время цикла;
- коэффициент готовности и коэффициент неготовности.

Средние относительные частоты периодов на одном цикле: $n_U(2)$ – среднее число работоспособных периодов; $n_U(3)$ – среднее число периодов с отказом; $n_U(4)$ – среднее число неработоспособных периодов. В соответствии с принятыми допущениями продолжительность каждого из этих периодов равна T . Исходя из этих представлений получаем расчетные формулы для среднего времени работоспособных и неработоспособных состояний на одном цикле t_p и t_n соответственно:

$$t_p = n_U(2) \cdot T + n_U(3) \cdot \theta_p = \frac{\lambda \cdot T \cdot e^{-\lambda T} + (1 - e^{-\lambda T})^2}{\lambda \cdot A}; \quad (9)$$

$$t_n = n_U(3) \cdot \theta_n + n_U(4) \cdot T = \frac{\lambda \cdot T - (1 - \beta) \cdot (1 - e^{-\lambda T})}{(1 - \beta) \cdot \lambda \cdot A} \cdot (1 - e^{-\lambda T}). \quad (10)$$

Сумма этих времен составляет среднее время цикла эксплуатации:

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_n = \frac{1 - \beta \cdot e^{-\lambda T}}{(1 - \beta) \cdot A} \cdot T. \quad (11)$$

Пояснение. Среднее время цикла – это среднее время между восстановлениями объекта. По нему можно определить среднюю частоту восстановлений – среднее число восстановлений в единицу времени. В частном случае, при $\beta = 0$ среднее время цикла составляет $T/A = n_U(1) \cdot T$, что соответствует концептуальной модели.

Коэффициент готовности K_r и коэффициент неготовности K_n :

$$K_r = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} = \frac{1 - \beta}{1 - \beta \cdot e^{-\lambda T}} \cdot \frac{\lambda \cdot T \cdot e^{-\lambda T} + (1 - e^{-\lambda T})^2}{\lambda \cdot T}; \quad (12)$$

$$K_n = \frac{t_n}{t_{\text{ц}}} = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{1 - \beta \cdot e^{-\lambda T}} \cdot \frac{\lambda \cdot T - (1 - \beta) \cdot (1 - e^{-\lambda T})}{\lambda \cdot T}. \quad (13)$$

Проверка показывает, что $K_r + K_n = 1$.

Результаты исследования

Введем новый параметр $\rho = \lambda \cdot T$, который назовем приведенной интенсивностью отказов. Приведенная интенсивность отказов – это среднее число отказов за период T . Использование одного параметра вместо двух позволяет упростить исследование. Выразим через параметр ρ показатели надежности. Соответствующие формулы приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены значения коэффициента неготовности в зависимости от ошибок контроля II рода при одной и той же приведенной интенсивности отказов $\rho = 10^{-3}$. Видно, что коэффициент неготовности существенно зависит от ошибок контроля II рода: порядок коэффициента неготовности изменяется от 10^{-7} до 10^{-3} при возрастании вероятности ошибок контроля II рода. Однако коэффициент неготовности не зависит от ошибок контроля I рода, так как временные характеристики (t_p , t_n , $t_{\text{ц}}$) зависят пропорционально от вероятности ошибок контроля I рода.

Таблица 1

Показатели надежности объекта, выраженные с помощью приведенной интенсивностью отказов

Показатель надежности	Формулы для вычисления
1. Среднее время цикла	$t_{\text{ц}} = \frac{1-\beta \cdot e^{-\rho}}{(1-\beta) \cdot A} \cdot T$
2. Среднее время работоспособного состояния на одном цикле	$t_{\text{р}} = \frac{\rho \cdot e^{-\rho} + (1-e^{-\rho})^2}{\rho \cdot A} \cdot T$
3. Среднее время неработоспособного состояния на одном цикле	$t_{\text{н}} = \frac{\rho - (1-\beta) \cdot (1-e^{-\rho})}{(1-\beta) \cdot \rho \cdot A} \cdot (1-e^{-\rho}) \cdot T$
4. Коэффициент готовности	$K_{\text{г}} = \frac{1-\beta}{1-\beta \cdot e^{-\rho}} \cdot \frac{\rho \cdot e^{-\rho} + (1-e^{-\rho})^2}{\rho}$
5. Коэффициент неготовности	$K_{\text{н}} = \frac{\rho - (1-\beta) \cdot (1-e^{-\rho})}{1-\beta \cdot e^{-\rho}} \cdot \frac{1-e^{-\rho}}{\rho}$

