

# Модель системы мониторинга объекта при недостоверном контроле

**Борис П. Зеленцов**, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация, Новосибирск  
[zelentsov@mail.ru](mailto:zelentsov@mail.ru)



Борис П.  
Зеленцов

**Резюме. Цель.** Проведенное исследование направлено на составление аналитической модели надежности объекта в условиях мониторинга технического состояния с постоянным периодом между проверками и с учетом недостоверного контроля и отказов разного вида. Основное назначение модели – расчет и прогнозирование показателей надежности, зависящих от заданных условий. **Методы.** Модель основана на теории марковских процессов. Применены модели двух типов: модель дискретного процесса в непрерывном времени и полумарковская модель. Математические операции по реализации модели выполнены в матричном виде. Эксплуатация объекта представлена в виде повторяющихся циклов, отделенных друг от друга состоянием восстановления. Модель в непрерывном времени позволяет получить вероятности состояний на периоде между проверками, средние времена нахождения в состояниях и вероятности состояний в конце периода. Вероятности попадания в состояния в конце периода являются исходными для полумарковской модели, с помощью которой получены средние числа попаданий в состояния на одном цикле. **Результаты.** Расчет среднего времени работоспособного и неработоспособного состояний на одном цикле произведен с использованием среднего числа попадания в состояния и среднего времени нахождения в состояниях. На основе этих параметров получены формулы для расчета коэффициента готовности и коэффициента неготовности. Из приведенной модели следует, что показатели надежности зависят от интенсивностей явных и скрытых отказов, периодичности проверок и ошибок контроля. Приведены результаты расчетов для среднего времени цикла и коэффициента неготовности при разных интенсивностях отказов и для разных вероятностей ошибок контроля. Показано, что среднее время цикла существенно зависит от вероятности ошибки контроля I рода и практически не зависит от вероятности ошибки контроля II рода. Однако коэффициент неготовности практически не зависит от вероятности ошибки контроля I рода, однако имеется существенная зависимость от вероятности ошибки контроля II рода. **Выводы.** Представленная модель позволяет рассчитать и спрогнозировать показатели надежности с учетом наличия явных и скрытых отказов и параметров системы мониторинга. При проектировании новых и совершенствовании обслуживания существующих систем следует учитывать влияние различных факторов на уровень надежности.

**Ключевые слова:** мониторинг технического состояния объекта, явные и скрытые отказы, периодичность проверок, ошибки контроля.

**Для цитирования:** Зеленцов Б.П. Модель системы мониторинга объекта при недостоверном контроле // Надежность. 2020. №4. С. 3-12. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-3-12>

Поступила 29.09.2020 г. / После доработки 08.10.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

## Введение

Известно, что надежность объекта зависит не только от видов и параметров отказов, но и от 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.

Во время эксплуатации объект может находиться в разных состояниях при использовании по назначению, подвергаться разным видам технического обслуживания, в том числе проверкам технического состояния. С этой точки зрения эксплуатацию объекта можно представить в виде трех фаз: использование по назначению (функционирование), контроль технического состояния и восстановление.

При использовании объекта по назначению производится мониторинг его технического состояния – процесс наблюдения за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Мониторинг реализуется в виде операций контроля технического состояния, которые проводятся непрерывно или периодически. Рассматривается два варианта технического состояния, связанного с отказами: отказ обнаруживается или не обнаруживается в момент его возникновения. С этой точки зрения говорят о явных и скрытых отказах. Назначение системы мониторинга заключается в том, что периодически проводятся проверки, контроль функционирования, измерения параметров и на основании этого устанавливается факт наличия скрытого отказа.

## Обзор источников

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 [22, 23]. Аналитическая модель функционирования релейной защиты энергосистем, в которой учтены три вида отказов и система контроля работоспособности системы, рассмотрена в [19]. Модель позволила получить частоты отказов и спрогнозировать уровень готовности системы и установить необходимую частоту проверок технического состояния системы релейной защиты.

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 [2].

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.

Во многих исследованиях переходы между состояниями рассматриваются в непрерывном времени. Эти переходы описаны системой дифференциальных уравнений. Этот подход использован в [13, 15, 17] при составлении моделей надежности сложных систем. В [11] на основе системы дифференциальных уравнений описаны различные технические системы.

Системы со встроенным контролем изучались многими авторами. Так, в [16] 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 [12, 18]. В [10] 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.

В работе [13] 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 [21] 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 [15].

С системой мониторинга тесно связаны задачи по эксплуатационным испытаниям, которые являются достоверным источником получения информации об исходных характеристиках надежности [3, 14, 20]. 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.

## Концептуальная модель

Во время функционирования объект может находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном. В неработоспособное состояние объект переходит при наступлении скрытого отказа, который не обнаруживается в момент его возникновения. Такие

отказы обнаруживаются при проверках технического состояния в рамках проведения контрольных операций.

Таким образом, с точки зрения мониторинга технического состояния отказы объекта делятся на два типа: скрытые и явные.

