

УДК 681.3(07)

С.В. Ленков¹, О.В. Банзак², В.А. Цыцарев¹, Л.В. Солодеева¹¹Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев²Одесская государственная академия технического регулирования и качества, Одесса

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ НАДЕЖНОСТНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ РЭТ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ

В статье вводится понятие надежности-стоимостного анализа (НСА) при проектировании сложных объектов радиоэлектронной техники (РЭТ). НСА предназначен для прогнозирования показателей надежности (ПН) и показателей стоимости эксплуатации (СЭ) на всех стадиях разработки объекта. В качестве инструмента прогнозирования предлагается использовать имитационную статистическую модель процесса технического обслуживания и ремонта объекта РЭТ.

Ключевые слова: надежность-стоимостный анализ, показатель надежности, имитационная статистическая модель.

Введение

Введение и постановка проблемы. При создании сложных объектов радиоэлектронной техники (РЭТ) в процессе их проектирования возникает необходимость получения для них оценок ожидаемых в будущем значений показателей надежности (ПН) и стоимости эксплуатации (СЭ). Это необходимо прежде всего для того, чтобы оценить возможность удовлетворения требований технического задания (ТЗ) на разработку объекта при выбранных и утвержденных проектных технических решениях.

По мере уточнения проектных решений производится уточнение оценок ПН и СЭ, сопоставление их с требованиями ТЗ и выработка мер по обеспечению этих требований. На завершающих этапах проектирования, когда уже становятся известны элементный состав и структура объекта, появляется возможность для более точных расчетов прогнозных оценок ПН и СЭ. Такова общая схема процесса обеспечения требуемых ПН и СЭ объекта РЭТ при его разработке.

Под сложным объектом РЭТ понимается техническое устройство, обладающее следующими характеристическими признаками:

– наличие в их составе большого количества разнотипных комплектующих элементов (десятки, сотни тысяч);

– большая часть комплектующих элементов являются изделиями электронной техники (микросхемы, полупроводниковые приборы, печатные платы и т.д.). Но при этом в составе объекта могут быть также и механические, электромеханические, гидравлические и элементы других типов;

– конструктивная структура объекта является иерархической (объект состоит из шкафов (агрегатов), шкафы состоят из блоков (узлов), блоки состоят из субблоков (ячеек) и т.д.).

Объекты РЭТ относятся к классу восстанавливаемых объектов, предназначенных для длительной эксплуатации (десятки лет). В процессе эксплуатации объекта неизбежны отказы в его функционировании, которые устраняются путем замены отказавших элементов в полевых условиях.

Для объектов РЭТ обычно предполагается для обеспечения требуемого уровня безотказности проведение в процессе эксплуатации технического обслуживания и ремонтов (ТОиР). Поэтому, уже при проектировании объекта необходимо определить параметры будущей системы ТОиР, которая должна регламентировать техническую эксплуатацию объектов данного типа.

Под *надежностно-стоимостным анализом (НСА)* будем понимать комплекс мероприятий, которые осуществляются в процессе проектирования объекта РЭТ и включают следующие элементы:

1) расчет (прогнозирование) ПН и СЭ объекта, основанный на достаточно полной для данной стадии разработки математической модели объекта, в которой учитываются все наиболее важные факторы и параметры, влияющие на ПН и СЭ;

2) принятие решения о соответствии (или несоответствии) ПН и СЭ заданным требованиям ТЗ. Если принимается решение о несоответствии, тогда выполняется следующий пункт;

3) разработка мер (проектных решений), направленных на улучшение значений ПН и СЭ, приближение их к требуемым значениям. Такими мерами могут быть, например, внесение изменений в конструкцию, введение резервирования, использование новых комплектующих элементов, введение дополнительных средств диагностирования и т.п.

Очевидно, что НСА должен осуществляться как итерационный процесс, многократно повторяющийся на протяжении всего периода разработки объекта вплоть до момента времени принятия его в

експлуатацію. Цель НСА в конечном счете состоит в обеспечении в процессе разработки объекта требований к ПН и СЭ, указанных в техническом задании на его разработку. НСА следует рассматривать как составную часть мероприятий, предусматриваемых программой обеспечения надежности [1].