Таблица 2

Значения коэффициента неготовности при разных значениях вероятностей ошибок контроля и при $\rho = 10^{-3}$

β	0	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$K_{\text{н}}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$

В табл. 3 приведены значения среднего времени неработоспособного состояния, отнесенные к единице времени между проверками ($t_{\text{н}}/T$). Видно, что среднее время неработоспособного состояния на одном цикле существенно зависит от ошибок контроля I и II рода. С ростом вероятности ошибок контроля II рода среднее время неработоспособного состояния существенно увеличивается (по данным таблицы на 3 порядка). Однако возрастание вероятности ошибок контроля I рода приводит к уменьшению среднего времени неработоспособного состояния ввиду того, что уменьшается время цикла или увеличивается частота восстановлений (см. диаграмму состояний объекта).

Пусть при $\rho = 0,001$ и при заданных значениях α и β обеспечивается определенное значение среднего времени неработоспособного состояния $t_{\text{н}}$ на одном цикле. Если при этом $\lambda = 0,001$ 1/ч, то следует выбрать периодичность проверки $T = 1$ ч. Если $\lambda = 10^{-4}$ 1/ч, то проверки можно проводить через каждые 10 ч. Если же $\lambda = 0,01$ 1/ч, то периодичность проверок должна быть уменьшена до 6 мин для обеспечения выбранного значения $t_{\text{н}}$.

Таблица 3

Значения параметра $t_{\text{н}}/T$

β α	0	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,112	0,25	0,43	0,67	1
0,01	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,02	0,04	0,06	0,091
0,05	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,02
0,1	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$
0,2	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
0,3	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
0,4	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
0,5	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Заключение

В заключение можно сделать выводы, свидетельствующие о новизне и полезности проведенного исследования:

1. При проектировании или при совершенствовании обслуживания сложных систем следует принимать во внимание не только коэффициенты готовности или неготовности, но и временные характеристики, связанные с надежностью. Представленная модель позволяет рассчитать и спрогнозировать такие показатели с учетом интенсивности отказов, периодичности проверок и вероятностей ошибок контроля I и II рода.

2. В статье использован параметр «приведенная интенсивность отказов», позволяющий объединить интенсивность отказов и периодичность проверок.

3. Достоинством модели является возможность ее реализации матричными методами с использованием компьютерного моделирования.

4. На основе приведенной модели получены расчетные формулы для показателей надежности и проведены иллюстративные расчеты при конкретных значениях исходных параметров.

Следует отметить, что модели надежности реальных систем являются более сложными. Эти модели могут быть построены на основе и с использованием идей приведенной модели. В частности, в этих моделях может быть учтено время восстановления, которое может быть случайным с заданным распределением или фиксированным. Для планирования объемов работ по обслуживанию эксплуатации оборудования целесообразно использовать частоту восстановления – число восстановлений в единицу времени.