Объект функционирует 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 проверке подвергается неработоспособный объект, то он направляется на восстановление, после которого он возвращается на функционирование.

Наблюдение за объектом во время эксплуатации с целью получения информации о его техническом состоянии производится в следующих случаях:

1) при наступлении скрытого отказа объект переходит в неработоспособное состояние, которое обнаруживается при проведении очередной проверки;

2) при наступлении явного отказа он обнаруживается системой непрерывного мониторинга, после чего объект направляется на восстановление.

Явные отказы обнаруживаются системой непрерывного мониторинга в момент их возникновения, а скрытые отказы обнаруживаются при периодических проверках. Поэтому продолжительность периода между проверками может быть:

- 1) установленной, если явный отказ не произошел;
- 2) меньше установленной, если происходит явный отказ.

В данной модели приняты следующие условия и допущения:

1) при функционировании объекта могут произойти скрытые и/или явные отказы;

2) скрытые и явные отказы происходят с постоянными интенсивностями, то есть отказы наступают в случайный момент времени, а время до отказа распределено по показательному закону;

3) контроль состояния объекта производится с постоянным периодом, при этом начало каждого периода отсчитывается от начала функционирования после восстановления или очередной проверки;

4) при обнаружении отказа объект поступает на восстановление, после которого начинается функционирование в работоспособном состоянии;

5) при проведении периодической проверки возможны ошибки контроля I и II рода;

6) 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.

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

## Методы

Модели, приведенные в данной статье, основаны на теории марковских процессов. Применяются модели двух типов: модель дискретного процесса в непрерывном времени и полумарковская модель.

С помощью марковской модели в непрерывном времени находят вероятности состояний. Исходными являются интенсивности переходов между состояниями  $\lambda_{ij}$ , представленные в виде матрицы интенсивностей

$\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$  на некотором множестве состояний. По матрице  $\Lambda$  находится изображение вероятностей состояний в матричном виде:

$$P(s) = (sE - \Lambda)^{-1} \quad (1)$$

где  $s$  – комплексная переменная преобразования Лапласа;  $E$  – единичная матрица.

С помощью обратного преобразования Лапласа находится матрица вероятностей состояний  $P(t) \div P(s)$ , где

матрица  $P(t) = \|p_{ij}(t)\|$ , элемент  $p_{ij}(t)$  этой матрицы – вероятность того, что в момент времени  $t$  процесс находится в  $j$ -м состоянии при условии, что  $i$ -е состояние является начальным. Если известно начальное распределение вероятностей состояний  $p(0)$ , то вероятности состояний можно представить в виде строки [4, 5]:

$$p(t) = p(0) \times P(t). \quad (2)$$

*Замечание.* Для нахождения вероятностей состояний не требуется составлять и решать систему дифференциальных уравнений. Вероятности состояний находятся с помощью стандартных операций с использованием компьютерной математики.

Далее в данной модели использован метод относительных частот, основанный на теории полумарковских процессов [4, 6]. Исходными параметрами при этом являются вероятности 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.

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  $U$ :

$$N_U = \|n_U(i, j)\| = (E - Q_{UU})^{-1}, \quad (3)$$

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

$$n_U = \|n_U(j)\| = q(0) \cdot N_U. \quad (4)$$

По относительным частотам состояний и вероятностям состояний в непрерывном времени находятся показатели надежности объекта. В рамках приведенной модели будут вычислены:

- средняя продолжительность работоспособного и неработоспособного состояния;
- средняя периодичность восстановления;
- коэффициент готовности и коэффициент неготовности.

Операции, выполняемые при построении модели, могут быть реализованы вручную или в какой-либо системе компьютерной математики.

## Вероятности состояний на одном периоде

На одном периоде могут произойти как скрытые, так и явные отказы, при этом явный отказ может произойти как в работоспособном состоянии, так и в неработоспособном состоянии. Следует иметь в виду, что явный отказ может произойти после скрытого отказа, однако скрытый отказ после явного произойти не может, так как явный отказ обнаруживается системой мониторинга в момент его возникновения и объект направляется на восстановление. Как скрытые, так и явные отказы происходят в течение периода в непрерывном времени.

Пусть работоспособное состояние является начальным на периоде. Диаграмма состояний в непрерывном времени на одном периоде приведена на рис. 1, где обозначено: 1Р – работоспособное состояние; 2С – неработоспособное состояние со скрытым отказом; 3СЯ – состояние с двумя типами отказов; 4Я – состояние только с явным отказом. Переходы между состояниями происходят в результате скрытого и явного отказов в случайное время в течение периода с интенсивностями  $\lambda_c$  и  $\lambda_y$ .

