

Определение показателей надежности электронного оборудования по данным эксплуатационных испытаний

Б. П. Зеленцов

Статья посвящена методу нахождения оценок показателей надёжности объекта по статистическим данным, полученным при проведении эксплуатационных испытаний. Основная идея заключается в том, что производится мониторинг и регистрация наблюдаемых параметров событий и состояний, по которым вычисляются оценки показателей надёжности и параметров, таких как интенсивности явных отказов, продолжительности состояний, частоты состояний. Эти параметры оцениваются экспериментальным методом. Применение расчётно-экспериментального метода позволяет получить оценки ненаблюдаемых параметров, таких как интенсивности скрытых отказов, вероятности ошибок контроля I и II рода. Рассмотренный подход основан на матричной модели функционирования систем длительного использования. С помощью этой модели находятся функциональные зависимости между показателями надёжности и другими параметрами объекта.

Ключевые слова: эксплуатационные испытания на надёжность, ошибки контроля I и II рода, интенсивности явных и скрытых отказов.

1. Введение

Проведение определительных, контрольных, ускоренных, лабораторных и других видов испытаний на надёжность требует больших затрат времени и средств. Проведению различных видов испытаний на надёжность посвящено множество работ, например, [3, 9, 11, 12]. Решены задачи точечной и интервальной оценки параметров, сформулированы и обоснованы критерии проверки статистических гипотез для законов распределения случайных величин, разработаны планы различных испытаний и другие задачи. Эксплуатационные испытания являются одним из достоверных источников получения информации о показателях надёжности наряду с другими видами испытаний на надёжность. Эксплуатационные испытания в реальных условиях могут дать более достоверные сведения о надёжности по сравнению с опубликованными справочными и литературными данными или оценками экспертов.

При проведении эксплуатационных испытаний производят мониторинг и регистрацию рабочих и окружающих условий, а также режимов технического обслуживания и измерений [1]. Основная особенность эксплуатационных испытаний заключается в том, что мониторинг и регистрацию можно проводить только для наблюдаемых значений признаков событий и состояний. Ненаблюдаемые (скрытые) события и состояния не поддаются непосредственному наблюдению и регистрации. Для определения оценок характеристик таких событий и состояний следует применять специальные статистики.

Замечание. В термин «определение» здесь заложен смысл расчёта, вычисления, нахождения, установления. Другие омонимические значения этого термина здесь не используются, в частности, этот термин не используется для раскрытия содержания и сущности какого-либо другого термина.

Целью статьи является разработка подхода к определению оценок показателей надёжности объектов по результатам эксплуатационных испытаний. Предпосылкой к излагаемому подходу является представление о том, что мониторинг и регистрацию информации можно проводить только для наблюдаемых событий и состояний, а информацию о ненаблюдаемых (скрытых) событиях и состояниях получают путём обработки информации о наблюдаемых событиях и состояниях. При этом связь между наблюдаемыми и скрытыми событиями и состояниями устанавливается с помощью математической модели.

Изложенный подход реализован на относительно простом примере эксплуатации объекта, в основу которого положена модель эксплуатации линии связи в условиях недостоверного контроля [4, 5]. В этой модели учтены явные и скрытые отказы, периодичность контроля, ошибки недостоверного контроля I и II рода, восстановление после обнаружения отказа.

2. Процесс эксплуатации объекта

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 проверяется неработоспособный объект, то он направляется на восстановление, после которого возвращается на функционирование.

Отказы объекта могут быть явными и скрытыми, то есть вид отказа зависит от характера его обнаружения. Явный отказ обнаруживается в момент его возникновения, при этом объект направляется на восстановление. Скрытый отказ обнаруживается при периодической проверке, и после его обнаружения объект направляется на восстановление.

При проведении периодической проверки возможны ошибки контроля I и II рода. При ошибке контроля I рода объект ложно блокируется и направляется на «ложное восстановление». При ошибке контроля II рода система контроля не обнаруживает отказ объекта. Ошибки контроля возникают вследствие отказов и сбоев системы контроля, а также из-за неполноты контроля. Известно, что ошибки контроля ухудшают надёжность и затрудняют процесс правильной эксплуатации оборудования. Вероятности ошибок контроля I и II рода являются условными вероятностями: каждая из них является вероятностью ошибки при условии, что производится проверка работоспособного и неработоспособного объекта соответственно.

