

И. А. БУГРИМЕНКО, магистр, ООО «Стела Системз», Харьков;

С. Е. ГАРДЕР, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;

Т. Л. КОРНИЛЬ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КАБЕЛЯ ПО ДАННЫМ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

У статті розглядається метод, що заснований на спостереганні прямих та непрямих прогнозуючих параметрів технічної системи у ході прискорених випробувань. Він дозволяє зробити прогноз про стан виробів при роботі у нормальних умовах. Розглянута технічна система – електрокабель марки АВВГ 4х10. Знайдено залишковий ресурс та ймовірність безвідмовної роботи кабелю у конкретний момент експлуатаційного часу.

В статье рассмотрен метод, основанный на наблюдении прямых и косвенных прогнозных параметров технической системы в ходе ускоренных испытаний. Рассмотрена техническая система – электрокабель марки АВВГ 4х10. Определен остаточный ресурс и вероятность безотказной работы в конкретный момент времени эксплуатации.

The method of life remaining and unfailing work probability forecasting is considered in this article. It is based on observation of direct and indirect parameters of technical system during accelerated testing. It makes prediction about system state during the work in the normal conditions possible. As the example such technical system as power cable is taken. As the result, life remaining and unfailing work probability of taken system in some work time moment is presented.

Введение. В работе рассматривается методика прогнозирования остаточного ресурса работы кабеля марки АВВГ 4х10 по данным измерения диагностических параметров и предварительных ускоренных испытаний. *Ресурсным* параметром кабеля, определяющим срок его эксплуатации, является сопротивление изоляции каждой из жил. При проведении ускоренных испытаний проведены ее измерения в моменты времени $t = 0,2,4,6,8$ часов. В качестве *диагностических* параметров приняты: диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и электрическая емкость. Так как все жилы в кабеле этой марки равноправные, то брались усредненные по жилам значения всех параметров. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Усредненные данные

Время t , ч	$t = 0$	$t = 2$	$t = 4$	$t = 6$	$t = 8$
Сопротивление изоляции, R МОм·км через время t , ч	272,8	159,6	116,1	98,90	79,07
Диэлектрическая проницаемость, W	2,24	4,10	4,83	5,315	5,93
Тангенс угла диэлектрических потерь, T	0,01	0,01	0,005	0,006	0,01
Электрическая емкость C , нФ/км	5,98	8,51	9,18	10,02	12,72

Постановка задачи. Так как непосредственная диагностика по значению ресурсного параметра затруднительна, то необходима косвенная диагностика. В этом случае решение задачи прогнозирования остаточного ресурса сводится к следующему.

Устанавливается связь между предельными значениями ресурсного и диагностических параметров.

Вычисляются коэффициенты вариации ресурсного параметра и диагностических параметров.

Вычисляется прогнозируемый остаточный ресурс, определяемый наработкой, за которую хотя бы один из диагностических параметров достигает своего предельного значения [4].

Определяется закон распределения остаточного ресурса и вероятность безотказной работы за время эксплуатации [2].

Предполагается, что предельное состояние при *ускоренных испытаниях* соответствует предельному состоянию изделия *в условиях эксплуатации*.

Результаты исследований. Построение математической модели изменения ресурсного и диагностических параметров от времени проведено методом наименьших квадратов. Сравнение возможных линейной, квадратичной и экспоненциальной зависимостей показало, что адекватной является экспоненциальная зависимость $f(t) = \theta_0 e^{\theta_1 t}$ (результаты расчетов см. в табл. 2).

Таблица 2 – Экспоненциальная аппроксимация

Параметры	Модель	Сумма квадратов отклонений
Сопrotивление изоляции, R	$237,73 \cdot e^{-0,148t}$	527,531
Диэлектрическая проницаемость, W	$2,736 e^{0,11t}$	0,166
Тангенс угла диэлектрических потерь, T	$0,0032 \cdot e^{0,127t}$	0,00001
Электрическая емкость, C	$6,455 e^{0,084t}$	1,395

Модель каждой переменной используется при построении СЛАУ для вычисления коэффициентов a_{ij} системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{X} = AX, \quad (1)$$

где $X = (RWT C)^T$ – матрица ресурсного и диагностического параметров; $A = (a_{ij})$, $i = \overline{1,4}$; $j = \overline{1,4}$ – матрица коэффициентов, подлежащих определению.

