УДК 519.872.8

Исследование влияния способа задания периодичности проверок на надежность объекта

Б. П. Зеленцов, А. С. Трофимов

Приведена аналитическая модель функционирования одиночного объекта в условиях контроля технического состояния. Рассмотрены два варианта модели: при постоянном периоде между проверками и при периоде, распределенном по показательному закону. Проведено сравнение этих вариантов и сделаны соответствующие выводы о влиянии характера периодического контроля на уровень надёжности.

Ключевые слова: периодический контроль состояния, постоянный период контроля, период контроля, распределенный по показательному закону.

1. Введение

Для обеспечения необходимого уровня надёжности производится контроль состояния, под которым понимают операции, выполняемые автоматически или вручную с целью определения и квалификации состояния объекта [2]. В статье рассматривается функционирование объекта в условиях периодического контроля технического состояния путём проведения проверок. Такой контроль проводится во многих областях деятельности. В качестве примеров можно привести проведение проверок в следующих областях: различные виды медицинского диагностирования, функционирование электронного оборудования, программное обеспечение компьютеров, металлодетекторы, досмотр пассажиров и багажа, биометрическое сканирование, радиолокация, системы противопожарной безопасности, электрические сети, станции и подстанции и др. Результаты конкретных исследований, связанных с периодичностью профилактических мероприятий, достоверностью, полнотой и глубиной контроля приведены, например, в [6, 8].

Целью статьи является исследование способа задания периодичности проверок на надёжность объекта. Проверки технического состояния объекта могут производиться с постоянным, заранее установленным периодом или со случайным периодом. Периодический контроль со случайным периодом зачастую принимается распределенным по показательному закону, в результате обнаружение отказа задерживается на случайное время, распределенное по показательному закону. В статье проведено сравнение этих способов задания периодичности проверок и сделаны соответствующие выводы.

Математическая модель базируется на теории однородных марковских процессов в непрерывном времени. Переходы между состояниями описаны системой дифференциальных уравнений. Такой подход используется многими авторами при составлении моделей надёжности сложных систем (см., напр., [5–9].

2. Диаграмма состояний

Объект используется по назначению и периодически подвергается проверкам. Между проверками может произойти отказ объекта, в результате чего он переходит из работоспособного состояния в неработоспособное. 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 проверяется неработоспособный объект, то он направляется на восстановление, после которого возвращается на функционирование в работоспособное состояние. Диаграмма состояний объекта с такими условиями приведена на рис. 1.

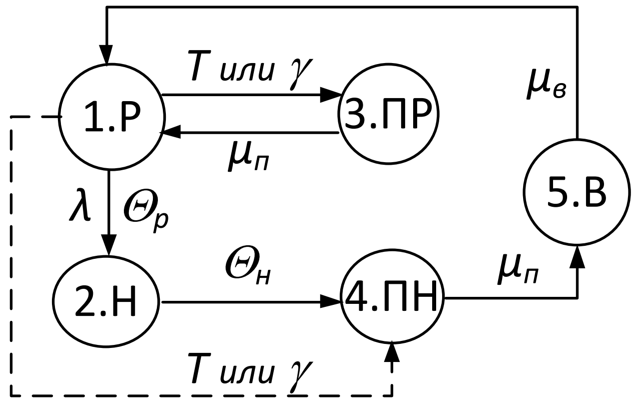

Рис. 1. Диаграмма состояний объекта

На диаграмме обозначено: Р – работоспособное состояние, Н – неработоспособное состояние, ПР – проверка работоспособного объекта, ПН – проверка неработоспособного объекта, В – восстановление объекта, *T* – постоянный период между проверками, γ – интенсивность начала проверки с периодом, распределённым по показательному закону, λ – интенсивность отказов, $\mu_в$ – интенсивность завершения восстановления, $\mu_п$ – интенсивность завершения проверки, $\theta_р$ – средняя продолжительность работоспособного состояния до отказа объекта, $\theta_н$ – средняя продолжительность неработоспособного состояния, то есть среднее время между моментом наступления отказа и началом проверки.