Полагается, что восстановление (ремонт) объекта производится квалифицированным персоналом, поэтому можно считать, что информация о состояниях объекта, поступившего на восстановление, является достоверной. Ввиду этого возможно учесть четыре причины попадания объекта контроля на восстановление:

1) «ложное восстановление» в результате ошибки контроля I рода при отсутствии какого-либо отказа;

2) наличие только явного отказа;

3) наличие только скрытого отказа;

4) наличие явного и скрытого отказов.

Процесс эксплуатации объекта с указанными особенностями представлен диаграммой состояний, приведённой на рис. 1. Принято, что распределение времени нахождения в состояниях является показательным.

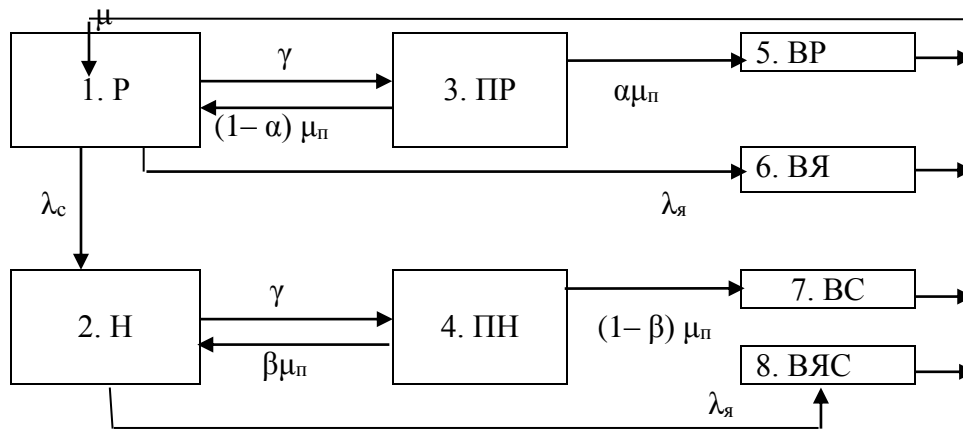


Рис. 1. Диаграмма состояний объекта

На диаграмме обозначено: P – работоспособное состояние, Н – неработоспособное состояние, ПР – проверка работоспособного объекта, ПН – проверка неработоспособного объекта, ВР – ложное восстановление объекта, ВЯ – восстановление объекта с явным отказом, ВС – восстановление объекта со скрытым отказом, ВЯС – восстановление объекта с явным и скрытым отказами, γ – интенсивность начала проверки со случайным периодом, λ_c – интенсивность скрытых отказов, $\lambda_я$ – интенсивность явных отказов, μ – интенсивность завершения восстановления, μ_p – интенсивность завершения проверки, α – вероятность ошибки контроля I рода, β – вероятность ошибки контроля II рода.

Надёжность объекта зависит практически от всех параметров, обозначенных на рис. 1. Влияние этих параметров на показатели надежности объекта исследованы в [4, 5].

Непрерывный контроль позволяет фиксировать явные отказы в момент их наступления, скрытые отказы фиксируются при периодическом контроле.

3. Математическая модель эксплуатации объекта

Математическая модель эксплуатации объекта составлена матричным методом на основе марковского процесса в непрерывном времени [5, 6]. Продолжительности всех состояний объекта являются случайными и распределены по показательному закону с интенсивностями, показанными на рис. 1.

Исходная матрица интенсивностей Λ переходов между состояниями составлена по диаграмме на рис. 1:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -(\lambda + \gamma) & \lambda_c & \gamma & 0 & 0 & \lambda_я & 0 & 0 \\ 0 & -(\lambda_я + \gamma) & 0 & \gamma & 0 & 0 & 0 & \lambda_я \\ (1 - \alpha)\mu_p & 0 & -\mu_p & 0 & \alpha\mu_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta\mu_p & 0 & -\mu_p & 0 & 0 & (1 - \beta)\mu_p & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu \end{pmatrix},$$

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

Эксплуатацию объекта во времени можно представить в виде циклов. Из диаграммы состояний следует, что восстановление, являющееся видом технического обслуживания, прерывает использование объекта по назначению. Будем называть циклом эксплуатации объекта его использование по назначению совместно с проверками и следующее за этим восстановление устройства. В соответствии с этим множество состояний разбивается на два подмно-

жества: $U = \{1, 2, 3, 4\}$; $V = \{5, 6, 7, 8\}$. Таким образом, цикл эксплуатации объекта заключается в нахождении в одном подмножестве и следующем за ним нахождении в другом подмножестве. Можно говорить как о UV -циклах, так и о VU -циклах эксплуатации объекта.

