

Р.Г. Зиганшин, В.В. Кальников, А.И. Пятаков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТОВ И СОСТАВА ЗАПАСНОГО ИМУЩЕСТВА И ПРИНАДЛЕЖНОСТЕЙ

Зиганшин Руслан Габдуллович, кандидат военных наук, окончил ВАС 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: zuganshina@mail.uln.ru].

Кальников Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент, окончил радиотехнический 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].

Пятаков Анатолий Иванович, кандидат технических наук, окончил ВАС им. С.М. Буденного, адъюнктуру (там же). Главный специалист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Специализируется в области организации и построения систем передачи дискретных сообщений. Имеет публикации в области надежности комплексов средств АСУ и ПД. [e-mail: uljanovsk-anatol@mail.ru].

Аннотация

В статье проанализированы известные методы прогнозирования технического состояния радиоэлектронных изделий. Приведены основные положения математического аппарата, используемого в рамках каждого рассмотренного метода прогнозирования. Предложена совокупность показателей качества методов прогнозирования, позволяющая оценить их количественно в зависимости от формулировки задач и условий их решения. Рассмотрены методы оценки точности прогнозирования технического состояния радиоэлектронных изделий.

Ключевые слова: прогнозирование технического состояния, методы прогноза, процесс прогнозирования, прямое прогнозирование, обратное прогнозирование, аналитическое прогнозирование, вероятностное прогнозирование.

Abstract

The article analyses known methods of forecast of technical state of radio electronic products. It cites fundamentals of mathematical apparatus used within each considered forecast method. It suggests a set of quality factors for forecast methods, allowing to evaluate their quantity subject to task statement and conditions of its solution. It considers methods for evaluation of forecast precision of technical state of radio electronic products.

Key words: forecasting of technical state, forecast methods, forecasting process, direct forecasting, inverse forecasting, analytical forecasting, probabilistic forecasting.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе создания изделия, его производства и настройки, а также подготовки к эксплуатации и самой эксплуатации очень важно уметь определять его техническое состояние, т. е. знать, какими характеристиками обладает изделие в данный момент времени. Эта задача решается средствами обычного технического

контроля, позволяющего получать данные об измеряемых технических параметрах в момент их измерения.

С появлением технических систем, выполняющих ответственные функции, возросла роль предвидения технического состояния изделия в некоторый будущий отрезок времени с тем, чтобы можно было своевременно принять меры по предотвращению отказов. В процессе развития

техники возникла задача управления техническим состоянием больших систем путем своевременного переключения на резерв, своевременного перехода на новые режимы, путем проведения профилактических ремонтных работ с использованием запасных частей и принадлежностей. Но управлять без прогнозирования ожидаемого состояния нельзя. В качестве примеров можно указать современные телекоммуникационные и транспортные системы, системы управления силами и оружием и многие другие. Для таких изделий важно установить не только то, что они исправны в данный момент времени (в период контроля), но и то, что они будут продолжать оставаться исправными на протяжении некоторого будущего интервала времени, а также то, какие запасные узлы и детали понадобятся для восстановления работоспособности в случае его отказа после истечения данного интервала.

Анализ методов и способов прогнозирования технического состояния радиоэлектронных изделий

Вопросы прогнозирования технического состояния изделий привлекают все большее внимание специалистов различных отраслей техники. Это вызвано тем, что в связи с возрастающей ролью автоматических и автоматизированных систем возрастает значение предвидения их состояния. Без предвидения нельзя управлять состоянием системы, нельзя своевременно предупредить аварийные ситуации.

Прогнозирование технического состояния непосредственно связано с теорией надежности; его главная цель заключается в своевременном обнаружении неблагоприятного состояния радиоэлектронного изделия и разработке рекомендаций, которые в конечном счете направлены на повышение ее надежности и эффективности [2].

Прогнозировать техническое состояние радиоэлектронных изделий (прогнозировать событие) — значит предвидеть, предсказать будущее событие на основании изучения факторов, от которых оно зависит или которые ему сопутствуют. Научное прогнозирование основывается на изучении объективных закономерностей, которым подчиняются интересующие нас процессы и события. При этом используются две группы закономерностей [1]:

- закономерности случайных событий или вероятностные (стохастические) закономерности;
- закономерности детерминированные.