Будем называть периодом интервал времени между двумя последовательными проверками или между завершением восстановления и следующей проверкой. На одном периоде отказ может произойти или не произойти. Если отказ не происходит, то имеет место проверка работоспособного объекта в конце периода (переход $1 \to 3$). Если же отказ произойдёт, то имеет место переход $1 \to 2 \to 4$, то есть на проверку в конце периода объект попадает в неработоспособном состоянии. Таким образом, целесообразно выделить периоды двух типов: периоды без отказа и периоды с отказом. На диаграмме состояний период с отказом показан пунктирной линией. Видно, что период с отказом состоит из двух частей: нахождение в работоспособном состоянии и нахождение в неработоспособном состоянии. Средние продолжительности этих состояний на периоде с отказом обозначены через $\theta_р$ и $\theta_н$.

В течение одного периода объект используется по назначению, находясь в состояниях 1 или 2. Эксплуатацию объекта во времени можно представить в виде циклов. Восстановление, являющееся видом технического обслуживания, прерывает использование объекта по назначению. Циклом эксплуатации объекта будем называть его использование по назначению совместно с проверками и следующее за этим восстановление. В соответствии с этим множество состояний разбивается на два подмножества: $U = \{1, 2, 3, 4\}$; $V = \{5\}$. Таким образом, цикл эксплуатации объекта заключается в нахождении в подмножестве U и следующем за ним нахождении в подмножестве V. Другими словами, цикл эксплуатации состоит из нескольких периодов между двумя восстановлениями и самого восстановления.

Отказ объекта происходит на последнем периоде каждого цикла, так как после отказа объект всегда направляется на восстановление. Следует отметить, что число периодов без отказа на одном цикле является случайным, а период с отказом всегда один на одном цикле. Продолжительность периодов без отказа и с отказом остается одной и той же. На периоде с отказом происходит переход в состояние 2 с интенсивностью λ, при этом объект остается в состоянии 2 до проведения очередной проверки, после которой имеет место восстановление. Таким образом, продолжительность периода не зависит от отказа объекта.

Для расчёта надёжности в статье рассмотрены характеристики состояний 1 и 2 как на отдельных периодах, так и на цикле. Из диаграммы видно, что начало отсчёта любого периода начинается с состояния 1.

Рассмотрим периодический контроль, при котором проверки проводятся с постоянным периодом.

3. Периодический контроль с постоянным периодом

Проверки проводятся с постоянным периодом T, который отсчитывается от завершения восстановления или от завершения очередной проверки работоспособного объекта. Таким образом, постоянный период проверок отсчитывается от момента попадания в работоспособное состояние.

При периодическом контроле с постоянным периодом процесс протекает на интервале времени $[0; T]$. На этом интервале объект может находиться в состояниях 1 или 2. Переход в состояние очередной проверки может произойти только в момент времени $t = T$, отсчитываемый от завершения предыдущей проверки. Если на интервале $[0; T]$ отказ не происходит, то в момент времени $t = T$ объект переходит в состояние 3. Если же на интервале $[0; T]$ наступает отказ, то после этого объект остается в состоянии 2 и затем в момент времени $t = T$ переходит в состояние 4. Следует отметить, что как при отсутствии отказа, так и при наступлении отказа на периоде состояние 1 является начальным при $t = 0$. Дифференциальные уравнения равновесия на интервале $[0; T]$:

$$p'_1(t) = -\lambda p_1(t); \qquad p'_2(t) = \lambda p_1(t). \tag{1}$$

Решение этих уравнений при начальных условиях $p_1(0) = 1$, $p_2(0) = 0$ имеет вид:

$$p_1(t) = e^{-\lambda t}; \qquad p_2(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \tag{2}$$

Возможны следующие переходы на интервале $[0; T]$:

1) если на этом интервале отказ не произойдет, то в конце интервала при $t = T$ производится проверка работоспособного объекта (переход $1 \to 3$);

2) если произойдет отказ, то в конце интервала при $t = T$ производится проверка неработоспособного объекта (переход $1 \to 4$).