В соответствии с разбиением множества состояний матрица интенсивностей Λ разбивается на четыре подматрицы:

$$\Lambda_{UU} = \begin{pmatrix} -(\lambda + \gamma) & \lambda_c & \gamma & 0 \\ 0 & -(\lambda_y + \gamma) & 0 & \gamma \\ (1 - \alpha)\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 \\ 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} \end{pmatrix}; \quad \Lambda_{UV} = \begin{pmatrix} 0 & \lambda_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_y \\ \alpha\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \beta)\mu_{\Pi} & 0 \end{pmatrix};$$

$$\Lambda_{VU} = \begin{pmatrix} \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \Lambda_{VV} = \begin{pmatrix} -\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mu \end{pmatrix}.$$

Далее в соответствии с матричным методом [5–8] вычислены матричные характеристики подмножеств U и V , матричные характеристики переходов между подмножествами состояний и матричные характеристики возвращения в подмножества состояний. Эти матричные характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1. Матричные характеристики подмножеств состояний и переходов между подмножествами состояний

| Наименование матричной характеристики | Формула для вычисления |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1. Матрица среднего времени нахождения в состояниях подмножества U | $T_U = \ t_U(i, j)\ = -\Lambda_{UU}^{-1}$ |
| 2. Матрица среднего времени нахождения в состояниях подмножества V | $T_V = \ t_V(i, j)\ = -\Lambda_{VV}^{-1}$ |
| 3. Матрица средних относительных частот состояний подмножества U | $N_U = \ n_U(i, j)\ = \Lambda_{UU}^{-1} \cdot \Lambda_{UUdg}$ |
| 4. Матрица средних относительных частот состояний подмножества V | $N_V = \ n_V(i, j)\ = \Lambda_{VV}^{-1} \cdot \Lambda_{VVdg}$ |
| 5. Матрица вероятностей попаданий при переходе $U \rightarrow V$ | $B_{UV} = \ b_{UV}(i, j)\ = -\Lambda_{UU}^{-1} \cdot \Lambda_{UV}$ |
| 6. Матрица вероятностей попаданий при переходе $V \rightarrow U$ | $B_{VU} = \ b_{VU}(i, j)\ = -\Lambda_{VV}^{-1} \cdot \Lambda_{VU}$ |
| 7. Матрица вероятностей возвращения в U на UV -цикле | $A_U = \ a_U(i, j)\ = B_{UV} \cdot B_{VU}$ |
| 8. Матрица вероятностей возвращения в V на VU -цикле | $A_V = \ a_V(i, j)\ = B_{VU} \cdot B_{UV}$ |

В таблице обозначено:

Λ_{UUdg} – матрица Λ_{UU} , в которой оставлены диагональные элементы, а остальные элементы равны нулю;

Λ_{VVdg} – матрица Λ_{VV} , в которой оставлены диагональные элементы, а остальные элементы равны нулю;

$t_U(i, j)$ – среднее время нахождения в состоянии $j \in U$ до выхода из U при условии, что состояние $i \in U$ является начальным;

$t_V(i, j)$ – среднее время нахождения в состоянии $j \in V$ до выхода из V при условии, что состояние $i \in V$ является начальным;

$n_U(i, j)$ – среднее число вхождений в состояние $j \in U$ до выхода из U при условии, что состояние $i \in U$ является начальным;

$n_V(i, j)$ – среднее число вхождений в состояние $j \in V$ до выхода из V при условии, что состояние $i \in V$ является начальным;

$b_{UV}(i, j)$ – вероятность того, что при переходе $U \rightarrow V$ система попадет в состояние $j \in V$ при условии, что состояние $i \in U$ является начальным;

$b_{VU}(i, j)$ – вероятность того, что при переходе $V \rightarrow U$ система попадет в состояние $j \in U$ при условии, что состояние $i \in V$ является начальным;

$a_U(i, j)$ – вероятность того, что система попадет в состояние $j \in U$ при возвращении из V в U при условии, что состояние $i \in U$ является начальным на предыдущем UV -цикле;

$a_V(i, j)$ – вероятность того, что система попадет в состояние $j \in V$ при возвращении из U в V при условии, что состояние $i \in V$ является начальным на предыдущем VU -цикле.