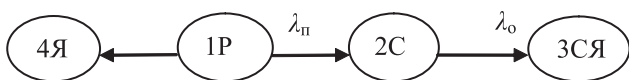


Рис. 1. Диаграмма состояний в непрерывном времени на одном периоде

Исходная матрица интенсивностей переходов на одном периоде:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -\lambda_c - \lambda_y & \lambda_c & 0 & \lambda_y \\ 0 & -\lambda_y & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Выполнив необходимые преобразования (1) и (2), получим вероятности состояний на одном периоде при начальном состоянии 1, которые являются элементами первой строки матрицы  $P(t)$ :

$$p_{11}(t) = \exp(-\lambda \cdot t); \quad p_{12}(t) = \exp(-\lambda_y \cdot t) - \exp(-\lambda \cdot t);$$

$$p_{13}(t) = \frac{\lambda_c}{\lambda} + \frac{\lambda_y}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda \cdot t) - \exp(-\lambda_y \cdot t);$$

$$p_{14}(t) = \frac{\lambda_y}{\lambda} - \frac{\lambda_y}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda \cdot t), \quad (5)$$

где  $\lambda = \lambda_c + \lambda_y$  – суммарная интенсивность отказов.

Видно, что  $p_{11}(t) + p_{12}(t) + p_{13}(t) + p_{14}(t) = 1$ . Вероятность наступления явного отказа равна сумме вероятностей состояний 3 и 4:

$$p_y(t) = p_{13}(t) + p_{14}(t) = 1 - \exp(-\lambda_y \cdot t). \quad (6)$$

Следует иметь в виду, что состояния 1 и 2 фиксируются системой мониторинга в конце интервала между проверками, а состояния 3 и 4 – в момент наступления явного отказа.

Если состояние 2 является начальным, то

$$p_{21}(t) = p_{24}(t) = 0; \quad p_{22}(t) = \exp(-\lambda_y \cdot t);$$

$$p_{23}(t) = 1 - \exp(-\lambda_y \cdot t). \quad (7)$$

Введем параметр, который назовем приведенной интенсивностью отказов:

$\rho_c = \lambda_c \cdot T$ ,  $\rho_y = \lambda_y \cdot T$ ,  $\rho = \lambda \cdot T$ . Приведенная интенсивность отказов – это среднее число отказов в течение периода  $T$ :  $\rho_c$  и  $\rho_y$  – приведенные интенсивности скрытых и явных отказов,  $\rho$  – приведенная суммарная интенсивность скрытых и явных отказов. Использование одного параметра вместо двух позволяет упростить формулы и расчеты.

Вероятности состояний в конце периода выразим через приведенные интенсивности. При начальном состоянии 1:

$$p_{11}(T) = \exp(-\lambda \cdot T) = \exp(-\rho);$$

$$p_{12}(T) = \exp(-\lambda_y \cdot T) - \exp(-\lambda \cdot T) = \exp(-\rho_y) - \exp(-\rho) = \exp(-\rho_y) \cdot (1 - \exp(-\rho_c));$$

$$p_{13}(T) = \frac{\lambda_c}{\lambda} + \frac{\lambda_y}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda \cdot T) - \exp(-\lambda_y \cdot T) = \frac{\rho_c}{\rho} + \frac{\rho_y}{\rho} \cdot \exp(-\rho) - \exp(-\rho_y);$$

$$p_{14}(T) = \frac{\lambda_y}{\lambda} - \frac{\lambda_y}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda \cdot T) = \frac{\rho_y}{\rho} + \frac{\rho_y}{\rho} \cdot \exp(-\rho) = \frac{\rho_y}{\rho} \cdot (1 - \exp(-\rho)). \quad (8)$$



Табл. 1. Виды периодов между последовательными проверками

Вид периода	Начальное состояние	События на периоде	Конечное состояние	Обозначение периода	Вероятность периода
1. Работоспособный период	Р	–	Р	РР	$p_{pp}=p_{11}(T)$
2. Период со СО	Р	СО	С	РС	$p_{pc}=p_{12}(T)$
3. Период с ЯО и СО	Р	СО и ЯО	СЯ	РСЯ	$p_{pcя}=p_{13}(T)$
4. Период с ЯО	Р	ЯО	Я	РЯ	$p_{py}=p_{14}(T)$
5. Неработоспособный период	Н	–	Н	НН	$p_{nn}=p_{22}(T)$
6. Неработоспособный период с ЯО	Н	ЯО	Я	НЯ	$p_{ny}=p_{23}(T)$

При начальном состоянии 2:

$$\begin{aligned}
 p_{21}(T) &= p_{24}(T) = 0; \\
 p_{22}(T) &= \exp(-\lambda_{\text{я}} \cdot T) = \exp(-\rho_{\text{я}}); \\
 p_{23}(T) &= 1 - \exp(-\lambda_{\text{я}} \cdot T) = 1 - \exp(-\rho_{\text{я}}). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Период может начинаться с работоспособного или неработоспособного состояния, а заканчиваться может любым состоянием. Поэтому период можно характеризоваться начальным и конечным состоянием. В рассматриваемой модели могут иметь место 6 видов периодов, которые приведены в табл. 1. В табл. 1 обозначено: Р и Н – работоспособное и неработоспособное состояние объекта, СО и ЯО – скрытый и явный отказ.