Для определения коэффициентов системы уравнений (1) строятся четыре системы уравнений, с использованием моделей таблицы 2:

$$\dot{R}(t_i) = a_{11} \cdot R(t_i) + a_{12} \cdot W(t_i) + a_{13} \cdot T(t_i) + a_{14} \cdot C(t_i), \quad (2.1)$$

$$\dot{W}(t_i) = a_{21} \cdot R(t_i) + a_{22} \cdot W(t_i) + a_{23} \cdot T(t_i) + a_{24} \cdot C(t_i), \quad (2.2)$$

$$\dot{T}(t_i) = a_{31} \cdot R(t_i) + a_{32} \cdot W(t_i) + a_{33} \cdot T(t_i) + a_{34} \cdot C(t_i), \quad (2.3)$$

$$\dot{C}(t_i) = a_{41} \cdot R(t_i) + a_{42} \cdot W(t_i) + a_{43} \cdot T(t_i) + a_{44} \cdot C(t_i), \quad (2.4)$$

где $t_i = \{0, 2, 4, 6, 8\}$ – моменты снятия экспериментальной информации (см. табл. 1).

Коэффициенты a_{ij} в системах (2.1) – (2.4) определены методом наименьших квадратов. После их нахождения матрица A системы (1) имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} -0,148 & -1,009 \times 10^{-11} & -1,508 \times 10^{-14} & -1,55 \times 10^{-11} \\ -1,55 \times 10^{-8} & 0,11 & 5,176 \times 10^{-13} & 6,93 \times 10^{-10} \\ 3,593 \times 10^{-6} & -7,23 \times 10^{-8} & 0,127 & -1,637 \times 10^{-7} \\ 6,323 \times 10^{-10} & -3,565 \times 10^{-12} & 3,53 \times 10^{-15} & 0,084 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

На рисунке 1 изменены масштабы: значения R уменьшены в 40 раз, T увеличены в 100 раз.

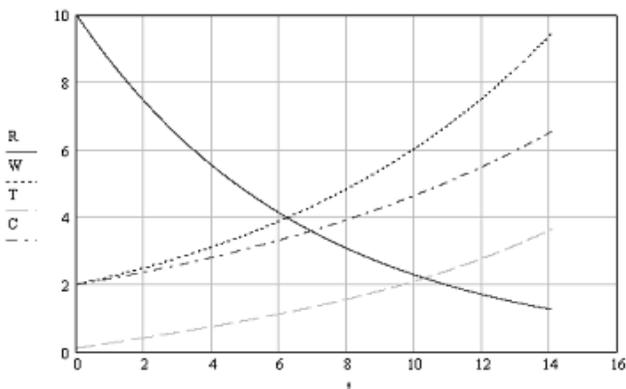


Рис. 1 – График поведения основного и косвенных параметров

С найденными коэффициентами a_{ij} строится система уравнений вида (2), которая интегрируется численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка до тех пор, пока ресурсный параметр не достигнет заданного предельного значения $R_{lim} = 50$. Таким образом, определены предельные значения диагностических параметров: $W_{lim} = 9,453$, $T_{lim} = 0,036$, $C_{lim} = 6,538$. В дальнейшем эти значения используются для нахождения остаточного ресурса кабеля.

После того, как установлены предельные значения $(W_{lim}, T_{lim}, C_{lim})$, представляется возможным по измерению только диагностических параметров (W, T, C) определить остаточный ресурс.

Таблица 3 – Рассчитанные значения параметров

Наработка t , час	$t_1 = 1$	$t_2 = 2$	$t_3 = 3$	$t_4 = 4$	$t_5 = 5$
Диэлектрическая проницаемость, W	3,5000	4,7000	5,0200	6,0000	6,5900
Тангенс угла диэлектрических потерь, T	0,0045	0,0050	0,0061	0,0075	0,0174
Электрическая емкость, C	8,5100	11,0100	12,1000	14,3500	15,8500

С использованием данных таблицы 3 и аппроксимаций таблицы 2, найдены предельные значения наработок $t_{Wlim} = 21,574$, $t_{Tlim} = 26,839$, $t_{Clim} = 16,696$. Вычисляется значение, принимаемое в качестве оценки среднего значения остаточного ресурса:

$$T_{ocp} = \min \{(t_{Wlim} - t_{uzm}), (t_{Tlim} - t_{uzm}), (t_{Clim} - t_{uzm})\} = 6,669, \quad (4)$$

где t_{uzm} – наработка, соответствующая последнему измерению диагностических параметров.