Матрицы B_{UV} , B_{VU} , A_U , A_V являются стохастическими: сумма элементов каждой строки этих матриц равна 1, то есть

$$B_{UV} \cdot \dot{e} = \dot{e}; \quad B_{VU} \cdot \dot{e} = \dot{e}; \quad A_U \cdot \dot{e} = \dot{e}; \quad A_V \cdot \dot{e} = \dot{e},$$

где \dot{e} – столбец, все элементы которого равны 1.

Таким образом, матрицы B_{UV} и B_{VU} описывают попадания при переходах между различными подмножествами, а матрицы A_U и A_V – возвращения в одноименные подмножества на соседних циклах.

Преобразования и вычисления по формулам, приведённым в табл. 1, выполнены в системе компьютерной математики Mathcad. Развернутые матрицы из табл. 1 являются громоздкими и поэтому полностью не приводятся. Простой вид имеют следующие матрицы:

$$T_V = \begin{pmatrix} 1/\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\mu \end{pmatrix}; \quad N_V = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad B_{VU} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$A_U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

4. Зависимости между параметрами состояний

Состояние 1 всегда является начальным при переходе $V \rightarrow U$, поэтому матрицы B_{VU} и A_U имеют одинаковые строки и вероятность попадания в состояние 1 всегда равна 1. Матрица A_V также состоит из одинаковых строк, при этом каждая строка этой матрицы равна первой строке матрицы B_{UV} , что обусловлено тем, что состояние 1 всегда является начальным при переходе $V \rightarrow U$. Следует отметить, что каждая из матриц T_U , T_V , B_{UV} состоит из разных строк. Процесс эксплуатации объекта рассматривается в стационарном режиме. Стационарный режим начинается с первого цикла, если начальным состоянием цикла является состояние 1 или одно из состояний восстановления.

Приведём зависимости между параметрами состояний и переходов между состояниями, которые содержатся в первых строках матриц B_{UV} , A_V , T_U , N_U :

$$\|b_{UV}(1, j)\| = \frac{1}{\Delta_1 \cdot \Delta_2} \|\alpha \cdot \gamma \cdot \Delta_2 \quad \lambda_{\text{я}} \cdot \Delta_2 \quad (1 - \beta) \cdot \lambda_{\text{с}} \cdot \gamma \quad \lambda_{\text{с}} \cdot \lambda_{\text{я}}\|; \quad (1)$$

$$\|a_V(5, j)\| = \frac{1}{\Delta_1 \cdot \Delta_2} \|\alpha \cdot \gamma \cdot \Delta_2 \quad \lambda_{\text{я}} \cdot \Delta_2 \quad (1 - \beta) \cdot \lambda_{\text{с}} \cdot \gamma \quad \lambda_{\text{с}} \cdot \lambda_{\text{я}}\|; \quad (2)$$

$$\|t_U(1, j)\| = \frac{1}{\Delta_1 \cdot \Delta_2} \|\Delta_2 \quad \lambda_{\text{с}} \quad (1 - \beta) \cdot \lambda_{\text{с}} \cdot \gamma \cdot \Delta_2 / \mu_{\text{п}} \quad \lambda_{\text{с}} \cdot \gamma / \mu_{\text{п}}\|; \quad (3)$$

$$\|n_U(1, j)\| = \frac{1}{\Delta_1 \cdot \Delta_2} \|(\lambda + \gamma) \cdot \Delta_2 \quad \lambda_c \cdot (\lambda_{\text{я}} + \gamma) \quad \gamma \cdot \Delta_2 \quad \lambda_c \cdot \gamma\|, \quad (4)$$

где $\Delta_1 = \lambda + \alpha \cdot \gamma$; $\Delta_2 = \lambda_{\text{я}} + (1 - \beta) \cdot \gamma$; $\lambda = \lambda_c + \lambda_{\text{я}}$.

Из приведённых строк следуют зависимости между параметрами состояний и переходов между состояниями в стационарном режиме. Эти зависимости приведены в табл. 2.