В качестве основных ПН и СЭ будем рассматривать такие показатели:

T_0 – средняя наработка на отказ объекта (показатель безотказности);

T_B – среднее время восстановления (показатель ремонтпригодности);

c_3 – средняя удельная стоимость эксплуатации объекта.

Очевидно, что это далеко не полный перечень ПН и СЭ, которые могут интересовать заказчика, но их, на наш взгляд, вполне можно принять в качестве основных показателей, которые необходимо оценивать и контролировать в процессе НСА.

С учетом этого конечную цель, которая должна реализоваться в результате осуществления НСА, формально представляется следующими условиями:

$$\begin{aligned} T_0 &\geq T_0^{\text{тр}}; \quad T_B \leq T_B^{\text{тр}}; \\ c_3 &\leq c_3^{\text{доп}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $T_0^{\text{тр}}$ и $T_B^{\text{тр}}$ – требуемые (заданные в ТЗ) значения соответствующих показателей T_0 и T_B ; $c_3^{\text{доп}}$ – заданное допустимое значение показателя c_3 (величина $c_3^{\text{доп}}$ обычно в ТЗ не задается, однако в том или ином виде всегда учитывается).

Условия (1) обязательно должны дополняться указанием значения срока эксплуатации T_3 (суммарного ресурса R_Σ), в течение которого должны выполняться эти условия.

Имитационная статистическая модель надежности-стоимостного анализа радиоэлектронных объектов

Структуру процесса НСА представим в виде алгоритма, структурная схема которого приведена на рис. 1. Суть процесса, описываемого этим алгоритмом, кратко состоит в следующем.

