

УДК 681.586.019.3

А. А. Папко, Е. А. Полякова

**РАЗВИТИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
ДАТЧИКО-ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ
С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

А. А. Papko, E. A. Polyakova

**DEVELOPMENT OF NONLINEAR FORECASTING
METHODS OF RELIABILITY NUMBERS FORECASTING
FOR SENSING AND TRANSDUCING EQUIPMENT
WITH LONG OPERATIONAL LIFE**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В связи с ужесточением требований по надежности, предъявляемых к датчико-преобразующей аппаратуре изделий ракетно-космической техники, значительно повышаются затраты на проведение испытаний по их подтверждению. С целью получения результатов оценки показателей надежности в значительно более сжатые сроки и с минимальными затратами актуально создание методики ускоренных ресурсных испытаний датчико-преобразующей аппаратуры (ДПА). *Материалы и методы.* Приведены способы совершенствования методов ускоренной оценки показателей надежности на стадии разработки ДПА. Дано краткое описание методики ускоренных ресурсных испытаний АО «НИИФИ». Методика основана на методе группового статистического прогнозирования ресурса аппаратуры по изменению во времени ее параметров в больших и малых выборках и распространяется на аппаратуру с заданным ресурсом 5000 часов и более. *Результаты.* Предлагается способ создания методики ускоренных ресурсных испытаний опытных образцов изделий на основе экспоненциального закона распределения наработки до отказа, где скорость износа пропорциональна времени эксплуатации прибора и с ходом времени возрастает. Доказано, что экспоненциальная математическая модель наиболее соответствует процессам старения, протекающим в материалах ДПА. *Выводы.* Создание методики ускоренных ресурсных испытаний поможет существенно сократить временные и материальные затраты на проведение испытаний по подтверждению показателей надежности опытных образцов широкого спектра ДПА, разрабатываемой АО «НИИФИ».

A b s t r a c t. *Background.* Due to the strengthening of reliability requirements for sensing and transducing equipment in space-and-rocket engineering, expenditures for test procedures are uplifting substantially. It's essential to develop an accelerated life tests procedure for sensing and transducing equipment in order to get the results of reliability numbers evaluation on a tight schedule and at minimum expense. *Materials and methods.* Means of developing accelerated methods of reliability numbers evaluation while developing sensing and transducing equipment are described. Brief summary of accelerated life tests procedure in "NIIFI", JSC is given. The procedure is based on the method of group statistical forecasting of equipment lifetime through the variation with time of its characteristics in large and small samples; it applies to the equipment with specified life of 5000 hours and more. *Results.* Method of developing accelerat-

ed life tests procedure for production prototypes based on exponential law of time-to-failure distribution is offered, where wear rate is in proportion to the device operating time and it increases with time. It is proved that the exponential time-to-failure model is best matched to the problem of materials aging process in sensing and transducing equipment. *Conclusions.* Development of the accelerated life tests procedure will help to decrease time and material expenditures for reliability numbers verification testing of pilot run items in the wide array of sensing and transducing equipment developed in "NIIFI", JSC.

К л ю ч е в ы е с л о в а: надежность, ускоренные ресурсные испытания, прогнозирование надежности, экспоненциальная модель отказа.

К e y w o r d s: reliability, accelerated life tests, reliability analysis, exponential time-to-failure model.

В настоящее время характерно ужесточение технических требований, предъявляемых к качеству и надежности датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) для изделий ракетно-космической техники, в том числе по надежности. Так, для изделий с длительным сроком функционирования требования по безотказности, задаваемые в техническом задании (ТЗ), приближаются к единице, значения показателя долговечности достигают 150 000 ч. Испытания по оценке таких показателей традиционными методами оказываются нецелесообразными, так как требуют значительных материальных и человеческих ресурсов и зачастую не могут быть выполнены. Кроме того, в процессе испытаний расходуется значительная часть ресурса изделия. Возможность подтвердить показатели надежности в сжатые сроки, сократив при этом затраты на проведение испытаний, дают ускоренные ресурсные испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации по надежности аппаратуры в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях [1].

