

УДК 621.396

Р.Г. Зиганшин, В.В. Кальников, А.Л. Савкин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Зиганшин Руслан Габдуллович, кандидат военных наук, окончил Военную академию связи им. С.М. Буденного, адъюнктуру (там же). Ведущий инженер по подготовке производства ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Специализируется в области эксплуатации и технического обслуживания техники связи и АСУВ. Имеет публикации в области теорий надежности и технической диагностики. [e-mail: zuganshin-ruslan@yandex.ru].

Кальников Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент, окончил радиоинженерный факультет Киевского высшего военного инженерного училища связи им. М.И. Калинина. Главный специалист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Специализируется в области многоканальной электропроводной и волоконно-оптической связи. Имеет статьи, учебные пособия, изобретения в области проектирования цифровых и волоконно-оптических систем передачи. [e-mail: kvvik@bk.ru].

Савкин Александр Леонидович, кандидат военных наук, доцент, окончил Ульяновское высшее военное командное училище связи, Военную академию связи им. С.М. Буденного, адъюнктуру (там же). Главный специалист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет научные работы, учебные пособия, статьи в области разработки и моделирования систем управления и связи. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

В статье рассмотрен подход к прогнозированию технического состояния радиоэлектронных изделий (РЭИ) на основе метода статического моделирования. Приведены основные положения математического аппарата, используемого в рамках рассмотренного метода моделирования. Проанализированы способы разработки моделирующих алгоритмов прогнозирования технического состояния РЭИ с точки зрения их эффективности машинной реализации.

Ключевые слова: прогнозирование технического состояния, радиоэлектронное изделие, метод статического моделирования, задачи статического моделирования, моделирующий алгоритм, способы разработки моделирующих алгоритмов.

Ruslan Gabdullovich Ziganshin, Candidate of Military Sciences; graduated from the Military Communications Academy named after S. Budenny; finished his post-graduate studies at the same academy; lead engineer at Federal Research-and-Production Center 'Research-and-Production Association 'Mars'; specializes in the field of operation and maintenance of communications equipment and C2 systems; author of publications in the field of reliability theory and technical diagnostics. e-mail: zuganshin-ruslan@yandex.ru.

Vladimir Viktorovich Kalnikov, Candidate of Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Radio-Engineering of Kiev Higher Military Communications Engineering College named after M. Kalinin; chief specialist at Federal Research-and-Production Center 'Research-and-Production Association 'Mars'; specializes in the field of multi-channel electricity and fiber-optic communications; author of articles, text-books, inventions in the field of design of digital and fiber-optic transmission systems. e-mail: kvvik@bk.ru.

Alexander Leonidovich Savkin, Candidate of Military Sciences, Associate Professor; graduated from Ulyanovsk Higher Military Command Communications College, the Military Communications Academy named after S. Budenny; finished his post-graduate studies at the same academy; chief specialist at Federal Research-and-Production Center 'Research-and-Production Association 'Mars'; author of papers, text-books, articles in the field of development and modeling of C3 systems. e-mail: mars@mv.ru.

Abstract

The article deals with an approach to forecasting of technical state of radioelectronic products on basis of a method of static modeling. It also cites basic ideas of the mathematical support for the considered modeling method, and analyses ways of developing modeling algorithms to forecast technical state of radioelectronic products from the point of view of their efficiency in computer implementation.

Key words: forecasting of technical state, radioelectronic product, method of static modeling, tasks of static modeling, modeling algorithm, ways of developing modeling algorithms.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающая сложность РЭИ, всемерное повышение сложности функций, которые они выполняют, приводят к увеличению требований к качеству изделий и условиям их работы. Кроме того, возросшая роль автоматизации является основным фактором, определяющим требования к повышению надежности автоматизированных систем [1, 2].

Повышение надежности автоматизированных систем непосредственно связано с развитием исследований в области диагностики и прогнозирования технического состояния входящих в их состав РЭИ. Решение этой проблемы предполагает осуществление комплекса мероприятий, наиболее важным из которых является прогнозирование технического состояния РЭИ на базе математического моделирования [3]. В настоящее время интенсивно развиваются методы моделирования прогнозирования технического состояния радиоэлектронных устройств, имеющие целью повышение эффективности инженерного проектирования функциональных узлов и конструкций.