При прогнозировании технического состояния радиоэлектронных изделий можно выделить два характерных подхода к решению поставленной задачи [4]:

- прогнозирование технического состояния радиоэлектронных изделий в будущем на основании изучения закономерностей изменения их технического состояния в настоящем;
- прогнозирование технического состояния радиоэлектронных изделий в будущем на осно-

вании изучения закономерностей изменения технического состояния однотипных изделий.

Прогнозирование технического состояния важно не только для периода эксплуатации, но и для периода проектирования изделий, и для процесса производства. При проектировании следует высказать обоснованное предположение о технических характеристиках, которыми будет обладать проектируемое изделие. В процессе производства по результатам испытаний ограниченного объема (малых выборок, при небольших продолжительностях времени испытаний и т. д.) делается предположение о технических характеристиках и работоспособности больших партий на больших временных интервалах. По результатам ускоренных испытаний делается прогноз о предполагаемом состоянии изделий в нормальных условиях.

На принцип прогнозирования влияют различные факторы, но основные из них: совокупность имеющихся параметров, целевая направленность поставленной задачи и рабочий алгоритм.

Совокупность прогнозируемых параметров $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, определяющих техническое состояние радиоэлектронных изделий, можно представить различным образом: значениями параметров в моменты времени t , распределениями параметров, комплексными показателями и т. д.

Процесс прогнозирования преследует различные цели. Он позволяет определить [4]:

1. Закономерности протекания процесса изменения технического состояния радиоэлектронных изделий на протяжении будущего отрезка времени в конкретной размерности.
2. Ожидаемую вероятность того, что исследуемый процесс изменения технического состояния радиоэлектронных изделий не выйдет за установленные допустимые границы.
3. К какому классу долговечности следует отнести исследуемый процесс изменения технического состояния радиоэлектронных изделий.

В зависимости от совокупности прогнозируемых параметров, определяющих техническое состояние радиоэлектронных изделий, и целевой направленности прогнозирования выбираются имеющиеся методы и математический аппарат.

Чтобы обосновать выбор того или иного метода прогнозирования, необходимо иметь возможность количественно оценить его качество. К числу наиболее часто используемых показателей качества прогнозирования относятся:

1. Точность прогнозирования K_T , которая характеризует степень соответствия величины, полученной в результате прогноза, величине действительной. Она измеряется величиной ошибки $\Delta\varphi$, равной разности между величиной φ_{np} , полученной в результате прогноза, и действительной истинной величиной φ_0 : $\Delta\varphi = \varphi_{np} - \varphi_0$.

Если осуществляется вероятностное прогно-

зирование, ошибка $\Delta\varphi$ носит случайный характер и представляется двумя показателями: математическим ожиданием прогнозируемой величины $M_{\Delta\varphi}$ и дисперсией $D_{\Delta\varphi}$. На практике часто бывает удобно оценивать точность прогнозирования возможным интервалом значений прогнозируемой величины (точность оценки) и вероятностью того, что именно в этот интервал попадет истинное значение прогнозируемой величины (достоверность оценки).

2. Достоверность прогнозирования, которая совпадает с понятием достоверности оценки, полученной в результате прогнозирования.

3. Быстродействие прогнозирования, измеряемое затратами времени на процесс прогнозирования.

4. Стоимость прогнозирования, измеряемая затратами материальных средств на операцию прогнозирования, т. е. на создание специальной аппаратуры и на эксплуатацию этой аппаратуры.

5. Информационный показатель качества прогнозирования, указывающий насколько увеличилась информация об объекте в результате прогнозирования.

6. Показатель полноты прогнозирования, который представляет собой отношение числа параметров, охваченных контролем, к общему числу параметров, определяющих работоспособность изделия.

Из приведенных показателей для исследуемой области применения наиболее важными являются показатели 1 и 2.

В рамках указанных направлений наиболее часто используются способы, в которых решается прямая (прямое прогнозирование) или обратная (обратное прогнозирование) задача [4].