Проведенный анализ поведения комплектующих элементов и приборов в различных эксплуатационных режимах выявил два основных направления для совершенствования методов ускоренных ресурсных испытаний [2]:

- применение форсированных режимов;
- использование методов теории прогнозирования.

При форсированных испытаниях на надежность ускорение достигается за счет ужесточения режимов работы аппаратуры или внешних воздействующих факторов. Сложностью применения форсированных испытаний является выбор ускоряющего фактора (часто невозможно форсировать условия эксплуатации – структурные элементы оказываются на пределе возможного по диапазону допустимых на них внешних воздействий) и возможность установления вида наработки на отказ, для определения которых зачастую необходимо проведение длительных исследований. Для оценки показателей надежности требуется проведение испытаний в форсированных и в нормальных условиях для определения коэффициента ускорения испытаний.

Недостатками подобного направления создания методов ускоренной оценки являются практическая невозможность числовой оценки корреляции между значениями параметров испытаний в нормальных и ужесточенных режимах и количественных оценок показателей надежности испытываемых изделий, а также возможность непредвиденного изменения физико-химических процессов старения и износа.

Оценку показателей надежности ДПА с длительным сроком функционирования целесообразно проводить на основе использования теории прогнозирования – распространения результатов кратковременных испытаний в номинальных условиях на более длительный интервал, заданный в ТЗ. По виду прогнозирования разделяют на эвристическое (интуитивное) и математическое [3]. При эвристическом прогнозировании прогноз получается на основе субъективного взвешивания совокупности факторов, большая часть из которых носит качественный характер. Результаты прогнозирования в данном случае неэффективны на практике. При математическом прогнозировании результат формируется на основе получения информации об объекте или процессе с последующей обработкой ее формализованными (математическими) методами. Здесь результат во многом зависит от тех параметров, которые контролируются или измеряются у объекта или процесса, а также от математических моделей прогнозирования

информации. Важными деталями является выбор вида параметров критериев годности (ПКГ) и модели их поведения. При этом используются либо субъективные подходы к выбору моделей прогнозирования физических процессов на основании статистических испытаний, либо предлагаются аналогичные подходы к трактовке возможных траекторий случайных процессов деградации приборов и соответствующего выбора моделей.

Существует множество методик ускоренных ресурсных испытаний, используемых для оценки ресурса аппаратуры на стадии разработки. В АО «НИИФИ» создана методика ускоренных ресурсных испытаний, в течение ряда лет успешно применяемая на практике для оценки показателей надежности опытных образцов ДПА.

Методика основана на методе группового статистического прогнозирования ресурса аппаратуры по изменению во времени ее параметров в больших ($n \geq 15$) и малых ($3 \leq n < 15$) выборках и распространяется на аппаратуру с заданным ресурсом 5000 ч и более. При оценке ресурса за критерий предельного состояния аппаратуры принимается параметрический отказ: выход ПКГ за пределы, т.е. границы допусков, устанавливаемых в технических условиях или программе испытаний, при заданной вероятности, которая одновременно является доверительной вероятностью оценки результата. ПКГ – выходной параметр, нахождение которого в пределах установленных норм характеризует работоспособное состояние аппаратуры.

Если у аппаратуры работоспособное состояние характеризуется несколькими ПКГ, обработку результатов проводят по каждому параметру с помощью персонального компьютера. Оценку результатов обработки проводят по минимальному значению средней наработки аппаратуры до отказа. Наработка каждого образца должна составить не менее 10 % от значения назначенного ресурса, заданного в ТЗ. Образцов должно быть не менее трех и их количество не должно возрастать в процессе испытаний. Контролируемый ПКГ определяется разработчиком аппаратуры. Измерение значений выбранных ПКГ осуществляется через равные промежутки времени в процессе испытаний.