Однако до настоящего времени нет единого мнения в отношении адекватного моделирования прогнозирования технического состояния РЭИ, входящих в состав технических средств систем автоматизации, что связано с большим разнообразием и сложностью физических процессов взаимодействия. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования в данной области, предлагающие новые методы моделирования прогнозирования технического состояния РЭИ, являются актуальными.

Особое внимание должно быть уделено математическому моделированию, что даст возможность существенно снизить долю дорогостоящих экспериментов при исследовании различных характеристик РЭИ.

Основными задачами в данной области являются [4]:

- анализ механизмов влияния внешней среды и режимов работы на техническое состояние РЭИ и выявление совокупности существенных факторов;
- выбор вида математических моделей прогнозирования;
- выбор и обоснование входных и выходных параметров модели;
- экспериментальные исследования процесса изменения технического состояния РЭИ;
- выбор и обоснование метода и алгоритмов прогнозирования;
- разработка и обоснование методики прогнозирования технического состояния РЭИ.

Существующие методы математического моделирования, позволяющие прогнозировать техническое состояние РЭИ, можно разделить на классы по следующим признакам [5]:

- по цели моделирования: прямого и обратного прогнозирования;
- по характеру исследуемых процессов: детерминированные и стохастические;
- по динамике исследуемых процессов: статические и динамические;
- по количеству контролируемых параметров, описывающих техническое состояние исследуемого РЭИ: одномерные и многомерные;

- по источнику информации, на основе которого получают сведения об исследуемых процессах: модели, синтезированные на основе результатов ускоренных лабораторных испытаний, и модели, полученные в результате обработки данных подконтрольной эксплуатации и диагностики РЭИ в реальных условиях эксплуатации.

Вышеперечисленные модели в соответствии с положениями, изложенными в [6, 7], можно разделить по используемому научному подходу на три группы:

- физические или аналитические модели, которые получены путем изучения физических закономерностей процесса изменения технического состояния РЭИ, вследствие чего структура уравнений и параметры моделей подчиняются законам физики;
- вероятностные модели, построенные на основе результатов, полученных при статических наблюдениях. Результаты статических наблюдений обработаны с применением аппарата теории вероятностей и математической статистики;
- формальные модели, полученные на основе анализа входных и выходных параметров РЭИ, представленного в виде «черного ящика», при помощи статистического анализа.

Надежность технических систем, в том числе и РЭИ, закладывается на этапе проектирования и производства. Поэтому на основе проведенного в [8] анализа, несмотря на недостатки (сложность получения статистических данных, учитывающих все условия эксплуатации), наиболее подходящим методом математического моделирования прогнозирования технического состояния РЭИ является метод статического моделирования.

Метод статического моделирования

Математическое моделирование позволяет в подавляющем большинстве случаев предсказать ход протекания физических процессов и, следовательно, может использоваться как инструмент прогнозирования. Рассмотрим несколько подходов к решению задачи прогнозирования с помощью статического моделирования.

Если имеются математические зависимости, описывающие исследуемое РЭИ, то с помощью статического моделирования можно имитировать изменения во времени параметров элементов схемы и, зная кривые старения комплектующих элементов, установить сроки его профилактического контроля, выделить наиболее вероятные типичные кривые изменения параметров и тем самым наиболее типичные закономерности потери работоспособности.

Закономерность изменений во времени параметров элементов диагностируемых РЭИ лежит в основе использования функций старения при моделировании прогнозирования технического состояния.

В качестве примера рассмотрим РЭИ, представляющее собой простую пассивную цепь, описываемую уравнением

$$U(t) = \frac{L(t)di}{dt} + R(t)i + \frac{q}{c(t)}, \quad (1)$$

где U , i , q – соответственно напряжения, ток в цепи и заряд конденсатора;

$L(t), R(t), c(t)$ – индуктивность, сопротивление и емкость, рассматриваемые как функции времени.

Предполагая изменения $L(t), R(t), c(t)$ во времени случайными, определим, когда из-за старения элементов цепи $U(t)$ достигнет предельного уровня U^* и перестанет удовлетворять предъявляемым требованиям.