При прямом способе и в случае аналитического прогнозирования предполагается наличие связей между характеристиками процесса $Q(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, t_i); t_i \in T_1; i = 0, 1, \dots, n$ и $Q(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, t_{n+j}); t_{n+j} \in T_2; j = 1, 2, \dots, m$, причем $T_1 \cup T_2$, и, получая из эксперимента или расчетным путем значение $Q(\xi_s, t_i)$, находят аналитическое выражение зависимости

$$Q(\xi_s, t_{n+j}) = \varphi[Q(\xi_s, t_i)], \quad (1)$$

которое позволяет определить значение процесса для любого момента времени $t_{n+j} \in T_2; j = 1, 2, \dots, m$.

При вероятностном решении задачи прямое прогнозирование предусматривает получение зависимости, аналогичной (1):

$$P_Q(t_{n+j}) = \varphi_1[f_{i_1}(\xi_1), f_{i_2}(\xi_2), \dots, f_{i_k}(\xi_k)] = \varphi_2[f_{i_1}(Q)], \quad (2)$$

где $P_Q(t_{n+j})$ – прогнозируемая вероятность;

$f_{i_1}(Q), f_{i_2}(Q)$ – плотности распределения вероятностей значений процесса Q и его координат ξ_i ;

φ_1, φ_2 – соответствующие функциональные зависимости, выражающие характер связей.

Идея обратной задачи заключается в определении времени $t_{nc} = t^*$ (долговечности или времени «жизни» изделия), когда характеристика процесса $Q(\xi, t)$ или вероятности $P(Q)$ достигает предельных значений, задаваемых наложенными ограничениями.

При аналитическом обратном прогнозировании в выражении (1) вводится предельное значение $Q^*(\xi)$, и полученное уравнение решается относительно $t_{n+j} = t^*$, т. е. находится t^* в явном виде. Таким образом, величину t^* , как результат вероятностного обратного прогнозирования, можно найти из следующего выражения [1]:

$$P\{|Q(\xi, t^*) - Q_n(\xi_s)\} < E\} = P^*(Q), \quad (3)$$

где $P^*(Q)$ – допустимая вероятность нахождения функции Q в заданной области;

$Q_n(\xi_s)$ – номинальное значение функции $Q(\xi, t)$ в области $t_{n+1} \dots t_{n+m}$ для значений $t_{n+j} (j = 1, 2, \dots, m)$;
 $E = Q^*(\xi) - Q_n(\xi_s)$.

Обратное прогнозирование удобно тем, что результатом вычислений является не величина контролируемого параметра в будущие моменты времени (прямое прогнозирование), а момент времени выхода процесса за допустимые границы.

Применение обратного прогнозирования существенно расширяет круг практических задач, которые могут быть решены. С другой стороны, для решения этих задач пригодны методы прямого прогнозирования после некоторого преобразования. При этом принципиальным отличием является только то, что при прямом прогнозировании задаются моменты времени в будущем и необходимо вычислить величины параметров в эти моменты, а при обратном – задается величина параметра в будущем (допустимая граница) и необходимо вычислить момент времени, когда процесс достигает такого уровня, что параметр выйдет за допустимые пределы. Этот процесс можно описать выражением:

$$Q_{n+j} = Q_n + \gamma_{n+j} \nabla Q_n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

где значения функции работоспособности в будущие моменты эксплуатации являются функцией всех слагаемых в правой части:

$$Q_{n+j} = f(Q_n, \nabla Q_n, \gamma_{n+j}), \quad (5)$$

где Q_{n+j} – функция состояния (работоспособности) в существующие моменты времени;

∇Q_n – вектор градиента функции состояния;
 $\gamma_{n+j} > 0$ – параметр, характеризующий длину шага прогнозирования.

Поскольку при обратном прогнозировании необходимо определять момент достижения функцией допустимой границы Q^* , т. е. когда $Q_{n+j} = Q^*$, то (4) можно переписать:

$$Q^* = Q_n + T_{жс} \nabla Q_n, \quad (6)$$

где неизвестной величиной является $T_{жс}$ — время жизни или долговечность объекта, $T_{жс} = j\Delta t$.

Отсюда

$$T_{жс} = (Q^* - Q_n) / \nabla Q_n \quad (7)$$

и зависимость, аналогичная (5), может быть записана как

$$T_{жс} = \varphi(Q_n, \nabla Q_n, Q^*), \quad (8)$$

т. е. две величины меняются местами.