Итак, на очередную проверку объект может попасть в момент времени $t = T$, отсчитываемый от завершения восстановления или от завершения очередной проверки. Вероятности этих переходов названы вероятностями прохождений полумарковского процесса [3, 4]:

$$p_{13} = p_1(T) = e^{-\lambda T}; \qquad p_{14} = p_2(T) = 1 - e^{-\lambda T}. \tag{3}$$

Матрица вероятностей прохождений P на множестве состояний и матрица вероятностей прохождений P_{UU} на подмножестве U имеют вид:

$$P = \left\| p_{ij} \right\| = \begin{pmatrix} 0 & 0 & e^{-\lambda T} & 1-e^{-\lambda T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \qquad P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & e^{-\lambda T} & 1-e^{-\lambda T} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \tag{4}$$

где p_{ij} – условная вероятность непосредственного перехода из i-го состояния в j-е состояние при условии, что i-е состояние меняется. Вероятности прохождений описывают процесс в момент перемены состояния, поэтому $p_{ii} = 0$ для всех i. Вероятности p_{ij} называют ещё переходными вероятностями вложенной цепи.

По матрице P_{UU} находится матрица относительных частот подмножества U [3, 4]:

$$N_U = \|n_U(i,j)\| = (E - P_{UU})^{-1} = \begin{pmatrix} 1/(1-e^{-\lambda T}) & 0 & e^{-\lambda T}/(1-e^{-\lambda T}) & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1/(1-e^{-\lambda T}) & 0 & 1/(1-e^{-\lambda T}) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{5}$$

где $n_U(i,j)$ – средняя относительная частота j-го состояния, определяемая как среднее число попаданий (вхождений) в j-е состояние до выхода из подмножества U при условии, что i-е состояние является начальным при вхождении в подмножество U; E – единичная матрица.

Поскольку состояние 1 всегда является начальным при переходе $V \to U$, то средние относительные частоты состояний можно представить одной строкой, которая является первой строкой матрицы N_U:

$$\bar{n}_U = \|n_U(1,j)\| = \left\| 1/(1-e^{-\lambda T}) \quad 0 \quad e^{-\lambda T}/(1-e^{-\lambda T}) \quad 1 \right\|. \tag{6}$$

Выразим средние относительные частоты состояний через исходные параметры:

$$n_U(1{,}1) = \frac{1}{1-e^{-\lambda T}}; \qquad n_U(1{,}3) = \frac{e^{-\lambda T}}{1-e^{-\lambda T}}; \qquad n_U(1{,}4) = 1. \tag{7}$$

Для лучшего понимания полученного результата отметим следующее:

а) на одном цикле имеет место одно попадание в состояние 4;

б) среднее число попаданий в состояние 1 всегда больше числа проверок работоспособного объекта на одну проверку;

в) среднее число периодов без отказа равно $n_U(1{,}3)$;

г) один цикл эксплуатации объекта содержит в среднем $n_U(1{,}1)$ периодов;

д) отказ объекта обнаруживается системой контроля на последнем периоде.

Время нахождения в состоянии 1 на одном цикле состоит из $n_U(1{,}3)$ периодов без отказа с продолжительностью T плюс время нахождения в этом состоянии на последнем периоде. На последнем периоде средние времена нахождения в состояниях 1 и 2 (соответственно $\theta_р$ и $\theta_н$) определяются интегрированием вероятностей в состояниях 1 и 2 на постоянном периоде:

$$\theta_р = \int_0^T p_1(t)\mathrm{d}t = \frac{1-e^{-\lambda T}}{\lambda}; \qquad \theta_н = \int_0^T p_2(t)\mathrm{d}t = \frac{\lambda T - (1-e^{-\lambda T})}{\lambda}. \tag{8}$$

Среднее время нахождения в работоспособном и неработоспособном состояниях на одном цикле ($t_р$ и $t_н$ соответственно) определяются относительными частотами этих состояний и временами $\theta_р$ и $\theta_н$:

$$t_р = T \cdot n_U(1{,}3) + \theta_р = \frac{\lambda T e^{-\lambda T} + (1-e^{-\lambda T})^2}{\lambda(1-e^{-\lambda T})}; \qquad t_н = \theta_н = \frac{\lambda T - (1-e^{-\lambda T})}{\lambda}. \tag{9}$$

где $t_р$ – среднее время нахождения в состоянии 1 на одном цикле при условии, что состояние 1 является начальным состоянием цикла; $t_н$ – среднее время нахождения в состоянии 2 на одном цикле при условии, что состояние 1 является начальным состоянием цикла.