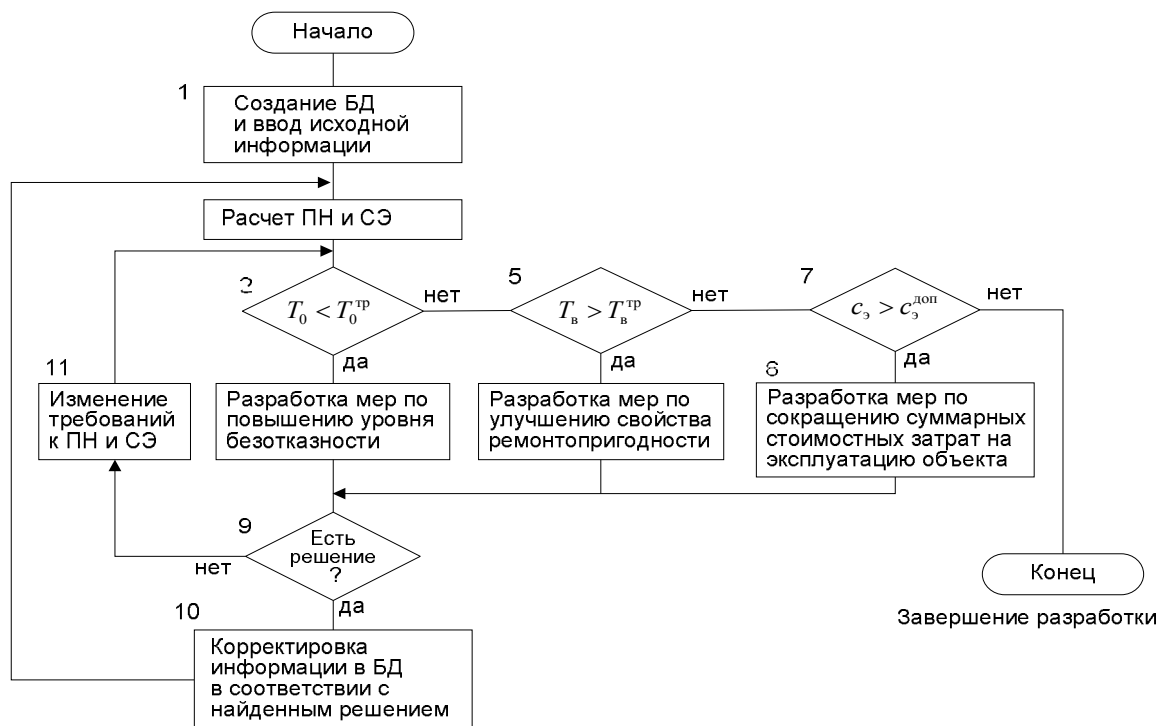


Рис. 1. Алгоритм процесса надежно-стоимостного анализа

Вначале создается база данных (БД), в которую помещается вся информация об объекте радиоэлектронной техники, необходимая для расчетов ПН и СЭ (оператор 1).

По мере разработки эта информация постоянно уточняется и обновляется, актуализируется в соответствии с текущим состоянием разработки. После создания базы данных (или после очередной кор-

ректировки содержащейся в ней информации) производятся расчеты прогнозных оценок ПН и СЭ (оператор 2).

Полученные результаты расчетов сравниваются с требованиями, установленными в ТЗ и по результатам сравнения принимается решение о соответствии или несоответствии полученных оценок ПН и СЭ требованиям ТЗ (операторы 3, 5, 7).

Если не выполняется требование к уровню безотказности объекта ($T_0 < T_0^{TP}$), производится поиск вариантов технических решений, позволяющих увеличить показатели безотказности объекта (операторы 3, 4). Этими мерами, как мы уже отмечали, могут быть использование более надежных комплектующих элементов, введение резервирования, облегчение режимов нагрузки элементов и т.д. К мерам по повышению уровня безотказности относится также техническое обслуживание и плановые ремонты объекта.

Если не удовлетворяется требование к ремонтпригодности ($T_B > T_B^{TP}$), производится поиск мер по улучшению свойства ремонтпригодности (операторы 5, 6). Такими мерами могут быть, например, улучшение характеристик системы контроля и диагностирования, изменения компоновки аппаратуры с целью сокращения времени замены для наименее надежных элементов и др.

Если ожидаемые затраты стоимости на эксплуатацию объекта превышают допустимые ($c_3 > c_3^{доп}$), производится поиск способов сокращения этих затрат (операторы 7, 8). На практике могут не выполняться одновременно два или сразу все эти требования.

На данном этапе процесса НСА осуществляется сложная и трудоемкая инженерная работа конструкторов-разработчиков объекта РЭТ по поиску конкретных конструкторских решений, при которых обеспечивались бы требования ТЗ. Содержание этой работы мы, естественно, не рассматриваем, для нас важно только отметить, что результаты этой сложной поисковой работы должны воплотиться в получение новых (улучшенных) значений тех или иных параметров разрабатываемого объекта. Если предполагаемые улучшенные решения найдены, то соответствующие им новые (изменившиеся) значения параметров объекта нужно ввести в БД (оператор 10) и выполнить заново расчеты ПН и СЭ с целью оценить возможные улучшения показателей в случае реализации найденных решений.

Очевидно, что в процессе НСА может потребоваться несколько итераций таких расчетов и поиска мер по улучшению прогнозных значений ПН и СЭ (может потребоваться несколько циклов выполнения операторов 2 – 10).

Возможна также ситуация, когда после выполнения определенного количества итераций выяснится, что приемлемые технические решения, при которых выполнялись бы требования (1), отсутствуют. Это может быть, например, и в том случае, если заданные значения T_0^{TP} , T_B^{TP} и $c_3^{доп}$ оказались чрезмерно завышенными, что часто бывает вследствие недостаточной проработки их обоснования. Причиной этого может быть также то, что для определения

точных значений ограничений на ПН и СЭ, как правило, требуются достаточно сложные математические модели, описывающие функционирование системы старшего уровня – системы, в которую объект РЭТ входит как составная часть.

На схеме алгоритма случай, когда приемлемое проектное решение найти не удастся, отображается переходом от оператора 9 к оператору 11, которым представляется процедура корректировки требований ТЗ.