В одномерном варианте правую часть его можно записать как

$$\xi^* = \sum_{i=1}^n A_i \sum_{p=0}^l \gamma_p \alpha_p T_{жс}^{ip}, \quad (9)$$

где γ_p и α_p — первичные адаптационные (корректировочные) коэффициенты;

A_l — степенные адаптационные коэффициенты ($l = 1, 2, \dots, \mu$ — степень базовых выражений, которые применяются при прогнозировании величины контролируемых параметров);

$$p = 0, 1, \dots, \mu;$$

p — степень временной функции простейшего вида.

$$\text{При } \varphi_0 = 1, \varphi_1 = t^p, \varphi_2 = t^{2p}, \dots, \varphi_\mu = t^{\mu p}$$

(p может быть любым положительным целым или дробным числом).

Процесс изменения контролируемых параметров радиоэлектронных изделий является в определенной степени монотонным и постепенным, а также инерционным во времени. Поэтому количественное выражение процесса (изменения параметра ξ^*) можно разложить в ряд с помощью полиномов различных степеней. Такое разложение аналогично спектральному анализу (разложению) колебательных функций. Иначе говоря, монотонная и инерционная функция представляется в виде суммы полиномов различных степеней от 1 до μ , вклад которых различен и характеризуется зависимостью $A = f(l)$, $l = 1, 2, \dots, \mu$. Адаптационные коэффициенты показывают «полиномиальный спектр» функции ξ^* .

В большинстве случаев величины γ_p и A_l можно находить по априорным данным или получать при решении идентичных задач.

Таким образом, получили одно уравнение с одним неизвестным, решая которое можем найти $T_{жс}$. При линейном прогнозе, когда $\mu = 1$, $A_l = l$ ($\mu_0 = 1$), получим

$$T_{жс} = [(\xi^* - \alpha_0) / (\gamma_1 \alpha_1)]^{1/p}. \quad (10)$$

При большем числе слагаемых в (9), при $p=1$, решаются квадратическое, кубическое и т. д. уравнения. Вычисления в определенной степени усложняются, но, если алгоритм решения получаемых уравнений разрабатывается заранее, прогнозирование облегчается [2, 4].

Оценка точности прогнозирования

Точность прогнозирования — весьма сложный вопрос, поскольку абсолютно точный прогноз невозможно получить, а насколько прогнозируемая величина близка к истинной можно оценить только ориентировочно. Причина этого — множество факторов, которые могут влиять на процесс, в результате чего при изменениях параметров, определяющих техническое состояние радиоэлектронных изделий, случайная составляющая играет более или менее заметную роль. Поэтому для уменьшения погрешности необходимо тщательно подготавливать и осуществлять прогнозирование. В общем случае величина ошибки зависит от трех основных причин [3]:

а) от степени изученности исследуемого процесса;

б) от количества и качества имеющейся информации (априорной и текущей) о контролируемом процессе;

в) от выбранного метода прогнозирования.

Оценку ошибок прогнозирования ε можно произвести как эмпирическими, так и аналитическими способами. Эмпирический путь определения ε можно осуществить двумя методами. Метод определения ошибок по априорной информации связан с набором статистических данных по результатам лабораторных испытаний и эксплуатации. Метод определения ε по текущей информации предусматривает вычисление ошибки предыдущего прогноза на каждом шаге контроля и экстраполяции полученного ряда ошибок на будущее [4].

Ошибки прогнозирования изменения технического состояния радиоэлектронных изделий по априорной информации можно оценить при выполнении трех условий [4]:

а) необходимо иметь информацию об изменении функции работоспособности во времени для большого количества интересующих нас радиоэлектронных изделий;

б) указанные радиоэлектронные изделия должны пройти длительные эксплуатационные или полевые (лабораторные) испытания для определения их фактической долговечности;

в) необходимо произвести прогнозирование хода кривых изменения параметров, полученных в заданной области T_j до выхода параметра за допустимый предел.

Таким образом, при прогнозировании хода известных кривых параметров $\xi(t)$ в заданной области T_j на $j = 1, 2, \dots, m$ шагов вперед и сравнении истинного $\xi_n(t_{n+j})$ и прогнозируемого $\xi_n(t_{n+j})$ получим относительные значения ошибок ε_j :

$$\varepsilon_j = \left| \frac{\xi_n(t_{n+j}) - \xi_n(t_{n+j})}{\xi_n} \right| 100\%, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

где ξ_n — номинальное или начальное значение исследуемого параметра $\xi(t)$.