При расчете коэффициента готовности и коэффициента неготовности могут исключаться планируемые периоды, при которых применение объекта по назначению не предусматривается [1]. В состояниях 3, 4 и 5 применение объекта по назначению не предусматривается. Исключение времени нахождения в этих состояниях в рассматриваемой модели производится с помощью допущения: $\mu_п = \infty$ и $\mu_в = \infty$. Это допущение можно сформулировать следующим равносильным образом: продолжительность состояний проверки и восстановления является пренебрежимо малой по сравнению с продолжительностями состояний 1 и 2. При этом допущении среднее время одного цикла или среднее время нахождения в подмножестве U находится путём суммирования средней продолжительности работоспособного состояния и средней продолжительности неработоспособного состояния:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{р}} + t_{\text{н}} = \frac{T}{1-e^{-\lambda T}}. \qquad (10)$$

Стационарный коэффициент готовности (коэффициент неготовности) выражен как отношение средней продолжительности работоспособного состояния (неработоспособного состояния) к сумме средней продолжительности работоспособного состояния и средней продолжительности неработоспособного состояния [2]:

$$K_{\text{г}} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{\lambda T e^{-\lambda T} + (1-e^{-\lambda T})^2}{\lambda T}; \qquad K_{\text{н}} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{[\lambda T - (1-e^{-\lambda T})](1-e^{-\lambda T})}{\lambda T}. \qquad (11)$$

Видно, что $K_{\text{г}} + K_{\text{н}} = 1$.

4. Периодический контроль со случайным периодом

Отличительная особенность этого варианта заключается в том, что продолжительность одного периода, то есть время до очередной проверки, распределено по показательному закону с постоянной интенсивностью γ. В математических моделях на основе однородных марковских процессов в непрерывном времени принято, что продолжительность всех состояний распределена по показательному закону с постоянной интенсивностью. Это положение принято в данной модели, при этом время t на одном периоде отсчитывается от момента попадания в состояние 1. Таким образом, переходы между состояниями $1 \to 3$ и $2 \to 4$ происходят в непрерывном времени с постоянной интенсивностью γ. Система дифференциальных уравнений на одном периоде имеет вид:

$$p'_1(t) = -(\lambda+\gamma)p_1(t); \quad p'_2(t) = \lambda p_1(t) - \gamma p_2(t); \quad p'_3(t) = \gamma p_1(t); \quad p'_4(t) = \gamma p_2(t). \qquad (12)$$

Решение этой системы уравнений при начальных условиях $p_1(0) = 1$:

$$\left.\begin{aligned} & p_1(t) = e^{-(\lambda+\gamma)t}; \; p_2(t) = (1-e^{-\lambda t})e^{-\gamma t}; \\ & p_3(t) = \frac{\gamma[1-e^{-(\lambda+\gamma)t}]}{\lambda+\gamma}; \; p_4(t) = \frac{\lambda + \gamma e^{-(\lambda+\gamma)t} - (\lambda+\gamma)e^{-\gamma t}}{\lambda+\gamma}. \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

Очевидно, что сумма вероятностей $p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) = 1$.

Вероятности прохождений, или вероятности переходов, $1 \to 3$ и $1 \to 4$ принимают значения соответствующих вероятностей на интервале $[0; \infty)$:

$$p_{13} = p_3(\infty) = \frac{\gamma}{\lambda+\gamma}; \quad p_{14} = p_4(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda+\gamma}. \qquad (14)$$

Матрица P вероятностей прохождений на множестве состояний и матрица P_{UU} вероятностей прохождений на подмножестве U формируются аналогично:

$$P = \|p_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \gamma/(\lambda+\gamma) & \lambda/(\lambda+\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \gamma/(\lambda+\gamma) & \lambda/(\lambda+\gamma) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (15)$$

Первая строка матрицы относительных частот $N_U = (E - P_{UU})^{-1}$ имеет вид:

$$\bar{n}_U = \|n_U(1, j)\| = \left\| \frac{\lambda+\gamma}{\lambda} \quad 0 \quad \frac{\gamma}{\lambda} \quad 1 \right\|. \qquad (16)$$

Средние относительные частоты состояний вычисляются по формулам:

$$n_U(1{,}1) = \frac{\lambda+\gamma}{\lambda}; \quad n_U(1{,}3) = \frac{\gamma}{\lambda}; \qquad n_U(1{,}4) = 1. \tag{17}$$

Видно, что $n_U(1{,}3) + n_U(1{,}4) = n_U(1{,}1)$, то есть на одном цикле всегда одно попадание в состояние 4, а среднее число попаданий в состояние 3 меньше среднего числа попаданий в состояние 1 на одно попадание.