Если известна зависимость (1) и закономерности изменения L, R, c во времени, а также функции распределения $f_t(L), f_t(R), f_t(c)$ в различных временных t сечениях, то, моделируя изменения параметров элементов, можно определить для каждого момента времени вероятность

$P_t\{U(t) < U^*\}$ и, в конечном счете, время достижения $U(t)$ уровня U^* . Если известны кривые $L(t), R(t), c(t)$, то можно построить своего рода эталонные траектории $U(t)$ для различных значений токов (нагрузки) и внешних воздействующих факторов (температуры и др.).

Метод статического моделирования позволяет исследовать нелинейные схемы при произвольных распределениях параметров объекта, а также учитывать флуктуацию параметра. Однако здесь также необходима априорная информация о процессах старения, износа и деградации элементов РЭИ.

Процесс статического моделирования сводится к получению выборок определенного объема из генеральной совокупности [9]. На основании этих выборок определяются числовые характеристики генеральной совокупности. Объем выборок определяет точность полученного результата. Поскольку объем выборок, как правило, ограничен, в результате моделирования получаются оценки значений числовых характеристик.

Несмещенной оценкой математического ожидания значения прогнозируемого параметра РЭИ является среднее арифметическое результатов n опытов:

$$\bar{x}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где \bar{x}^* – математическое ожидание значения прогнозируемого параметра РЭИ;

n – количество опытов, проведенных во время эксперимента;

x_i – точечное значение прогнозируемого параметра РЭИ при проведении i -го эксперимента.

Несмещенной оценкой дисперсии будет

$$D_x^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}^*)^2, \quad (3)$$

где D_x^* – дисперсия значения прогнозируемого параметра РЭИ.

Оценкой вероятности P^* события, заключающегося в выходе значения прогнозируемого параметра РЭИ за пределы допустимых норм, является частота его появления в n испытаниях:

$$P^* = \frac{k}{n}, \quad (4)$$

где k – количество испытаний, в течение которых произошло событие;

n – общее количество испытаний.

Погрешность определения значений прогнозируемых параметров РЭИ из-за ограниченности объема выборок носит вероятностный характер. Нельзя утверждать категорически, что ошибка не превысит определенной величины. Можно лишь указать границы, за пределы которых ошибка не выйдет с заданной вероятностью.

Практически необходимо определить погрешность результата по известному числу реализаций, или наоборот, по заданной точности выбрать необходимое число реализаций. Решить эту задачу помогает взаимосвязь количества опытов, точности и достоверности полученных результатов. Под достоверностью понимается доверительная вероятность α того, что интервал $(a^* - \varepsilon, a^* + \varepsilon)$ накрывает неизвестный параметр a [5]:

$$\alpha = P(a^* - \varepsilon < a < a^* + \varepsilon), \quad (5)$$

где a^* – значение параметра a РЭИ, полученное в ходе эксперимента.

Доверительные интервалы для вероятности P зависят от числа реализаций n_p :

$$P = P^* \pm 2 \sqrt{\frac{P^*(1-P^*)}{n_p}}, \quad (6)$$

где P^* – значение вероятности выхода значения прогнозируемого параметра РЭИ за пределы допустимых норм, полученное в ходе эксперимента.

Необходимое число реализаций n_p , обеспечивающее вычисление значения искомой вероятности P с погрешностью не больше ε равно

$$n_p = \frac{4P(1-P)}{\varepsilon^2}. \quad (7)$$

Доверительные интервалы для математического ожидания:

$$\bar{x} = \bar{x}^* \pm \frac{2}{\sqrt{n_p}} \sqrt{\frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} x_i^2 - (\bar{x}^*)^2}, \quad (8)$$

где x_i – значение случайной величины x в i -й реализации.

Необходимое число реализаций для получения среднего значения прогнозируемого параметра РЭИ с ошибкой не более ε :

$$n_p = \frac{4D_x}{\varepsilon^2}, \quad (9)$$

где D_x – дисперсия случайной величины x .

Дисперсию D_x следует вначале вычислить ориентировочно:

$$D_x \approx \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} x_i^2 - (\bar{x}^*)^2, \quad (10)$$

а затем уточнять по мере накопления данных.