Библиографический список

1. Шалин, А. И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем / А. И. Шалин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 114 с.
2. Шнеерзон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерзон. – Москва : Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
3. Егунов, М. М. Резервирование и восстановление в телекоммуникационных сетях / М. М. Егунов, В. П. Шувалов // Вестник СибГУТИ. – 2012. – № 2. – С. 3–9.
4. Зверев, Г. Я. Оценка надежности изделия в процессе эксплуатации / Г. Я. Зверев. – Москва : URSS, 2010. – 96 с.
5. Махитько, В. П. Методы оценки показателей надежности изделий по результатам испытаний и эксплуатации / В. П. Махитько, М. В. Засканов, М. В. Савин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – С. 293–299.
6. Чекмарев, Ю. В. Надежность информационных систем / Ю. В. Чекмарев. – Москва : Дик Пресс, 2012. – 252 с.
7. Лубков, Н. В. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем / Н. В. Лубков, И. Б. Спиридонов, А. С. Степанянц // Труды МАИ. – 2016. – Вып. 85. – С. 1–27.
8. Шайхутдинов, Д. В. Методы мониторинга и диагностики сложных технических систем на базе имитационного моделирования / Д. В. Шайхутдинов // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 11, ч. 1. – С. 146–153.
9. Острейковский, В. А. Теория надежности / В. А. Острейковский. – Москва : Высш. шк., 2003. – 463 с.
10. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. М. Гуров. – Санкт-Петербург, 2006. – 560 с.
11. Королюк, В. С. Полумарковские процессы и их приложения / В. С. Королюк, А. Ф. Турбин. – Киев : Наукова думка, 1986. – 320 с.
12. Сильвестров, Д. С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний / Д. С. Сильвестров. – Москва : Сов. радио, 1980. – 272 с.
13. Ивченко, Г. И. Теория массового обслуживания / Г. И. Ивченко, В. А. Каштанов, И. Н. Коваленко. – Москва : Высш. шк., 2012. – 304 с.
14. Зеленцов, Б. П. Матричные методы моделирования однородных марковских процессов / Б. П. Зеленцов. – Palmarium Academic Publishing, 2017. – 133 с.
15. Зеленцов, Б. П. Метод относительных частот моделирования вероятностных систем / Б. П. Зеленцов // Вестник СибГУТИ. – 2017. – № 2. – С. 51–63.

References

1. Shalin A. I. *Nadezhnost' i diagnostika releynoy zashchity energosistem* [Reliability and diagnostics of power system relay protection]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2003, 114 p. [In Russian]
2. Shneerzon E. M. *Tsifrovaya releynaya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007, 549 p. [In Russian]
3. Egunov M. M., Shuvalov V. P. *Vestnik SibGUTI* [Vestnik SibSUTI]. 2012, no. 2, pp. 3–9. [In Russian]
4. Zverev G. Ya. *Otsenka nadezhnosti izdeliya v protsesse ekspluatatsii* [Evaluation of product reliability during operation]. Moscow: URSS, 2010, 96 p. [In Russian]

5. Makhit'ko V. P., Zaskanov M. V., Savin M. V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [News of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]. 2011, pp. 293–299. [In Russian]
6. Chekmarev Yu. V. *Nadezhnost' informatsionnykh sistem* [Reliability of information systems]. Moscow: Dik Press, 2012, 252 p. [In Russian]
7. Lubkov N. V., Spiridonov I. B., Stepanyants A. S. *Trudy MAI* [Works of MAI]. 2016, iss. 85, pp. 1–27. [In Russian]
8. Shaykhutdinov D. V. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. 2018, no. 11, part 1, pp. 146–153. [In Russian]
9. Ostreykovskiy V. A. *Teoriya nadezhnosti* [Reliability theory]. Moscow: Vyssh. shk., 2003, 463 p. [In Russian]
10. Polovko A. M., Gurov S. M. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. Saint-Petersburg, 2006, 560 p. [In Russian]
11. Korolyuk V. S., Turbin A. F. *Polumarkovskie protsessy i ikh prilozheniya* [Fundamentals of reliability theory]. Kiev: Naukova dumka, 1986, 320 p. [In Russian]
12. Sil'vestrov D. S. *Polumarkovskie protsessy s diskretnym mnozhestvom sostoyaniy* [Semi-Markov processes with a discrete set of states]. Moscow: Sov. radio, 1980, 272 p. [In Russian]
13. Ivchenko G. I., Kashtanov V. A., Kovalenko I. N. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queueing theory]. Moscow: Vyssh. shk., 2012, 304 p. [In Russian]
14. Zelentsov B. P. *Matrichnye metody modelirovaniya odnorodnykh markovskikh protsessov* [Matrix methods for modeling homogeneous Markov processes]. Palmarium Academic Publishing, 2017, 133 p. [In Russian]
15. Zelentsov B. P. *Vestnik SibGUTI* [Vestnik SibSUTI]. 2017, no. 2, pp. 51–63. [In Russian]

Зеленцов Борис Павлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра высшей математики,
Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
(Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86)
E-mail: zelentsovb@mail.ru

Zelentsov Boris Pavlovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of higher mathematics,
Siberian State University
Telecommunications and Computer Science
(86 Kirova street, Novosibirsk, Russia)

Образец цитирования:

Зеленцов, Б. П. Модель надежности объекта при недостоверном контроле / Б. П. Зеленцов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 46–54. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-6.