УДК 621.3.088, 51-74

ПОИСК ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ МЕТОДОМ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ

А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько, В. В. Жаднов

Введение

Разработка и эксплуатация сложных электронных изделий требует определения влияния значений параметров, характеризующих особенности их конструктивно-технологического исполнения и условий функционирования, на изменение показателей надежности [1].

На ранних этапах проектирования для изучения функциональных зависимостей показателей надежности от этих параметров для ответственных электронных изделий проводятся исследования, основанные на прогнозировании надежности расчетными методами по справочным данным. Полученные данные собираются в таблицы и стандарты.

В конце двадцатого века появились методы символьной регрессии [2, 3], которые позволяют с помощью вычислительного алгоритма находить структуру и параметры математических выражений. Методы символьной регрессии используют эволюционный алгоритм [4–6] для поиска кода математического выражения, записываемого в виде композиции функций, выбираемых из множества элементарных функций.

В настоящей работе мы применили один из методов символьной регрессии, метод сетевого оператора [7, 8], для построения функции, описывающей зависимость показателя надежности от значений параметров электронных изделий и условий их функционирования. В работе по результатам вычислительных экспериментов получено с помощью сетевого оператора математическое выражение для функции, описывающей зависимость интенсивности отказов электронного модуля от трех параметров. Выбранные параметры характеризуют как конструктивно-технологическое исполнение электронного модуля, так и условия его эксплуатации. Полученная функция обеспечивает среднюю относительную погрешность вычисления не более 7,5 % при максимальной погрешности не более 26,4 %.

Постановка задачи

В работе рассматривается следующая математическая задача. Заданы данные в виде упорядоченных множеств m параметров, характеризующих электронный модуль и условия его эксплуатации:

$$X_1 = (x_{1,1},\ldots,x_{1,n_1}),\ \ldots,\ X_m = (x_{m,1},\ldots,x_{m,n_m}) \tag{1}$$

и показатель надежности (интенсивность отказов):

$$Y = (y_1,\ldots,y_K), \tag{2}$$

где

$$K = \prod_{i=1}^{m} n_i . \tag{3}$$

Определенные параметры электронного модуля и условий его эксплуатации соответствуют определенному значению интенсивности отказов

$$[x_{1,i_1} \quad \ldots \quad x_{m,i_m}]^T \to y_j , \tag{4}$$

где $x_{k,i_k} \in \mathrm{X}_k$, $k = 1,\ldots,m$,

$$j = i_1 + \sum_{p=2}^{m-1} \left(i_p - 1\right) \prod_{q=1}^{p-1} n_q \,. \tag{5}$$

Необходимо найти математическое выражение для функции

$$\tilde{y} = f(x_1, \ldots, x_m), \tag{6}$$

которая обеспечивает минимумы критериев:

$$J_1 = \max_j \left\{ \frac{|\, y_j - f(x_{1,i_1} \quad \ldots \quad x_{m,i_m})\,|}{y_j} : j = 1, \ldots, K \right\} \to \min, \tag{7}$$

$$J_2 = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{j=1}^{K} (y_j - f(x_{1,i_1} \quad \ldots \quad x_{m,i_m}))^2} \to \min, \tag{8}$$

где значение j определяется из соотношения (5) по значениям $i_1, \ldots, i_m$, $i_1 = 1, \ldots, n_1$, …, $i_m = 1, \ldots, n_m$.

Для решения задачи используем один из методов символьной регрессии, метод сетевого оператора. Метод сетевого оператора использует кодирование математических выражений в форме ориентированного вычислительного графа и подробно представлен в публикациях [7, 8].

Для поиска математического выражения в форме матрицы сетевого оператора используем вариационный генетический алгоритм многокритериальной оптимизации, использующий принцип малых вариаций базисного решения. Суть принципа малых вариаций базисного решения состоит в том, что исследователь задает базисное решение в форме кода, в данном случае в форме матрицы сетевого оператора, определяет возможные малые вариации кода и количество этих вариаций. Генетический алгоритм ищет оптимальное решение на множестве малых вариаций базисного решения. В процессе поиска базисное решение заменяем на наилучшее найденное к этому моменту решение. Данный подход позволяет сократить область поиска и для сложных задач использовать опыт и интуицию исследователя для определения направления поиска при выборе базисного решения.

Нахождение математической модели интенсивности отказов

Рассмотрим задачу поиска вида математической модели интенсивности отказов (функции, зависящей от параметров электронного модуля и условий его эксплуатации). В качестве параметров примем уровень качества (приемку), характеризующий степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки, температуру окружающей среды и группу аппаратуры, характеризующую степень жесткости условий эксплуатации.

В табл. 1 приведены значения температуры окружающей среды. В табл. 2 приведены группы аппаратуры по классификации [9]. В табл. 3 представлены типы приемки по классификации [9].