### Продолжительности состояний на одном периоде

Пусть известен вид периода по начальному и конечному состоянию. Это означает, что переходы между состояниями внутри периода прошли по заданному варианту в соответствии с концептуальной моделью. Переходы между состояниями и вероятности состояний, в которых объект является работоспособным или неработоспособным, приведены в табл. 2.

*Пояснение.* В работоспособном состоянии отказов нет, в неработоспособном состоянии имеется только скрытый отказ.

Для периода вида РСЯ вероятности состояний

$$p_{11}(t) = \exp(-\lambda_{\text{с}} \cdot t);$$

$$\begin{aligned}
 p_{12}(t) &= \frac{\lambda_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}} - \lambda_{\text{я}}} \cdot (\exp(-\lambda_{\text{я}} \cdot t) - \exp(-\lambda_{\text{с}} \cdot t)); \\
 p_{13}(t) &= 1 - \frac{\lambda_{\text{с}} \cdot \exp(-\lambda_{\text{я}} \cdot t) - \lambda_{\text{я}} \cdot \exp(-\lambda_{\text{с}} \cdot t)}{\lambda_{\text{с}} - \lambda_{\text{я}}}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Проверка показывает, что  $p_{11}(t) + p_{12}(t) + p_{13}(t) = 1$ , при этом с вероятностью  $p_{13}(t)$  в момент времени  $t$  период будет прерван, поскольку явный отказ обнаруживается в момент его возникновения, а вероятность того, что в момент времени  $t$  период будет продолжаться, составит

$$p_{11}(t) + p_{12}(t) = \frac{\lambda_{\text{с}} \cdot \exp(-\lambda_{\text{я}} \cdot t) - \lambda_{\text{я}} \cdot \exp(-\lambda_{\text{с}} \cdot t)}{\lambda_{\text{с}} - \lambda_{\text{я}}}. \quad (11)$$

Очевидно, что продолжительности состояний, а также продолжительность периода зависят от вида периода. Явный отказ обнаруживается системой непрерывного контроля в момент его возникновения, после чего объект направляется на восстановление. Ввиду этого явные отказы уменьшают продолжительность периода, однако скрытые отказы не уменьшают его.

Среднее время нахождения объекта в  $j$ -м состоянии при начальном  $i$ -м состоянии на одном периоде вычисляется по формуле:

$$\theta_{ij} = \int_0^T p_{ij}(t) dt. \quad (12)$$

Среднее время работоспособного состояния ( $\theta_{\text{р}}$ ) и неработоспособного ( $\theta_{\text{н}}$ ) состояния на периоде каждого вида, а также средние продолжительности периодов вычислены путем интегрирования соответствующих вероятностей. Эти продолжительности приведены в табл. 3.

Табл. 2. Вероятности работоспособного и неработоспособного состояний на периодах различного вида ( $t \in [0; T]$ )

Вид периода	Переходы между состояниями	Вероятности состояний	
		работоспособного	неработоспособного
1. РР	Р→Р	$p_{\text{р}}(t)=1$	$p_{\text{н}}(t)=0$
2. РС	Р→С	$p_{\text{р}}(t)=\exp(-\lambda_{\text{с}} \times t)$	$p_{\text{н}}(t)=1-\exp(-\lambda_{\text{с}} \times t)$
3. РСЯ	Р→С→Я	$p_{\text{р}}(t)=\exp(-\lambda_{\text{с}} \times t)$	$p_{\text{н}}(t) = \frac{\lambda_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}} - \lambda_{\text{я}}} \cdot (\exp(-\lambda_{\text{я}} \cdot t) - \exp(-\lambda_{\text{с}} \cdot t))$
4. РЯ	Р→Я	$p_{\text{р}}(t)=\exp(-\lambda_{\text{я}} \times t)$	$p_{\text{н}}(t)=0$
5. НН	Н→С	$p_{\text{р}}(t)=0$	$p_{\text{н}}(t)=1$
6. НЯ	Н→Я	$p_{\text{р}}(t)=0$	$p_{\text{н}}(t)=\exp(-\lambda_{\text{я}} \times t)$

Табл. 3. Средние времена нахождения в работоспособном и неработоспособном состояниях на периодах разного вида

Вид периода	$\theta_p$	$\theta_n$	Сред. продолжительность периода
1. РР	$T$	0	$T_{pp} = T$
2. РС	$\frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c} \cdot T$	$\frac{\rho_c - (1 - \exp(-\rho_c))}{\rho_c} \cdot T$	$T_{pc} = T$
3. РСЯ	$\frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c} \cdot T$	$\frac{\rho_c(1 - \exp(-\rho_y)) - \rho_y(1 - \exp(-\rho_c))}{(\rho_c - \rho_y) \cdot \rho_y} \cdot T$	$T_{pcy} = \theta_c + \theta_n$
4. РЯ	$\frac{1 - \exp(-\rho_y)}{\rho_y} \cdot T$	0	$T_{py} = \frac{1 - \exp(-\rho_y)}{\rho_y} \cdot T$
5. НН	0	$T$	$T_{nn} = T$
6. НЯ	0	$\frac{1 - \exp(-\rho_y)}{\rho_y} \cdot T$	$T_{ny} = \frac{1 - \exp(-\rho_y)}{\rho_y} \cdot T$