По результатам десятипроцентной наработки проводят обработку результатов испытаний с целью прогнозирования средней наработки до отказа. Испытания прекращают, когда оцениваемый показатель безотказности не соответствует заданным в ТЗ требованиям.

В качестве модели функции средней наработки до отказа и ее доверительных границ принимают линейную зависимость

$$Y(t) = at + b, \quad (1)$$

где $Y(t)$ – ПКГ; t – время; a – скорость деградации ПКГ; b – начальное значение ПКГ [4].

Методика позволяет получить результаты оценки ресурса аппаратуры, сократив время на проведение испытаний в 10 раз, однако имеет ряд недостатков:

- сложность и трудоемкость вычислений, число которых возрастает с увеличением контролируемых параметров;
- длительность наработки для получения прогноза, так как при современных требованиях к ресурсу 10 % – довольно значимая цифра, что делает использование методики экономически невыгодным;
- линейная модель, положенная в основу методики, противоречит математическим моделям естественного процесса старения [5];
- в основу ПКГ положена гипотеза их неизменности в процессе эксплуатации, что также является недостатком.

Положенная в основу методики математическая модель (ММ) является простейшей моделью изменения погрешности в процессе эксплуатации. Как показали ранее проведенные исследования [6], данная модель удовлетворительно описывает старение изделий в возрасте от одного до пяти лет. С течением времени модель приводит к получению недостоверного результата, завышая значения показателей надежности.

В современной экономической ситуации для предприятия актуален вопрос создания методики ускоренных ресурсных испытаний опытных образцов аппаратуры, исключающей вышеперечисленные недостатки. Основная задача, решаемая при создании методики, – получение достоверного прогноза средней наработки до отказа изделий в более короткие сроки, чем в уже существующей методике. Для этого необходимо определить ММ функции средней наработки до отказа, которая будет положена в основу будущей методики.

Основными видами распределения наработок изделий до отказа являются экспоненциальное, Вейбулла, гамма, логарифмически-нормальное, нормальное распределения. В соответствии с [7] функцию распределения наработок до отказа изделий на неограниченном интервале $(0; \infty)$ определяют по формуле, называемой основным законом надежности

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}, \quad (2)$$

где λ – интенсивность отказов,

$$\lambda(x) = \frac{F'(x)}{1 - F(x)}. \quad (3)$$

В известных публикациях на кривой интенсивности отказов (рис. 1, а) выделяют три участка [8]:

I – приработочных отказов, где интенсивность их быстро уменьшается до определенного уровня;

II – внезапных отказов, где интенсивность считается постоянный;

III – износных отказов, где интенсивность их быстро возрастает: здесь все изделия выходят из строя.

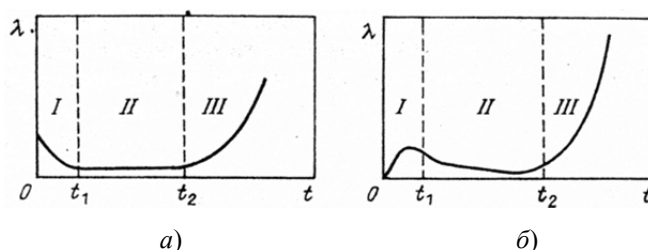


Рис. 1. Идеализированная (а) и реальная (б) кривые интенсивности отказов

В общем случае представление интенсивности отказов на участке II в виде прямой (постоянной величины) – удобная идеализация для описания наиболее характерных оценок надежности. Фактически [9], на участке II интенсивность вначале уменьшается, а затем вновь возрастает (рис. 1, б), т.е. ее можно представить на этом участке нелинейной математической моделью.

По нашему мнению, в качестве модели функции средней наработки до отказа и ее доверительных границ целесообразнее применять показательную (экспоненциальную) модель как наиболее соответствующую процессу старения:

$$Y(t) = e^{at+b}, \quad (4)$$

где $Y(t)$ – ПКГ; t – время; a – скорость деградации ПКГ; b – начальное значение ПКГ.