Как следует из выражений (8), (10), для задания необходимого числа реализаций, обеспечивающего вычисление искомого параметра с заданной точностью, требуется

знать хотя бы ориентировочно значение определяемого параметра. Это не всегда возможно. Поэтому существует другой подход, широко применяемый на практике. Этот подход позволяет вести текущий автоматический контроль точности решения и устанавливать момент останова ЭВМ по достижении заданной точности.

Задается первоначальное заведомо заниженное число реализаций, а затем после каждой последующей реализации проверяется условие $\varepsilon < \varepsilon_{TP}$ (ε_{TP} – требуемое значение точности в тех же единицах измерения что и ε). При этом для оценки точности ε математического ожидания можно использовать выражение

$$\varepsilon = t_{\alpha} \sqrt{\left[\left(\sum_{i=1}^{n_p} x_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^{n_p} x_i \right)^{-2} - \frac{1}{n_p} \right] \frac{n_p}{n_p - 1}}, \quad (11)$$

где ε – значение точности в долях от полученного результата;

$$t_{\alpha} = \sqrt{2} \Phi^{-1}(\alpha) \quad (\text{см. таблицу}) [6];$$

$\Phi^{-1}(\alpha)$ – функция, обратная функции Лапласа, т. е. такое значение аргумента, при котором функция Лапласа равна доверительной вероятности α .

Для оценки относительной погрешности при вычислении вероятности P^* используется выражение

$$\varepsilon = t_{\alpha} \sqrt{\frac{1 - P^*}{P^* n_p}}. \quad (12)$$

Таблица

Значения t_{α} при различных значениях доверительной вероятности α

| α | t_{α} | α | t_{α} | α | t_{α} | α | t_{α} |
|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| 0,80 | 1,282 | 0,85 | 1,439 | 0,91 | 1,694 | 0,96 | 2,053 |
| 0,81 | 1,310 | 0,86 | 1,475 | 0,92 | 1,750 | 0,97 | 2,169 |
| 0,82 | 1,340 | 0,87 | 1,513 | 0,93 | 1,810 | 0,98 | 2,325 |
| 0,83 | 1,371 | 0,88 | 1,554 | 0,94 | 1,880 | 0,99 | 2,576 |
| 0,84 | 1,404 | 0,89 | 1,597 | 0,95 | 1,960 | 0,9973 | 3,000 |

На основе анализа, проведенного в [6, 7], задачи статистического моделирования можно разделить на следующие три группы по способу повышения достоверности определения значений параметров РЭИ при прогнозировании технического состояния.

1. Значения параметров РЭИ, вычисляемые моделированием, которые можно получить с помощью эксперимента для ограниченной области изменения входных параметров. Тогда можно использовать эксперимент для контрольной проверки модели в ряде точек, и в случае несовпадения результатов модель корректируется.

2. Значения параметров РЭИ, у которых прогнозируется техническое состояние, можно вычислить только с помощью моделирования. Исходные данные (законы рас-

пределения случайных характеристик элементов схемы РЭИ) получены в результате экспериментов. Тогда избежать ошибок можно только тщательной формализацией процесса, исключающей непроверенные допущения и ограничения. Все последующие ограничения и допущения при доработке модели следует тщательно оценивать по их влиянию на величину определяемого параметра.

3. Значения параметров исследуемого РЭИ можно вычислить только с помощью моделирования, но законы распределения исходных случайных величин получены в результате теоретических исследований на основе априорных данных или же частично с помощью натурального эксперимента. Здесь также основную роль играет точность начального математического описания модели прогнозирования технического состояния. Но, поскольку исходные данные недостоверны, оценка допущений и ограничений для этих задач является значительно более сложной.

После тщательной формализации процесса прогнозирования технического состояния РЭИ составляется моделирующий алгоритм. Алгоритм можно представить различными способами: в виде логического описания, логической схемы или описания на одном из специальных языков.

При разработке алгоритма необходимо учитывать все возможные ситуации, которые могут возникнуть в процессе решения, т. е. необходимо предусмотреть все возможные состояния процесса прогнозирования. Поэтому даже для сравнительно простых задач строятся разветвленные алгоритмы. Если упустить хотя бы одно из возможных состояний, то алгоритм будет работоспособным только для частных случаев.