Перейдём к временам нахождения в состояниях на одном периоде.

Среднее время периода с отказом, также равного 1/γ, состоит из двух частей: среднего времени $\theta_р$ нахождения в состоянии 1 и среднего времени $\theta_н$ нахождения в состоянии 2. Средние времена $\theta_р$ и $\theta_н$ определяются вероятностями нахождения в состояниях 1 и 2 на последнем периоде:

$$\theta_р = \int_0^\infty p_1(t)\mathrm{d}t = \frac{1}{\lambda+\gamma}; \qquad \theta_н = \int_0^\infty p_2(t)\mathrm{d}t = \frac{\lambda}{(\lambda+\gamma)\gamma}. \tag{18}$$

Видно, что $\theta_р + \theta_н = 1/\gamma$, то есть сумма средних времён состояний 1 и 2 на последнем периоде равна среднему периоду, который не зависит от того, наступил отказ или не наступил.

Средние времена нахождения в состояниях 1 и 2 на одном цикле, соответственно $t_р$ и $t_н$, вычисляются по формулам:

$$t_р = n_U(1{,}3)/\gamma + \theta_р = \frac{2\lambda+\gamma}{\lambda(\lambda+\gamma)}; \quad t_н = \theta_н = \frac{\lambda}{(\lambda+\gamma)\gamma}. \tag{19}$$

Среднее время цикла:

$$t_ц = t_р + t_н = \frac{\lambda+\gamma}{\lambda\cdot\gamma}. \tag{20}$$

Коэффициенты готовности и неготовности:

$$K_г = \frac{t_р}{t_ц} = \frac{(2\lambda+\gamma)\gamma}{(\lambda+\gamma)^2}; \quad K_н = \frac{t_н}{t_ц} = \frac{\lambda^2}{(\lambda+\gamma)^2}. \tag{21}$$

Видно, что $K_г + K_н = 1$.

Замечание. Среднее время цикла может быть получено также с учётом того, что продолжительность периода не зависит от того, наступил или не наступил отказ:

$$t_ц = n_U(1{,}1)\cdot(1/\gamma) = \frac{\lambda+\gamma}{\lambda\cdot\gamma}. \tag{22}$$

где 1/γ – средняя продолжительность периода между проверками.

5. Сравнение способов задания периодичности проверок

Для сравнения способов задания периодичности проверок введём параметр ρ, который назовём приведённой интенсивностью отказов объекта: $\rho = \lambda\cdot T$ для периодического контроля с постоянным периодом и $\rho = \lambda/\gamma$ для периодического контроля со случайным периодом. Смысл этого параметра заключается в следующем: для периодического контроля с постоянным периодом это среднее число отказов объекта за постоянный период, а для периодического контроля со случайным периодом – среднее число отказов объекта за среднее время между проверками. Сравнение способов задания периодичности проверок будем проводить по параметру ρ. При одной и той же интенсивности отказов и при равенстве параметров ρ сравнение происходит при условии, что постоянный период между поверками равен среднему времени между проверками: $T = 1/\gamma$. Формулы для вычисления показателей эксплуатации и надёжности с использованием параметра ρ приведены в табл. 1.