Таблица 2. Зависимости между параметрами состояний

| Наименование параметров | Формулы зависимостей |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Вероятности попадания в состояния подмножества V | $p_{BP} = b_{UV}(1, 5) = \alpha \cdot \gamma / \Delta_1$ $p_{BЯ} = b_{UV}(1, 6) = \lambda_{\text{я}} / \Delta_1$ $p_{BC} = b_{UV}(1, 7) = (1 - \beta) \cdot \lambda_c \cdot \gamma / (\Delta_1 \cdot \Delta_2)$ $p_{BЯC} = b_{UV}(1, 8) = \lambda_c \cdot \lambda_{\text{я}} / (\Delta_1 \cdot \Delta_2)$ |
| 2. Среднее число проверок, приходящееся на одно восстановление | $n_{\Pi/B} = n_U(1, 3) + n_U(1, 4) =$ $= [\lambda + (1 - \beta) \cdot \gamma] \cdot \gamma / (\Delta_1 \cdot \Delta_2)$ |
| 3. Среднее время нахождения в подмножестве U при условии $\mu_{\Pi} = \infty$ | $t_U = n_U(1, 1) + n_U(1, 2) =$ $= [\lambda + (1 - \beta) \cdot \gamma] / (\Delta_1 \cdot \Delta_2)$ |

5. Наблюдаемые параметры при эксплуатационных испытаниях

Исходные статистические данные могут быть получены путём мониторинга технического состояния, который сводится к регистрации продолжительности состояний и числа событий в процессе эксплуатационных испытаний. Продолжительности состояний и числа событий являются случайными величинами. При экспериментальных оценках используются прямые и косвенные методы. При прямых методах показатели надёжности оцениваются непосредственно по результатам мониторинга. С помощью косвенных методов требуемые показатели надёжности выражаются через другие показатели надёжности, а затем определяются расчётным путём [10]. Для прямых методов используют термин «экспериментальные методы», а для косвенных – «расчётно-экспериментальные методы» [1].

Наблюдаемые параметры и их оценивание экспериментальным методом приведены в табл. 3. Исходные значения наблюдаемых параметров и оценки наблюдаемых параметров обозначены с помощью знака \sim . Используемая терминология соответствует стандарту [2].

Таблица 3. Наблюдаемые параметры и их оценки

| Наименование | Обозначение и формула для вычисления |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1. Время наблюдения за процессом эксплуатации | \tilde{t} |
| 2. Суммарное время восстановления за время наблюдения | \tilde{t}_B |
| 3. Число (частота) восстановлений за время наблюдения | \tilde{n}_B |
| 4. Число (частота) проверок за время наблюдения | \tilde{n}_{Π} |
| 5. Числа (частоты) попаданий в состояния BP, BЯ, BC и BЯC за время наблюдения | $\tilde{n}_{BP}, \tilde{n}_{BЯ}, \tilde{n}_{BC}, \tilde{n}_{BЯC}$ |
| 6. Число (частота) явных отказов за время наблюдения | $\tilde{n}_{\text{я}} = \tilde{n}_{BЯ} + \tilde{n}_{BЯC}$ |
| 7. Среднее арифметическое времени одного цикла | $\tilde{t}_{UV} = \tilde{t} / \tilde{n}_B$ |
| 8. Среднее арифметическое продолжительности одного восстановления | $\tilde{t}_{\text{IB}} = \tilde{t}_B / \tilde{n}_B$ |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9. Среднее арифметическое времени нахождения в подмножестве U на одном цикле | $\tilde{t}_U = \tilde{t}_{UV} - \tilde{t}_{VB}$ |
| 10. Оценка среднего числа проверок на одном цикле (оценка среднего числа проверок, приходящихся на одно восстановление) | $\tilde{n}_{П/В} = \tilde{n}_{П} / \tilde{n}_{В}$ |
| 11. Общая наработка объекта без учёта состояний восстановления | $\tilde{t} - \tilde{t}_B$ |
| 12. Оценка интенсивности явных отказов | $\tilde{\lambda}_Я = \tilde{n}_Я / (t - \tilde{t}_B)$ |
| 13. Оценка интенсивности проверок | $\tilde{\gamma} = \tilde{n}_{П} / (t - \tilde{t}_B)$ |
| 14. Оценки относительных частот состояний подмножества V | $\tilde{p}_{ВР} = \tilde{n}_{ВР} / \tilde{n}_В$ $\tilde{p}_{ВЯ} = \tilde{n}_{ВЯ} / \tilde{n}_В$ $\tilde{p}_{ВС} = \tilde{n}_{ВС} / \tilde{n}_В$ $\tilde{p}_{ВЯС} = \tilde{n}_{ВЯС} / \tilde{n}_В$ |