Экспоненциальная модель распределения наработки до отказа наиболее соответствует физике расходования ресурсов изделий (процессу старения), где скорость износа пропорциональна времени эксплуатации прибора и с ходом времени возрастает [4], адекватна, универсальна и удобна. Модель учитывает значимые факторы, обоснованно пренебрегая второстепенными, охватывает как можно большее число частных случаев, применима в различных ситуациях и приемлема для практического применения.

Особенности применения данной ММ – отсутствие больших вычислительных процедур при выполнении прогноза ПКГ и получение прогноза в более короткие сроки, что значительно сократит время и материальные затраты на проведение испытаний и уменьшит сроки изготовления ДПА с длительным сроком функционирования.

Исходя из изложенного, в ближайшее время необходимо решить актуальную проблему – создание методики ускоренных ресурсных испытаний опытных образцов с использованием экспоненциальной модели прогнозирования средней наработки до отказа. Решение данной задачи включает выполнение исследований по ряду важнейших ее составляющих. Во-первых, необходимо провести математический расчет времени, необходимого для проведения испыта-

ний, заменив в методике обработки результатов измерений линейную экстраполяцию на экспоненциальную как наиболее соответствующую процессам старения. Во-вторых, необходимо экспериментально подтвердить полученные выводы и скорректировать методику при положительном результате. Данные исследования помогут существенно сократить временные и материальные затраты на проведение испытаний по подтверждению показателей надежности опытных образцов широкого спектра ДПА, разрабатываемой АО «НИИФИ»

Список литературы

1. Гишваров, А. С. Теоретические основы ускоренной оценки и прогнозирования надежности технических систем / А. С. Гишваров, С. А. Тимашев. – Екатеринбург : УрО РАН, 2012. – 184 с.
2. Кострикина, И. А. Применение методов форсированных испытаний для расчета интервала между поверками новых средств измерений / И. А. Кострикина, Е. Н. Галкина // Студенческий научный форум : VI Междунар. студенческая электрон. научн. конф. (15 февраля – 31 марта 2014 г.). – URL: scienceforum.ru>2014/704/7004
3. Хмыль, А. А. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: учебная программа для высших учебных заведений по специальности / А. А. Хмыль, В. Л. Ланин // Проектирование и производство радиоэлектронных средств. – Минск, Р. Беларусь, 2003.
4. Методика ускоренных ресурсных испытаний преобразователей измерительных и первичных / АО «НИИФИ». – Пенза, 1987. – 77 с.
5. Герцбах, И. Б. Модели отказов / И. Б. Герцбах, Х. Б. Кордонский. – М. : Советское радио, 1966. – 166 с.
6. Новицкий, П. В. Динамика погрешностей средств измерений / П. В. Новицкий, И. Л. Зограф, В. С. Лабунец. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
7. ГОСТ Р 27.004–2009 Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Модели отказов. – М. : Изд-во стандартов, 2009.
8. Горлов, М. И. Геронтология кремниевых интегральных схем / М. И. Горлов, В. А. Емельянов, А. В. Строганов. – М. : Наука, 2004. – 239 с.
9. Глудкин, О. П. Технология испытаний микроэлементов радиоэлектронной аппаратуры и интегральных микросхем / О. П. Глудкин, В. Н. Черняев. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.

Папко Антонина Алексеевна

доктор технических наук,
заместитель начальника центра 5,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Papko Antonina Alekseevna

doctor of technical sciences,
Deputy Head of Centre 5,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Полякова Екатерина Алексеевна

главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Polyakova Ekaterina Alekseevna

chief specialist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.586.019.3

Папко, А. А.

Развитие нелинейных методов прогнозирования показателей надежности датчиков преобразующей аппаратуры с длительным сроком функционирования / А. А. Папко, Е. А. Полякова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 43–47.