Сумма времен  $\theta_p$  и  $\theta_n$  является средним временем периода. Средние времена  $\theta_p$  и  $\theta_n$  получены путем интегрирования вероятностей работоспособного и неработоспособного состояния на соответствующем периоде. Средняя продолжительность периода вида РСЯ:

$$T_{pcy} = \theta_c + \theta_n = \frac{\rho_c^2 \cdot (1 - \exp(-\rho_y)) - \rho_y^2 \cdot (1 - \exp(-\rho_c))}{(\rho_c - \rho_y) \cdot \rho_c \cdot \rho_y} \cdot T.$$

### Диаграмма состояний

В соответствии с концептуальной моделью, время эксплуатации объекта состоит из периодов между проверками, самих проверок и восстановления. Диаграмма состояний эксплуатации приведена на рис. 2. Состояния пронумерованы и обозначены смысловыми индексами: 1Р – работоспособное состояние объекта в начале периода; 2РР – работоспособное состояние объекта в конце периода; 3РС – состояние объекта в конце периода со скрытым отказом; 4РСЯ – состояние объекта со скрытым и явным отказом; 5РЯ – состояние объекта с явным отказом; 6Н – неработоспособное состояние объекта в начале периода в результате ошибки контроля II рода; 7НН – неработоспособное состояние объекта в конце периода; 8НЯ – неработоспособное состояние объекта с явным отказом; 9ПР и 10ПН – проверка работоспособного и неработоспособного объекта в конце периода; 11ПЯ – проверка объекта с явным отказом (обнаружение явного отказа); 12В – восстановление 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→2), со скрытым отказом (переход 1→3) или с явным отказом (переходы 1→4 и 1→5). Таким образом, работоспособное состояние 2 и неработоспособное состояние 3 – это состояния в конце периода, а состояния 4 и 5 – состояния, продолжительность которых меньше периода.

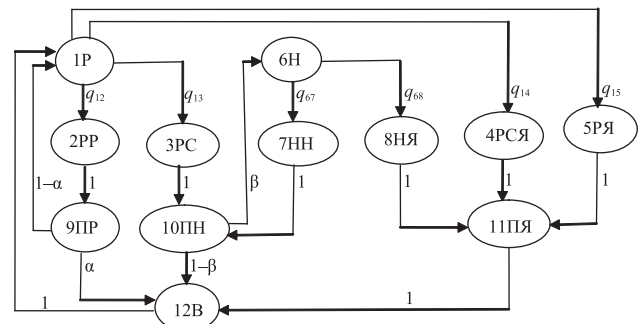


Рис. 2. Диаграмма состояний эксплуатации объекта

На диаграмме показаны переходы между состояниями в результате ошибок контроля: переход 9→12 в результате ошибки контроля I рода с вероятностью  $\alpha$  и переход 10→6 в результате ошибки контроля II рода с вероятностью  $\beta$ . Переходы, обозначенные вероятностью 1, происходят достоверно.

После состояний 2 и 3, в рамках контроля технического состояния, производится проверка соответствия работоспособного и неработоспособного объекта. Если объект является работоспособным, то после проверки он возвращается на функционирование с вероятностью  $1 - \alpha$ , а если он является неработоспособным, то направляется на восстановление с вероятностью  $1 - \beta$ . После восстановления объект направляется на функционирование в работоспособном состоянии.

На диаграмме приведены переходы между состояниями и соответствующие вероятности прохождений. Вероятность прохождения является характеристикой соответствующего периода:

$$q_{12} = p_{pp}; q_{13} = p_{pc}; q_{14} = p_{pcy}; q_{15} = p_{py}; q_{67} = p_{nc}; q_{68} = p_{ny}. \quad (14)$$

Переходы между состояниями описываются с помощью матрицы вероятностей прохождений. Матрица

вероятностей прохождений на всем множестве состояний имеет вид:

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{67} & q_{68} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

### Относительные частоты состояний

Разобьем множество состояний на два подмножества:  $U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$ ,  $V = \{12\}$ . 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.

Матрица вероятностей прохождений на подмножестве  $U$ ,  $Q_{UU}$ , получается путем удаления 12-й строки и 12-го столбца из матрицы  $Q$ . По матрице  $Q_{UU}$  вычисляется матрица относительных частот  $N_U$  по формуле (3). Поскольку состояние 1 всегда является начальным при переходе  $V \rightarrow U$ , то будем вычислять только первую строку матрицы  $N_U$ . Вычислить элементы обратной матрицы  $N_U$  можно несколькими способами (рекомендуется с применением систем компьютерной математики).