6. Оценивание ненаблюдаемых параметров при эксплуатационных испытаниях

Итак, будем считать, что определены оценки следующих наблюдаемых параметров: $\tilde{p}_{ВР}, \tilde{p}_{ВЯ}, \tilde{p}_{ВС}, \tilde{p}_{ВЯС}, \tilde{\lambda}_Я, \tilde{\gamma}, \tilde{t}_U, \tilde{n}_{П/В}$. К ненаблюдаемым параметрам относятся интенсивность скрытых отказов и вероятности ошибок контроля I и II рода. Будем обозначать оценки этих параметров через $\hat{\lambda}_С, \hat{\alpha}, \hat{\beta}$. Эти оценки не могут быть определены прямыми методами. Они находятся расчётно-экспериментальным методом. Подставив исходные статистические данные в формулы, связывающие теоретические параметры (табл. 2), получим систему уравнений, в которой неизвестными являются оценки параметров $\hat{\lambda}_С, \hat{\alpha}, \hat{\beta}$, а оценки наблюдаемых параметров являются известными:

$$\hat{\alpha} \cdot \tilde{\gamma} / \hat{\Delta}_1 = \tilde{p}_{ВР}, \quad (5)$$

$$\hat{\lambda}_Я / \hat{\Delta}_1 = \tilde{p}_{ВЯ}, \quad (6)$$

$$(1 - \hat{\beta}) \cdot \hat{\lambda}_С \cdot \tilde{\gamma} / (\hat{\Delta}_1 \cdot \hat{\Delta}_2) = \tilde{p}_{ВС}, \quad (7)$$

$$\hat{\lambda}_С \cdot \tilde{\lambda}_Я / (\hat{\Delta}_1 \cdot \hat{\Delta}_2) = \tilde{p}_{ВЯС}, \quad (8)$$

$$[\hat{\lambda}_С + \tilde{\lambda}_Я + (1 - \hat{\beta}) \cdot \tilde{\gamma}] \cdot \tilde{\gamma} / (\hat{\Delta}_1 \cdot \hat{\Delta}_2) = \tilde{n}_{П/В}, \quad (9)$$

$$[\hat{\lambda}_С + \tilde{\lambda}_Я + (1 - \hat{\beta}) \cdot \tilde{\gamma}] / (\hat{\Delta}_1 \cdot \hat{\Delta}_2) = \tilde{t}_U, \quad (10)$$

где $\hat{\Delta}_1 = \hat{\lambda}_С + \tilde{\lambda}_Я + \hat{\alpha} \cdot \tilde{\gamma}$, $\hat{\Delta}_2 = \tilde{\lambda}_Я + (1 - \hat{\beta}) \cdot \tilde{\gamma}$.

Видно, что система уравнений (5) – (10) является переопределённой, ее решение может быть в виде разных формул (однако числовые значения неизвестных будут одинаковыми при разных формулах). Разделив (5) на (6), получим:

$$\hat{\alpha} = \tilde{\lambda}_Я \cdot \tilde{p}_{ВР} / \tilde{\gamma} \cdot \tilde{p}_{ВЯ}. \quad (11)$$

Раскрыв (6) и подставив в него $\hat{\alpha}$, оценим интенсивность скрытых отказов:

$$\hat{\lambda}_С = \tilde{\lambda}_Я \cdot (\tilde{p}_{ВС} + \tilde{p}_{ВЯС}) / \tilde{p}_{ВЯ}. \quad (12)$$

И, наконец, параметр $\hat{\beta}$ или $1 - \hat{\beta}$ может быть оценён из других уравнений. Из уравнения (8) следует:

$$1 - \hat{\beta} = [\hat{\lambda}_Я \cdot (\hat{\lambda}_С - \hat{\Delta}_1 \cdot \tilde{P}_{ВЯС}) / (\tilde{\gamma} \cdot \hat{\Delta}_1 \cdot \tilde{P}_{ВЯС})]. \quad (13)$$

Итак, произведена оценка как наблюдаемых, так и ненаблюдаемых параметров, необходимых для расчёта надёжности. Приведённый подход заключается в одновременном применении экспериментального и расчётно-экспериментального метода оценки показателей надёжности и других параметров. Уравнения для расчётно-экспериментального метода получены на основе описания процесса эксплуатации объекта матричной моделью.