Таблица 1

Температура окружающей среды

Номер варианта	t, гр. C°, x_1
1	25
2	30
3	35
4	40
5	45
6	50
7	55
8	60
9	65
10	70
11	75
12	80
13	85

Таблица 2

Стандарт группы аппаратуры

Номер варианта	Группа аппаратуры по [5]	$\lambda \cdot 10^5 (t^\circ = 25)$	x_2
1	1.1	1,61989628395531	1
2	1.2	2,04902698897058	1,2649
3	1.3	3,05144640151411	1,8837
4	1.4	3,07796981360298	1,9001
5	1.5	3,16757686960045	1,9554
6	1.6	3,13467935484368	1,9351
7	1.7	3,05144640151411	1,8837
8	1.8	3,07796981360298	1,9001
9	1.9	3,07796981360298	1,9001
10	1.10	3,05144640151411	1,8837
11	2.1.1	2,68488493020413	1,6574
12	2.1.2	2,66720289801015	1,6465
13	2.1.3	3,83804435841739	2,3693
14	2.1.4	3,98150295950472	2,4579
15	2.1.5	4,02338773710653	2,4837
16	2.2	3,77266696887091	2,3290
17	2.3.1	2,711408342293	1,6738
18	2.3.2	2,66720289801015	1,6465
19	2.3.3	4,22083321609534	2,6056
20	2.3.4	3,78700387955178	2,3378
21	2.3.5	4,02338773710653	2,4837
22	2.4	3,85773128073197	2,3815
23	3.1	5,7761040807236	3,5657
24	3.2	3,32010349666234	2,0496
25	3.3	6,41355800325982	3,9592
26	3.4	6,24342501396313	3,8542
27	4.1 в условиях запуска	9,28530935198069	5,7320
28	4.1 в условиях свободного полета	4,42087730334606	2,7291
29	4.3 в условиях запуска	8,8520951976534	5,4646
30	4.3 в условиях свободного полета	4,33581262768712	2,6766
31	4.4 в условиях запуска	8,80789011716843	5,4373
32	4.4 в условиях свободного полета	4,29160754720215	2,6493
33	4.5 в условиях запуска	8,80789011716843	5,4373
34	4.5 в условиях свободного полета	4,3943538912572	2,7127
35	4.6 в условиях бреющего полета	5,5767763115	3,4427
36	4.7 в условиях запуска	8,8520951976534	5,4646
37	4.7 в условиях свободного полета	4,3943538912572	2,7127
38	4.8 в условиях свободного полета	4,30928921559826	2,6602
39	4.9 в условиях запуска	8,80789011716843	5,4373
40	4.9 в условиях свободного полета	5,78191866225097	3,5693
41	5.1	1,61989628395531	1
42	5.2	1,61547577590682	0,9973

Таблица 3

Условия приемки

Номер варианта	Тип приемки, по [5], x_3
1	«5»
2	«9»

Задача заключается в нахождении функции

$$\tilde{y} = f(x_1, x_2, x_3), \quad (9)$$

где x_1 – величина температуры окружающей среды; x_2 – номер группы аппаратуры; x_3 – номер типа приемки.

Для преобразования нечислового обозначения групп аппаратуры (см. табл. 2) в числовую величину мы заменили обозначение, принятое в [9], значением интенсивности отказов группы аппаратуры для температуры $25\,°\mathrm{C}$ и поделили все эти значения на значение для первой строки таблицы (или группы 1.1). В результате получили значение второго аргумента искомой функции

$$x_2 = \frac{\lambda(t = 25\,°\mathrm{C}) \cdot 10^5}{1{,}61989628395531}. \tag{10}$$

Для построения функции мы располагали значениями интенсивностей отказов для каждого значения аргумента. Всего значений функции было

$$K = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 = 13 \times 42 \times 2 = 1092, \tag{11}$$

где n_1 – число значений температуры, $n_1 = 13$, n_2 – число групп аппаратуры, $n_2 = 42$, n_3 – число типов приемки, $n_3 = 2$.

Искомая функция должна определять значение интенсивностей отказов в зависимости от температуры, группы аппаратуры и типа приемки. При поиске числовые значения интенсивностей умножили на 10^5, поэтому величину интенсивности отказов определяем из формулы

$$\tilde{\lambda} = f(x_1, x_2, x_3) \cdot 10^{-5}. \tag{12}$$

Для решения задачи использовали метод сетевого оператора со следующими конструктивными множествами:

– множество переменных:

$$V = (x_1, x_2, x_3),$$

– множество параметров:

$$Q = (q_1, q_2, q_3),$$

– множество функций с одним аргументом, которые в терминологии сетевого оператора называются унарными операциями:

$$F_1 = (f_{1,1}(z) = z, f_{1,2}(z) = z^2, f_{1,3}(z) = -z, f_{1,4}(z) = \mathrm{sgn}(z)\sqrt{|z|}, f_{1,5}(z) = z^{-1},$$
$$f_{1,6}(z) = e^z, f_{1,7}(z) = z^3, f_{1,8}(z) = \sqrt[3]{z}, f_{1,9}(z) = 2z, f_{1,10}(z) = z/2,$$
$$f_{1,11}(z) = e^{|z|}, f_{1,12}(z) = z - z^3),$$