Выразим вероятности прохождений через приведенные интенсивности:

$$\begin{aligned} q_{12} &= p_{pp} = \exp(-\rho); \quad q_{13} = p_{pc} = \exp(-\rho_{\text{я}}) - \exp(-\rho); \\ q_{14} &= p_{pca} = \frac{\rho_c \cdot (1 - \exp(-\rho_{\text{я}})) - \rho_{\text{я}} \cdot (\exp(-\rho_{\text{я}}) - \exp(-\rho))}{\rho} = \\ &= \frac{\rho_c + \rho_{\text{я}} \cdot \exp(-\rho) - \rho \cdot \exp(-\rho_{\text{я}})}{\rho}; \\ q_{15} &= p_{pja} = \frac{\rho_{\text{я}} \cdot (1 - \exp(-\rho))}{\rho}; \\ q_{67} &= p_{nn} = \exp(-\rho_{\text{я}}); \quad q_{68} = p_{nc} = 1 - \exp(-\rho_{\text{я}}). \end{aligned} \quad (15)$$

Приведем элементы первой строки матрицы  $N_U$ , выразив их через вероятности прохождений и через приведенные интенсивности:

$$n(1,1) = \frac{1}{\Delta 1}; \quad n(1,2) = \frac{q_{12}}{\Delta 1} = \frac{\exp(-\rho)}{\Delta 1};$$

$$n(1,3) = \frac{q_{13}}{\Delta 1} = \frac{\exp(-\rho_{\text{я}}) - \exp(-\rho)}{\Delta 1};$$

$$n(1,4) = \frac{q_{14}}{\Delta 1} = \frac{\rho_c \cdot (1 - \exp(-\rho_{\text{я}})) - \rho_{\text{я}} \cdot (\exp(-\rho_{\text{я}}) - \exp(-\rho))}{\rho \cdot \Delta 1};$$

$$n(1,5) = \frac{q_{15}}{\Delta 1} = \frac{\rho_{\text{я}} \cdot (1 - \exp(-\rho))}{\rho \cdot \Delta 1};$$

$$n(1,6) = \frac{\beta \cdot q_{13}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{\beta \cdot (\exp(-\rho_{\text{я}}) - \exp(-\rho))}{\Delta 1 \cdot \Delta 2};$$

$$n(1,7) = \frac{\beta \cdot q_{13} \cdot q_{67}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{\beta \cdot (\exp(-\rho_{\text{я}}) - \exp(-\rho)) \cdot \exp(-\rho_{\text{я}})}{\Delta 1 \cdot \Delta 2};$$

$$n(1,8) = \frac{\beta \cdot q_{13} \cdot q_{68}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{\beta \cdot (\exp(-\rho_{\text{я}}) - \exp(-\rho)) \cdot (1 - \exp(-\rho_{\text{я}}))}{\Delta 1 \cdot \Delta 2};$$

$$n(1,9) = \frac{q_{12}}{\Delta 1} = \frac{\exp(-\rho)}{\Delta 1};$$

$$n(1,10) = \frac{q_{13}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{\exp(-\rho_{\text{я}}) - \exp(-\rho)}{\Delta 1 \cdot \Delta 2};$$

$$\begin{aligned} n(1,11) &= \frac{q_{14} + q_{15}}{\Delta 1} + \frac{\beta \cdot q_{13} \cdot q_{68}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{1 - \exp(-\rho_{\text{я}})}{\Delta 1} + \\ &+ \frac{\beta \cdot (1 - \exp(-\rho_{\text{я}})) \cdot (1 - \exp(-\rho_{\text{я}})) \cdot \exp(-\rho_{\text{я}})}{\Delta 1 \cdot \Delta 2}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\Delta 1 = 1 - (1 - \alpha) \cdot q_{12} = 1 - (1 - \alpha) \cdot \exp(-\rho)$ ;  $\Delta 2 = 1 - \beta \cdot q_{67} = 1 - \beta \cdot \exp(-\rho_{\text{я}})$ .

Для лучшего понимания полученных результатов приведем некоторые соотношения, подтверждающие правильность приведенных результатов:

1) произведение первой строки матрицы  $N_U$  на матрицу  $(E - Q_{UU})$  равно строке, первый элемент которой равен 1, остальные элементы равны 0;

2) попадания в состояние 1 распределяются между состояниями 2, 3, 4, 5:

$$n(1,2) + n(1,3) + n(1,4) + n(1,5) = n(1,1);$$

3) состояние с явным отказом на одном цикле формируется из состояний 4, 5, 8:  $n(1,4) + n(1,5) + n(1,8) = n(1,11)$ .

### Показатели надежности объекта

Перейдем к вычислению показателей надежности с учетом принятых условий и допущений. В соот-

ветствии с концептуальной моделью среднее время работоспособного и неработоспособного состояний на одном цикле определяется этими временами в состояниях 2, 3, 4, 5, 7, 8.