Универсальный алгоритм составить сложно: он получается громоздким, трудно поддается отладке и требует больших затрат машинного времени. Поэтому удобнее иметь набор более простых алгоритмов, каждый из которых предназначен для решения отдельной задачи.

В настоящее время основными способами воспроизведения на ЭВМ процессов прогнозирования технического состояния РЭИ являются [8]:

- 1) Δt -способ;
- 2) способ, основанный на формировании и анализе моментов перехода РЭИ из состояния в состояние;
- 3) комбинированный способ, сочетающий два первых.

Δt -способ

Суть способа заключается в следующем.

Весь промежуток времени T , в течение которого предполагается моделировать процесс прогнозирования технического состояния РЭИ, разбивается на отдельные моменты времени t_i через интервалы Δt . Интервал Δt выбирается с учетом особенностей функционирования РЭИ, требований к точности результатов и времени, отводимого на решение задачи. В моменты t_i моделируется процесс работы изделия. Все числовые значения параметров, характеризующих качество функционирования, фиксируются в памяти машины. При переходе к моменту времени $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ учитываются все изменения, происшедшие в процессе функционирования, и вычисления повторяются. Накопление статистических данных за $T = i\Delta t$, их

последующая обработка позволяют определить числовые характеристики качества функционирования РЭИ и оценить его техническое состояние.

Этот способ, как правило, применяется в моделях идеального функционирования, т. е. моделируется сам процесс функционирования в предположении, что элементы РЭИ идеально надежны. Исследование подобной модели позволяет получить выходные характеристики изделия, которые в дальнейшем используются для оценки влияния различных факторов, в том числе и ненадежности, на его техническое состояние.

Способ, основанный на формировании и анализе моментов перехода РЭИ из состояния в состояние

Способ формирования и анализа моментов перехода РЭИ из одного состояния в другое используется в моделях работоспособности, предназначенных для исследования технического состояния путем воспроизведения процессов отказов и восстановлений. Здесь конкретный процесс функционирования косвенно учитывается на предварительном этапе до построения модели при формулировании критерия отказа изделия.

Сущность способа заключается в формировании для каждого элемента РЭИ последовательности случайных чисел времени работы (τ_{p_i}) и времени восстановления (τ_{e_i}), характеризующих времена пребывания элемента в работоспособном состоянии или неработоспособном. Случайные величины τ_{p_i} и τ_{e_i} формируются в соответствии с законами распределения времени безотказной работы $F(t)$ и времени восстановления $G(t)$.

Далее состояние РЭИ анализируется в точках изменения состояний элементов и формируется вывод о техническом состоянии в соответствии с принятым критерием отказа. В зависимости от метода воспроизведения с помощью ЭВМ траектории изменения состояний изделия различают последовательное и параллельное решение задачи. При последовательном решении вначале моделируются моменты только первого изменения состояния у каждого из элементов. По наименьшему из полученных моментов времени формируется первый переход РЭИ в другое состояние ($S_1 \rightarrow S_2$), и это состояние анализируется. Затем моделируется момент времени следующего изменения состояния для элемента, имевшего наименьший момент первого изменения и использованного для образования S_2 . Новый момент записывается в память машины. Далее процесс повторяется, т. е. по наименьшему моменту для элементов формируется переход $S_2 \rightarrow S_3$ и т. д. до тех пор, пока время очередного состояния системы S_i не превысит заданное время T . После этого сформированные в процессе моделирования данные используются для формирования выводов о техническом состоянии РЭИ после каждого перехода из состояния в состояние.

При параллельном решении задачи необходимо для каждого элемента РЭИ сначала определить интервалы работоспособного состояния (τ_{p_i}) и восстановления

(τ_{e_i}), а затем рассчитать моменты отказов и восстановлений элементов (t_{omk_i} , τ_{e_i}), которые могут произойти при выбранных законах распределения за весь интервал моделирования T :

$$t_{omk1} = \tau_{p1}, \quad (13)$$

$$t_{e1} = t_{omk1} + \tau_{e1}, \quad (14)$$

$$t_{omk_i} = \tau_{e_{i-1}} + \tau_{p_i}, \quad (15)$$

$$\tau_{e_i} = t_{omk_i} + \tau_{e_i}. \quad (16)$$

Выполнив такую работу параллельно по всем элементам и за весь период T , можно затем расположить моменты t_i изменения состояний РЭИ в порядке возрастания времени ее функционирования. Используя совокупность полученных результатов, можно построить траекторию состояний изделия.