Отметим также, что сложность процесса НСА связана с тем, что те или иные возможные меры, направленные на улучшение ПН и СЭ, как правило, тесно взаимосвязаны. Например, меры по улучшению безотказности могут приводить к ухудшению показателей ремонтпригодности и наоборот. Меры по улучшению ПН в большинстве случаев требуют дополнительных стоимостных затрат и, следовательно, приводят к ухудшению показателей СЭ. Все это в совокупности усложняет работу конструктора-разработчика, которая, по сути, является творчеством и даже в определенной мере искусством. Предложенный алгоритм процесса НСА – это попытка формализованного описания этого сложного процесса, попытка максимально его структурировать, выделить в нем конкретные процедуры.

Нетрудно видеть, что в рассмотренной схеме процесса НСА ключевую роль играет расчет ПН и СЭ (оператор 2). Расчет этот должен отличаться от просто расчета надежности [2, 3] тем, что он должен основываться на математической модели процесса технической эксплуатации, в которой в качестве параметров должны присутствовать как параметры самого объекта РЭТ, так и параметры системы ТОиР, предполагаемой для разрабатываемого объекта. Использование такой модели является необходимым условием для того, чтобы иметь возможность в процессе НСА определять элементы и параметры («слабые места»), на которые можно воздействовать путем внесения изменений в конструкцию объекта и нормативные правила его эксплуатации (в систему ТОиР).

В качестве такой математической модели предлагается использовать имитационную статистическую модель (ИСМ), описанную в [4]. Достоинством этой модели (с точки зрения целей НСА) является то, что в ней одновременно представлены как параметры самого объекта РЭТ, так и параметры процесса ТОиР. В качестве модели отказов отдельных элементов (и объекта в целом) в ИСМ используется диффузионное немонокотное (DN) распределение, которое является наиболее адекватной моделью отказов для элементов объектов РЭТ, так как хорошо описывает закономерности возникновения отказов как радиоэлектронных, так и механических элементов [5].

В ИСМ в качестве исходных данных используются следующие параметры:

Б – параметри безотказности (включая параметры состава и структуры);

В – параметры восстанавливаемости (ремонтоспригодности);

С – параметры стоимости;

$P_{то}$ – параметры системы технического обслуживания (ТО);

$P_{пр}$ – параметры системы плановых ремонтов (ПР).

В рамках статьи у нас нет возможности привести детальное описание этих параметров (это делается в [4]). Для нас важно то, что с помощью ИСМ имеется возможность прогнозировать значения ПН и СЭ с учетом влияния указанных параметров. С помощью ИСМ получают следующие зависимости:

$$\begin{aligned} T_0 &= T_0(B, V, P_{то}, P_{пр}); \\ T_b &= T_b(B, V, P_{то}, P_{пр}); \\ c_3 &= c_3(B, V, C, P_{то}, P_{пр}). \end{aligned} \quad (2)$$

Неочевидная зависимость показателей T_0 от В и T_b от Б и $P_{то}$ исследуется и объясняется в [6].

Важно также подчеркнуть, что эти оценки получают для заданного интервала эксплуатации объекта T_3 . То есть в (2) фактически неявно присутствует зависимость ПН и СЭ от предполагаемого срока службы объекта (суммарного ресурса).

С помощью ИСМ [4] имеется возможность получать не только точечные прогнозы ПН и СЭ, но получать также прогнозную оценку функции параметра потока отказов $\tilde{\omega}(t)$ на заданном периоде эксплуатации T_3 . Функция $\omega(t)$ согласно ГОСТ [7] является таким же показателем безотказности восстанавливаемого объекта, как и T_0 . Оценка T_0 связана с функцией $\omega(t)$ зависимостью

$$T_0 = T_3 \int_0^{T_3} \omega(t) dt, \quad (3)$$

то есть, функция $\omega(t)$ является более информативным показателем по сравнению с точечной оценкой T_0 , так как последняя полностью определяется функцией $\omega(t)$. Очевидно, что функция $\omega(t)$ зависит от тех же параметров, что и показатель T_0 : $\omega(t) = \omega(t/B, V, P_{то}, P_{пр})$.