Исследование множества кривых идентичных параметров позволяет получить наиболее устойчивые (усредненные) значения ошибок на каждый интервал времени прогнозирования, т. е. получить статистические значения ошибок [2].

При отсутствии данных об ошибках на каждом шаге прогнозирования их можно определить по текущей информации следующим образом. Известная область T_1 разбивается на ряд подобластей (больше 3), где в первых трех определяются компоненты прогнозирующего выражения $W(t)$, а в последующих, например в четвертой подобласти, по результатам прогнозирования находят ряд ошибок $\varepsilon(t_n), \varepsilon(t_{n-1}), \dots$, который можно экстраполировать дальше до момента t_m . Это становится возможным благодаря перенесению начала прогнозирования внутрь области T_1 , в частности, в начало четвертой подобласти.

Для определения ошибок аналитическим путем можно дать только общую идею, поскольку для каждого конкретного метода будут свои ошибки. Идея заключается в допущении, что значения параметров $\xi(t_0), \xi(t_1), \dots, \xi(t_n)$, полученных в результате контроля, по тем или иным причинам не равны истинному, и этот ряд представляется как [4]

$$\xi_0 + \Delta\xi_0, \xi_1 + \Delta\xi_1, \dots, \xi_n + \Delta\xi_n, \quad (12)$$

где $\Delta\xi_i$ — погрешность контроля.

В результате коэффициенты прогнозирующего выражения будут вычислены с погрешностями $\alpha_p + \Delta\alpha_p, \gamma_p + \Delta\gamma_p, A_1 + \Delta A_1$, отсюда результат прогнозирования $\xi(t_{t+j})$ также будет получен с ошибкой $\Delta\xi_{n+j}$, которая зависит от качества ряда (12) и выбранного метода прогнозирования. Очевидно, погрешности в (12) будут влиять и на время при обратном прогнозировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, вопросы прогнозирования технического состояния радиоэлектронных изделий привлекают все большее внимание специалистов, что в свою очередь связано с возрастающей быстрыми темпами ролью автоматических и автоматизированных систем и необходимостью предвидения их состояния в будущие моменты времени.

Прогнозирование основывается на изучении объективных закономерностей, которым подчиняется процесс изменения значений параметров

радиоэлектронного изделия, определяющих его техническое состояние. При этом используются две группы закономерностей:

- закономерности случайных событий или вероятностные (стохастические) закономерности;
- закономерности детерминированные.

При обосновании выбора того или другого метода прогнозирования в зависимости от формулировки задачи прогноза и условий ее решения целесообразно использовать следующие показатели количественной оценки:

1. Точность прогнозирования.
2. Достоверность прогнозирования.
3. Быстродействие прогнозирования.
4. Стоимость прогнозирования.
5. Информационный показатель.
6. Полнота прогнозирования.

Из приведенных показателей наиболее важными для нашей исследуемой области применения являются показатели 1 и 2.

При прогнозировании технического состояния радиоэлектронных изделий предпочтительным является метод аналитического или вероятностного прогнозирования, а решение самих задач осуществляется с помощью прямого или обратного прогнозирования.

Такие же методы и способы целесообразно применять и при оценке точности прогнозирования, которая в общем случае зависит от степени изученности исследуемого процесса изменения технического состояния радиоэлектронного изделия, от количества и качества имеющейся информации и от выбранного метода прогнозирования.

Результаты прогноза и оценки их погрешностей рекомендуется применять и при уточнении технологии ремонтов, а также при определении состава запасного имущества и принадлежности образцов радиоэлектронных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глудкин О. П. Управление качеством электронных средств / О. П. Глудкин. — М. : Высшая школа, 1994. — 385 с.
2. Лисичкин В. А. Отраслевое научно-техническое прогнозирование / В. А. Лисичкин. — М. : Экономика, 1971. — 265 с.
3. Тупик В. А. Технология организации производства радиоэлектронной аппаратуры / В. А. Тупик. — СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. — 470 с.
4. Ярлыков Н. Е. Повышение эффективности контроля надежности / Н. Е. Ярлыков. — М. : Радио и связь, 2003. — 192 с.