Комбинированный способ

Этот способ применяется в моделях реального функционирования, представляющих собой модели совместного воспроизведения двух процессов: процесса изменения работоспособности элементов РЭИ и реального процесса функционирования. Чтобы связать эти два процесса, необходимо иметь информацию о поведении элементов изделия в различных режимах, обусловленных отказами отдельных элементов или изменениями условий окружающей среды.

При комбинированном способе одновременно проводится анализ процесса в точках изменения состояния системы и моделируется процесс функционирования через небольшие интервалы времени Δt .

Этот способ хорошо применим к функционально-избыточным системам, у которых можно различить несколько уровней работоспособного состояния, таким, как автоматизированные системы управления. В таких случаях оценка качества системы осуществляется по выходному эффекту, т. е. определяется оперативная эффективность системы с учетом изменения технического состояния входящих в нее РЭИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, повышение надежности автоматизированных систем непосредственно связано с развитием исследований в области диагностики и прогнозирования технического состояния входящих в их состав РЭИ. При решении этой проблемы особое внимание должно быть уделено математическому моделированию, что даст возможность существенно снизить долю дорогостоящих экспериментов при исследовании различных характеристик РЭИ.

Основными задачами в данной области являются:

- анализ механизмов влияния внешней среды и режимов работы на техническое состояние РЭИ и выявление совокупности существенных факторов;
- выбор вида математических моделей прогнозирования технического состояния РЭИ;
- выбор и обоснование входных и выходных параметров модели;
- экспериментальные исследования процесса изменения технического состояния РЭИ;

– выбор и обоснование метода и алгоритмов прогнозирования технического состояния;

– разработка и обоснование методики прогнозирования технического состояния РЭИ.

Наиболее подходящим для прогнозирования технического состояния РЭИ является метод статического математического моделирования.

Универсальный алгоритм прогнозирования технического состояния РЭИ составить сложно: он получается громоздким, трудно поддается отладке и требует больших затрат времени и сил. Поэтому удобнее иметь набор более простых алгоритмов, каждый из которых предназначен для решения определенного класса задач.

В настоящее время основными способами воспроизведения на ЭВМ процессов прогнозирования технического состояния РЭИ являются:

1) Δt -способ;

2) способ, основанный на формировании и анализе моментов перехода РЭИ из состояния в состояние;

3) комбинированный способ.

Наиболее подходящим способом для разработки алгоритмов прогнозирования технического состояния функционально-избыточных систем, у которых можно различить несколько уровней работоспособного состояния, таких, как автоматизированные системы управления, является комбинированный способ. При этом оценка качества системы осуществляется по выходному эффекту, т. е. определяется оперативная эффективность системы с учетом результатов прогнозирования технического состояния входящих в нее РЭИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогнозирование технического состояния радиоэлектронных изделий при определении технологии ремонтов и состава запасного имущества и принадлежности / Р.Г. Зиганшин [и др.] // Автоматизация процессов управления. – 2010. – № 2 (20). – С. 102–106.

2. Пятаков А.И., Зиганшин Р.Г. Обработка статистических данных о надежности функционирования изделий, находящихся в эксплуатации // Автоматизация процессов управления. – 2010. – № 1 (19). – С. 59–63.

3. Тупик В.А. Технология организации производства радиоэлектронной аппаратуры. – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. – 470 с.

4. Ярлыков Н.Е. Повышение эффективности контроля надежности. – М. : Радио и связь, 2003. – 192 с.

5. Надежность и эффективность в технике. Справочник. В 10 т. Т. 9. Техническая диагностика / под общ. ред. В.В. Клюева, П.П. Пархоменко. – М. : Машиностроение, 1987. – 352 с.

6. Барлоу Р., Крошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М. : Наука, 1984. – 234 с.

7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М. : Высш. шк., 2000. – 480 с.

8. Горский Л.К. Статистические алгоритмы исследования надежности. – М. : Наука, 1970. – 219 с.

9. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики : учебник. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 480 с.