Так как R в процессе эксплуатации монотонно убывает, то для модели теоретического закона распределения ресурса кабеля принимается закон диффузионно-монотонного (DM) распределения [3]:

$$F(\tau) = DM(\tau; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{\tau - \mu}{\nu\sqrt{\mu \cdot \tau}}\right), \quad (5)$$

где $\Phi(0,1)$ – кумулятивная функция стандартизованного нормального распределения, $\mu = T_{ocp} / (1 + 0,5 \cdot \nu^2)$ – параметр масштаба, ν – коэффициент вариации.

С использованием данных таблицы 1 вычисляются коэффициенты вариации ресурсного и диагностических параметров по формуле:

$$\nu_{ij} = \frac{\sqrt{n}}{\sum_{i=1}^n \Delta x_{ij}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\Delta x_{ji} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_{ji} \right)^2}, \quad (6)$$

где $\Delta x_{ij} = x_{j+1} - x_{ji}$, $j = 1, 2, 3, 4$ – номер контролируемого параметра (R_i, W_i, T_i, C_i), а индекс i соответствует моменту времени $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$.

Оценка коэффициента вариации определяющего параметра в дальнейшем принимается в качестве оценки коэффициента вариации прогнозируемого остаточного ресурса.

Для определения вероятности безотказной работы вычисляются параметры DM-распределения, затем показатели остаточного ресурса. В частности, гамма-процентный остаточный ресурс (для $\gamma = 0,9$):

$$T_{0\gamma} = \left\{ \mu \left(1 + \frac{\nu^2 \cdot U_\gamma^2}{2} - \nu \cdot U_\gamma \sqrt{1 + \frac{\nu^2 \cdot U_\gamma^2}{4}} \right) \right\} = 18,725. \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы, например, за $\tau_{зад} = 1,032$:

$$R(\tau_{зад}) = \left\{ \Phi \left(\frac{\mu - \tau_{зад}}{\nu\sqrt{\mu \cdot \tau_{зад}}} \right) \right\} = 0,671. \quad (8)$$

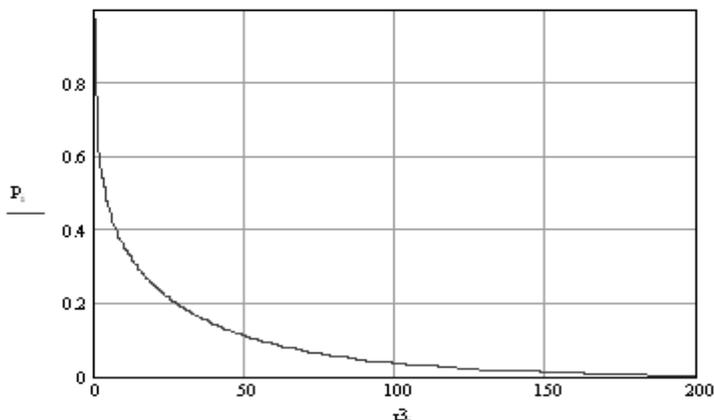


Рис. 2 – График зависимости вероятности P безотказной работы от времени $\tau_{зад}$

Выводы. При контроле в процессе эксплуатации предельных значений диагностических параметров, соответствующих предельному значению ресурсного параметра, можно прогнозировать остаточный ресурс работы изделия.

Список литературы: **1.** Гаскаров Д. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Д. В. Гаскаров, Т. А. Голинкевич, А. В. Мозкалевский – М. : Сов. радио, 1974. – 224с. **2.** Стрельников В. П. Оценка остаточного ресурса на основе измерения диагностических параметров / В. П. Стрельников // Сетевой электронный научный журнал «СИСТЕМОТЕХНИКА». – 2003. – № 1. **3.** ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – 45 с. **4.** ДСТУ 2862-94. Надежность техники. Методы расчета надежности. Общие требования. – Введ. 01.01.96. – 40 с.

Надійшла до редколегії 23.04.2012