Вместо требования $T_0^{тр}$ с равным успехом можно задавать требуемое значение параметра потока отказов $\bar{\omega}^{тр}$. В этом случае в (1) условие $T_0 \geq T_0^{тр}$ должно быть заменено эквивалентным условием $\bar{\omega} \leq \bar{\omega}^{тр}$, где $\bar{\omega}$ – это среднее значение параметра потока отказов, определяемое следующим образом:

$$\bar{\omega} = \frac{1}{T_3} \int_0^{T_3} \omega(t) dt. \quad (4)$$

Знание функции $\omega(t/B, V, P_{то}, P_{пр})$ является весьма важным для понимания того, какие меры могут быть предприняты для обеспечения требуемого уровня безотказности объекта в течение заданной продолжительности эксплуатации T_3 .

Характер функции в значительной мере определяется распределением отказывающихся элементов объекта по уровню их надежности [8]. Очевидно, что распределение это может быть самым различным и оно никак не «регулируется» при проектировании. Теоретически могут быть два крайних (предельных) случая этого распределения, приводящим к соответствующим крайним случаям вида функции $\omega(t)$ (рис. 2). В первом случае (график 1 на рис. 2) функция параметра потока отказов $\omega(t)$ возрастает относительно быстро (в первые годы эксплуатации) и затем остается примерно постоянной в течение всего оставшегося срока эксплуатации. Во втором случае (график 2) функция $\omega(t)$ возрастает относительно медленно, и это возрастание происходит в течение всего периода эксплуатации.

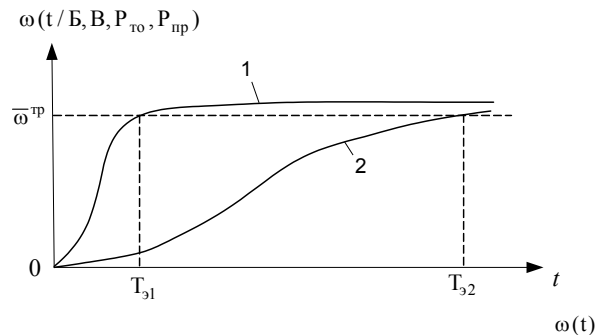


Рис. 2. Возможные предельные варианты вида функции $\omega(t)$

Пусть, например, задано требуемое значение средней наработки на отказ $T_0^{тр} = 1/\bar{\omega}^{тр}$. По графикам на рис. 2 хорошо видно, что в первом случае заданное требование к уровню безотказности объекта $T_0 \geq T_0^{тр}$ будет обеспечиваться только в течение сравнительно небольшого периода эксплуатации $[0, T_{31}]$.

Во втором случае такое же требование будет обеспечиваться в течение значительно более длительного периода $[0, T_{32}]$.

Приведенный пример наглядно демонстрирует полезность анализа вида функции $\omega(t)$ на этапе разработки объекта РЭТ.

Полученная с помощью ИСМ прогнозная оценка функции $\omega(t)$ позволяет разработчику реально оценить потенциальные возможности обеспечения требования $T_0^{тр}$ в течение заданного периода эксплуатации T_3 .

На рис. 3 показан схематически «контур управління», в котором ИСМ используется как измерительное звено.

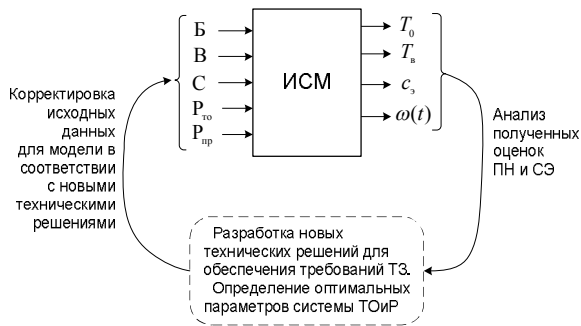


Рис. 3. Схема применения ИСМ в контуре надежность-стоимости анализа

В результате такого «управления» определяются и реализуются конкретные меры по улучшению ПН и СЭ разрабатываемого объекта РЭТ.