Среднее время работоспособного состояния на одном цикле:

$$t_p = \left[ \frac{n(1,2) + n(1,3) \cdot \frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c} + n(1,4) \cdot \frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c}}{\frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c} + n(1,5) \cdot \frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c}} \right] \cdot T. \quad (17)$$

Среднее время неработоспособного состояния на одном цикле

$$t_n = \left[ \frac{n(1,3) \cdot \frac{\rho_c - (1 - \exp(-\rho_c))}{\rho_c} + n(1,4) \cdot \frac{\rho_c (1 - \exp(-\rho_c)) - \rho_n (1 - \exp(-\rho_c))}{(\rho_c - \rho_n) \cdot \rho_n}}{\frac{1 - \exp(-\rho_n)}{\rho_n} + n(1,7) + n(1,8) \cdot \frac{1 - \exp(-\rho_n)}{\rho_n}} \right] \cdot T. \quad (18)$$

Средняя продолжительность цикла:

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_n. \quad (19)$$

Коэффициент готовности  $K_r$  и коэффициент неготовности  $K_n$ :

$$K_r = t_p / t_{\text{ц}}; K_n = t_n / t_{\text{ц}}. \quad (20)$$

## Результаты

Расчеты проведены для среднего времени цикла и коэффициента неготовности при разных приведенных интенсивностях отказов и для разных вероятностей ошибок контроля. Эти расчеты представлены в виде таблиц с конкретными числовыми значениями. В таблицах видны закономерности изменения показателей надежности и прогнозируемые значения показателей надежности.

В табл. 4 приведены расчетные значения этих показателей при разных значениях вероятностей ошибок контроля и при приведенных интенсивностях  $\rho_c = 0,005$  и  $\rho_n = 0,05$  и при периодичности контроля  $T = 1$  час., а в табл. 5 приведены аналогичные расчеты при  $\rho_c = 0,05$ ;  $\rho_n = 0,005$ ;  $T = 1$  час.

Из проведенных расчетов видно, что среднее время цикла существенно зависит от вероятности ошибки контроля I рода, поскольку эта вероятность определяет среднее число работоспособных периодов: чем больше вероятность ошибки контроля I рода, тем меньше среднее число периодов на одном цикле. Из расчетов видно, что среднее время цикла изменяется на порядок при изменении вероятности ошибки I рода. Видно также, что среднее время цикла практически не зависит от вероятности ошибки II рода, так как вклад в неработоспособные состояния за счет этой ошибки является пренебрежимо малым по сравнению с временем цикла. Этому фактору имеется простое объяснение: неработоспособные состояния в результате ошибки контроля II рода могут произойти только после скрытого отказа, а вероятность скрытого отказа на одном периоде является достаточно

Табл. 4. Значения коэффициента неготовности при  $\rho_c = 0,005$ ;  $\rho_n = 0,05$ ;  $T = 10$  час.

$\alpha$	$\beta$		0	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
	$t_{\text{ц}}$	$K_n$								
0	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,8	18,8
	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
0,01	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	16,0	16,0
	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
0,05	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	10,0	10,0
	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
0,1	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	6,7	6,7	6,7	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8
	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
0,2	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
0,3	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
0,4	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
0,5	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
	$t_{\text{ц}}$	$K_n$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$



Табл. 5. Значения коэффициента неготовности при  $\rho_c = 0,05$ ;  $\rho_x = 0,005$ ;  $T = 10$  час.

$\alpha$	$\beta$	0	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	$t_{ц}$	18,7	18,7	18,7	18,9	19,1	19,5	20,0	20,0
	$K_{н}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
0,01	$t_{ц}$	15,9	15,9	15,9	16,0	16,3	16,5	16,9	17,4
	$K_{н}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
0,05	$t_{ц}$	9,9	9,9	9,9	10,0	10,2	10,3	10,6	10,9
	$K_{н}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
0,1	$t_{ц}$	6,7	6,8	6,8	6,8	6,9	7,0	7,2	7,4
	$K_{н}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
0,2	$t_{ц}$	4,1	4,1	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5
	$K_{н}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
0,3	$t_{ц}$	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,2	3,2
	$K_{н}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
0,4	$t_{ц}$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5
	$K_{н}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
0,5	$t_{ц}$	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1
	$K_{н}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$

малой величиной. Следует отметить, что среднее время цикла определяет частоту восстановления, которая может послужить основой для расчета объемов ремонтно-восстановительных работ. Возможно также установить частоту или долю ложных восстановлений в общем объеме ремонтно-восстановительных работ.

Из приведенной модели следует, что коэффициент неготовности практически не зависит от вероятности ошибки I рода, поскольку средние относительные частоты всех состояний одинаково пропорциональны параметру, зависящему от вероятности ошибки I рода (этот параметр обозначен  $\Delta 1$ ). Однако коэффициент неготовности существенно зависит от вероятности ошибки II рода. Этот показатель может изменяться в разы и даже на 2 – 3 порядка при соответствующих изменениях вероятности ошибки II рода. Это обстоятельство объясняется тем, что продолжительность неработоспособных состояний может существенно изменяться при изменении вероятности ошибки II рода, хотя эти значения составляют незначительную часть среднего времени цикла.

Уровень надежности зависит также от соотношения между скрытыми и явными отказами: чем больше доля скрытых отказов в общем потоке отказов, тем больше коэффициент неготовности, который может увеличиваться на 1 – 2 порядка от этого фактора. Таким образом, увеличение доли скрытых отказов может существенно снизить уровень надежности.