Таблица1. Вычисление показателей эксплуатации и надёжности с помощью параметра ρ

Показатель	Проверки с постоянным периодом ($\rho = \lambda \cdot T$)	Проверки со случайным периодом ($\rho = \lambda/\gamma$)
Коэффициент готовности	$[\rho \cdot e^{-\rho} + (1-e^{-\rho})^2]/\rho$	$(1+2\rho)/(1+\rho)^2$
Коэффициент неготовности	$[(\rho-(1-e^{-\rho}))(1-e^{-\rho})]/\rho$	$\rho^2/(1+\rho)^2$
Среднее время цикла	$T/(1-e^{-\rho})$	$(1+\rho)/(\rho \cdot \gamma)$
Средняя частота восстановлений	$(1-e^{-\rho})/T$	$(\rho \cdot \gamma)/(1+\rho)$
Среднее число проверок на цикле	$1/(1-e^{-\rho})$	$(1+\rho)/\rho$
Средняя частота проверок	$1/T$	γ

Следует отметить, что формулы для вычисления показателей эксплуатации и надёжности в табл. 2 приведены при ранее принятом допущении о пренебрежимо малой продолжительности состояний проверки и восстановления. При необходимости могут быть учтены продолжительности этих состояний. Например, при расчёте коэффициента технического использования учитывается время простоев, обусловленных проверками и восстановлением объекта [1].

Приведённые результаты позволяют сравнить модели с разными способами задания периодичности проверок по разным показателям. В частности, значения коэффициента неготовности в зависимости от значения параметра ρ приведены в табл. 2. При случайном периоде коэффициент неготовности несколько больше по сравнению с вариантом с постоянным периодом. Это расхождение объясняется тем, что отказ объекта может быть обнаружен в момент времени $t > 1/\gamma$, то есть этот момент времени может быть больше параметра $1/\gamma$, принятого для сравнения способов задания периодичности проверок. Поэтому при одинаковых частотах проверок ($1/T = \gamma$) среднее время нахождения в неработоспособном состоянии на последнем периоде цикла ($\theta_н$) несколько больше для варианта со случайным периодом.

Таблица 2. Значения коэффициента неготовности при разных значениях параметра ρ

ρ	Проверки с постоянным периодом	Проверки со случайным периодом
1	0.23	0.25
10^{-1}	$0.5 \cdot 10^{-2}$	$0.8 \cdot 10^{-2}$
10^{-2}	$0.5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
10^{-3}	$0.5 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
10^{-4}	$0.5 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}

6. Заключение

Итак, приведены модели эксплуатации объекта, который подвергается проверкам с постоянным периодом и с периодом, распределённым по показательному закону. Получены формулы для расчёта коэффициентов готовности и неготовности и некоторых других показателей эксплуатации объекта. В этих формулах использован параметр ρ, названный приведённой интенсивностью отказов объекта. Проведённые расчеты показали, что при достаточно малых значениях этого параметра (10^{-2} и меньше) коэффициент неготовности имеет порядок ρ^2, при этом имеет место двукратное расхождение между значениями коэффициента неготовности при рассмотренных способах задания периодичности проверок.

Литература

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения.
3. *Зеленцов Б. П.* Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017. 133 с.
4. *Зеленцов Б. П.* Метод относительных частот моделирования вероятностных систем // Вестник СибГУТИ. 2017. № 2. С. 51–63.
5. *Истомина А. А., Бадеников В. Я., Истомин А. Л.* Управление товарными запасами на основе теории массового обслуживания // Вестник СибГУТИ. 2017. № 3. С. 94–103.
6. *Лубков Н. В., Спиридонов И. Б., Степанянц А. С.* Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. В. 85.
7. Надежность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985.
8. *Острейковский В. А.* Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
9. *Рахман П. А.* Показатели надёжности восстанавливаемых систем с заданным порогом аварийного отключения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9. С. 467–470.

Статья поступила в редакцию 11.12.2018;
переработанный вариант – 20.01.2019.

Зеленцов Борис Павлович

д.т.н., профессор кафедры высшей математики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 269-39-36, e-mail: zelentsovb@mail.ru.

Трофимов Андрей Сергеевич

к.т.н., доцент кафедры электрических станций НГТУ (630073, Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20), тел. (383) 346-13-73, e-mail: as.trofimov@gmail.com.

Investigation of periodic checking conditions on reliability of an item

B. P. Zelentsov, A. S. Trofimov

An analytic model of an item functioning is represented under two types of periodic checking conditions: check-out operations with regular period and with random period distributed exponentially. The state-transition diagram is given for the periodic checking conditions. The model is based on the theory of semimarkov processes using matrix methods for mathematical operations. Consideration of the model reveals the influence of the checking conditions on the reliability level.

Keywords: periodic checking conditions, regular period of check-out operations, random period of check-out operations.