7. Заключение

Приведённый подход к обработке статистических данных, полученных при эксплуатационных испытаниях, является идеализированным представлением реальной действительности. Для каждого конкретного случая имеют место свои особенности: разные условия эксплуатации, разные возможности мониторинга и регистрации исходных статистических данных, разные зависимости между параметрами, разные возможности для объединения выборок и т.д. Приведённый подход может послужить основой для создания системы сбора и обработки статистической информации о надёжности объекта в процессе эксплуатации, что позволяет получить достоверную информацию о надёжности объекта. Непрерывный мониторинг технического состояния объекта позволяет обнаружить явные отказы в момент их возникновения, однако скрытые отказы и ошибки контроля фиксируются при восстановлении после проведения периодического контроля. Следует отметить, что объём статистической информации может быть увеличен за счёт объединения сведений об однотипных объектах, эксплуатируемых в одинаковых условиях.

Выводы.

1. Существенная часть исходных статистических данных может быть получена путём мониторинга состояний восстановления объектов.
2. Статистические данные о состояниях восстановления использованы для получения точечных оценок интенсивности скрытых отказов и вероятностей ошибок контроля I и II рода. Эти оценки не могут быть получены прямыми методами.
3. Для вычисления точечных оценок ненаблюдаемых параметров использованы уравнения, связывающие оценки наблюдаемых и ненаблюдаемых параметров. Эти уравнения получены с помощью матричной модели процесса эксплуатации объекта длительного использования.
4. Приведённый подход позволил применить одновременно расчётный и расчётно-экспериментальный метод расчёта оценок показателей надёжности.

Литература

1. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 50779.10-2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения.
3. *Зверев Г. Я.* Оценка надёжности изделия в процессе эксплуатации. М.: URSS, 2010.
4. *Зеленцов Б. П., Максимов В. П., Шувалов В. П.* Модель функционирования линии связи в условиях недостоверного контроля // Вестник СибГУТИ. 2015. № 3. С. 35–43.
5. *Зеленцов Б. П.* Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017. 133 с.
6. *Зеленцов Б. П.* Матричные модели функционирования оборудования систем связи // Вестник СибГУТИ. 2015. № 4. С. 62–73.
7. *Зеленцов Б. П.* Метод относительных частот моделирования вероятностных систем // Вестник СибГУТИ. 2017. № 2. С. 51–63.

8. *Зеленцов Б. П.* Циклическое функционирование систем длительного использования // Вестник СибГУТИ. 2017. № 4. С. 3–14.
9. *Махитко В. П., Засканов М. В., Савин М. В.* Методы оценки показателей надёжности изделий по результатам испытаний и эксплуатации // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. С. 293–299.
10. *Надёжность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др., под ред. И. А. Ушакова.* М.: Радио и связь, 1985.
11. *Павлов И. В.* Статистические методы оценки надёжности сложных систем по результатам испытаний. М.: Радио и связь, 1982.
12. *Чекмарев Ю. В.* Надёжность информационных систем. М.: Дик Пресс, 2012.

*Статья поступила в редакцию 03.04.2018;
переработанный вариант – 19.09.2018.*

Зеленцов Борис Павлович

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

Dependability measures assessment of electronic equipment according to field dependability test

B. P. Zelentsov

The paper considers dependability measures assessment method of electronic equipment during field dependability test. The idea of the method consists in monitoring and registration of observable parameters of events and states such as explicit failures rates, duration of states, frequencies of states. These parameters are estimated by experimental dependability assessment. Application of analytical-experimental dependability assessment allows you to obtain non-observable parameters estimations such as latent failures rate and check-out errors probabilities of the first and the second kind. The considered approach is based on matrix dependability model for long functioning stochastic systems. Relations between parameters are derived by using this model.

Keywords: field dependability test, check-out errors of the first and the second kind, rate of explicit and latent failures.