## Обсуждение

Особенность данной модели заключается в том, что периодичность проверок технического состояния в рамках системы мониторинга проводится с постоянным

периодом. В аналитических моделях, применяемых для описания мониторинга технических систем, зачастую используют случайный период между проверками. Использование в моделях разных способов задания периодичности проверок может существенно изменить расчетные значения показателей надежности. В частности, в [8] показано, что различие между коэффициентом неготовности при разных способах задания периодичности проверок может составлять несколько порядков при разных значениях интенсивности отказов.

Другая особенность приведенной модели заключается в том, что отсчет времени начинается от наблюдаемых событий, к которым относятся явные отказы, проверки технического состояния, завершение восстановления. Следует отметить, что в системе мониторинга отсчет времени от скрытого отказа быть не может, так как это событие не является наблюдаемым. В исследованиях на основе марковской модели принято, что продолжительность состояний является случайной и распределена по показательному закону с постоянной интенсивностью. При этом обоснование такого выбора, как правило, не приводится. Смысл параметра «интенсивность завершения состояния» также, как правило, не поясняется.

Достоинством модели является возможность ее реализации средствами компьютерного моделирования, например, в системах Mathcad и Matlab. Применение матричных методов обеспечивает простые алгоритмы расчетов в этих системах.

## Заключение

При проектировании и совершенствовании обслуживания сложных систем следует принимать во внимание явные и скрытые отказы, периодичность проверок,

ошибки контроля. При этом необходимо прогнозировать и рассчитывать не только коэффициенты готовности или неготовности, но и временные характеристики, связанные с надежностью. В реальных системах мониторинга имеет место большое разнообразие в состояниях, переходах между состояниями и в числовых значениях исходных данных. Представленная модель позволяет рассчитать и спрогнозировать такие показатели с учетом влияющих факторов. Например, модель позволяет анализировать среднее время неработоспособного состояния на одном цикле и составляющие этого показателя, зависящие от скрытых отказов и вероятности ошибки контроля II рода. Возможно также учесть влияние явных отказов на среднее время неработоспособного состояния на одном цикле.

Использование приведенной модели позволяет обоснованно прогнозировать уровень надежности с учетом требований к системе мониторинга.

## Библиографический список

1. Викторов В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: Ленанд, 2014. 256 с.
2. Егунов М.М., Шувалов В.П. Резервирование и восстановление в телекоммуникационных сетях // Вестник СибГУТИ. 2012. № 2. С. 3-9.
3. Зверев Г.Я. Оценка надежности изделия в процессе эксплуатации. М.: URSS, 2010. 96 с.
4. Зеленцов Б.П. Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017. 133 с.
5. Зеленцов Б.П. Матричные модели функционирования оборудования систем связи // Вестник СибГУТИ. 2015. № 4. С. 62-73.
6. Зеленцов Б.П. Метод относительных частот моделирования вероятностных систем // Вестник СибГУТИ. 2017. № 2. С. 51-63.
7. Зеленцов Б.П. Циклическое функционирование систем длительного использования // Вестник СибГУТИ. 2017. № 4. С. 3-14.
8. Зеленцов Б.П., Трофимов А.С. Исследование моделей расчета надежности при разных способах задания периодичности проверок // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 35-44.
9. Зубилевич А.Л., Сиднев С.А., Царенко В.А. Определение эффективности применения прогнозирующей стратегии технического обслуживания ВОЛС // XIII Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества»: Сборник трудов. Том 1. М.: ИД Медиа Паблишер, 2019. С. 31-33.
10. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. М.: Высшая школа, 2012. 304 с.
11. Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Том 2: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов. М.: МИЦНМО, 2009. 588 с.
12. Королук В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев: Наукова думка, 1982. 236 с.
13. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ, 2016. Выпуск 85. С. 1-27.
14. Махитко В.П., Засканов М.В., Савин М.В. Методы оценки показателей надежности изделий по результатам испытаний и эксплуатации // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. С. 293-299.
15. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
16. Половко А.М., Гуров С.М. Основы теории надежности. БНВ-Санкт-Петербург, 2006. 560 с.
17. Рахман П.А. Показатели надежности восстанавливаемых систем с заданным порогом аварийного отключения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9. С. 146-153.
18. Сильвестров Д.С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний. М.: Сов радио, 1980. 272 с.
19. Трофимов А.С. Модель функционирования релейной защиты энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 6. С. 110-114.
20. Чекмарев Ю.В. Надежность информационных систем. М.: Дик Пресс, 2012. 64 с.
21. Шайхутдинов Д.В. Методы мониторинга и диагностики сложных технических систем на базе имитационного моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11 (часть 1). С. 146-153.
22. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 114 с.
23. Шнеерзон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.

## Сведения об авторе

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

## Вклад автора в статью

**Зеленцов Б.П.** разработал аналитическую модель надежности объекта на основе матричных методов в условиях мониторинга технического состояния при постоянном периоде проверками с учетом недоверного контроля и отказов разного вида по признаку их обнаружения.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.