Выводы

1. Предлагаемый НСА должен быть неотъемлемой составляющей всего процесса разработки объекта РЭТ (на практике подобный анализ всегда осуществляется разработчиком в том или ином виде). Инструментальной и информационной основой НСА является математическая модель, с помощью которой устанавливается зависимость ПН и СЭ от параметров объекта, которые в наибольшей степени влияют на ПН и СЭ, и от параметров системы ТОиР, которыми будет регламентироваться процесс технической эксплуатации объекта.

2. В качестве математической модели, устанавливающей зависимость ПН и СЭ разрабатываемого объекта РЭТ от его параметров и параметров системы ТОиР, предлагается использовать ИСМ, описание которой приводится в [4]. В ИСМ имеется возможность задавать в качестве исходных данных параметры состава, надежности и конструктивной структуры объекта, которые подвергаются коррек-

тировке и уточнению на протяжении всего времени его разработки. С помощью ИСМ имеется возможность находить оптимальные параметры системы ТОиР, которые так же должны каждый раз «пересчитываться» при изменениях надежностных и структурных параметров разрабатываемого объекта РЭТ.

Список литературы

1. ГОСТ РВ 27.1.02-2005. Надежность военной техники. Программа обеспечения надежности. Общие требования. Введ. 01.01.2006.
2. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Введ. 01.01.1997.
3. Козлов Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Советское радио, 1975. – 472 с.
4. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей: моногр. / С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В. Банзак, В.О. Браун [и др.]: под ред. С.В. Ленкова. – Одесса: Изд-во «ВМВ», 2014. – 256 с.
5. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
6. О влиянии конструктивной структуры восстанавливаемого объекта на его показатели надежности / С.В. Ленков, С.А. Пашиков, В.А. Осыпа, В.Н. Цыцарев // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – X., 2014. – Вип. 2(39). – С. 127-131.
7. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 01.07.1990.
8. О влиянии распределения показателей безотказности элементов на надежность сложного восстанавливаемого объекта радиоэлектронной техники / К.Ф. Боряк, Р.М. Салимов, В.Н. Цыцарев, В.А. Проценко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2009. – № 17. – С. 15-20.

Поступила в редколлегию 8.08.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВЖИВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ НАДЕЖНОСТНО-ВАРТІСНОГО АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ РЕТ ПРИ ЇХ ПРОЕКТУВАННІ

С.В. Ленков, О.В. Банзак, В.А. Цыцарев, Л.В. Солодеева

В статті вводиться поняття надійно-вартісного аналізу (НВА) при проектуванні складних об'єктів радіоелектронної техніки (РЕТ). НСА призначений для прогнозування показників надійності (ПН) і показників вартості експлуатації (ВЕ) на всіх стадіях розробки об'єкту. В якості інструменту прогнозування пропонується використовувати імітаційну статистичну модель процесу технічного обслуговування і ремонту об'єкту РЕТ.

Ключові слова: надійно-вартісний аналіз, показник надійності, імітаційна статистична модель.

APPLICATION OF SIMULATION STATISTICAL MODEL FOR NADEZHNOSTNO-COST ANALYSIS OF DIFFICULT OBJECTS OF RET AT THEIR PLANNING

S.V. Lenkov, O.V. Banzak, V.A. Cysarev, L.V. Solodееva

In the article the concept of reliability-cost analysis (RCA) is entered at planning of complicated objects of radio electronic technique (RET). NSA is intended for prognostication of indexes of reliability (IR) and indexes of running (IR) at all stages of development of object cost. As an instrument of prognostication it is suggested to use the simulation statistical model of process of technical service and repair of object of RET.

Keywords: reliability-cost analysis, reliability index, simulation statistical model.