– множество функций с двумя аргументами или бинарных операций:

$$F_2 = (f_{2,1}(z_1, z_2) = z_1 + z_2, f_{2,2}(z_1, z_2) = z_1 z_2).$$

В ориентированном графе сетевого оператора элементы множеств переменных и параметров связаны с узлами-источниками графа, бинарные операции связаны с остальными узлами графа, унарные операции связаны с дугами графа. Поиск решения математического выражения в форме сетевого оператора осуществляется на пространстве матриц сетевого оператора.

Для поиска математического выражения в форме матрицы сетевого оператора используем вариационный генетический алгоритм. Генетический алгоритм поиска оптимального решения включает следующие этапы:

1) генерация кодов возможных решений, упорядоченных множеств векторов вариаций и бинарных кодов векторов параметров;

2) вычисление значений функционалов для всех элементов множества возможных решений;

3) вычисление рангов Парето для всех элементов множества возможных решений;

4) отбор пар возможных решений для скрещивания и определение вероятности их скрещивания;

5) выполнение операции скрещивания, получение четырех новых возможных решений и вычисление их рангов Парето;

6) выполнение операции мутации для новых возможных решений, если она предусмотрена алгоритмом;

7) исключение четырех наихудших возможных решений по наибольшим значениям ранга Парето;

8) отбор возможных решений для множества Парето по нулевым значениям рангов.

Метод реализован в виде программного комплекса в программной среде Delphi. При поиске решения было сделано семь запусков. Каждый запуск использовал новое базисное решение, которое было отобрано как наилучшее на предыдущем запуске. Время вычисления, затраченное на один запуск, составляло около 25 мин. Вычисления выполнялись на компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i7-2640M CPU @ 2.80GHz 2.80 GHz.

В результате вычислений была получена следующая матрица сетевого оператора

$$\Psi = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 7 & 10 & 2 & 0 & 0 & 3 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 3 & 8 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 4 & 12 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 8\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2
\end{bmatrix},$$

которая соответствует математическому выражению

$$y = B\sqrt[3]{A}\ ,$$

где

$$B = Aq_2q_3x_2\sqrt[3]{\frac{(-x_3+q_1x_1+q_3^2)q_3^2}{2x_3}}\sqrt{\frac{|-x_3+q_1x_1+q_3^2+2x_3\,|}{2x_3}}+$$

$$+\frac{(-x_3+q_1x_1+q_3^2+2x_3)q_3^2}{2x_3}-\left(\frac{(-x_3+q_1x_1+q_3^2+2x_3)q_3^2}{2x_3}\right)^3-q_3\,,$$

$$A = q_3^2+\frac{x_3}{-q_3x_3+q_1q_3x_1+q_3^3}+\frac{1}{q_3x_3}+\frac{1}{q_1q_3x_1}\,,$$

$$q_1 = 0{,}65234\,,\ q_2 = 2{,}71875\,,\ q_2 = 0{,}22266\,.$$

Полученное математическое выражение дает максимальное значение относительной погрешности $J_1 = 0{,}2673$ и среднюю относительную погрешность $\overline{\delta} = 0{,}0734$ для всех 1092 заданных значений интенсивностей отказов электронного модуля [10].

Заключение

Рассмотренный выше пример позволяет сделать вывод о том, что метод сетевого оператора является эффективным методом для построения функции, описывающей зависимость интенсивности отказов электронных модулей от значений их параметров и условий функционирования. По сути, этот метод позволяет синтезировать макромодель интенсивности отказов электронного модуля, что особенно важно для унифицированных и стандартизованных составных частей, которые могут применяться в сложных электронных изделиях различных классов. Если полученные математические выражения будут приводиться в нормативно-технической документации на такие модули, то это даст возможность разработчикам сложных электронных изделий оперативно оценить уровень надежности покупных электронных модулей в требуемых режимах и условиях применения и тем самым обосновать возможность их применения и обеспечить требуемый уровень надежности разрабатываемых изделий.

Список литературы

1. Băjenescu, Titu. Component Reliability for Electronic Systems / Titu Băjenescu and Marius Bâzu. – London : Artech House, 2010. – 354 p.
2. Genetic Programming IV: Routine Human-Competitive Machine Intelligence, MA / J. R. Koza, M. A. Keane, M. J. Streeter, W. Mydlowec, J. Yu, and G. Lanza. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2003. – 262 p.
3. Diveev, A. I. The Network Operator Method for Search of the Most Suitable Mathematical Equation / A. I. Diveev, E. A. Sofronova // Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications / ed. by Shangce Gao. – Croatia : Intech, 2012. – P. 19–42.
4. Ashlock, D. Evolutionary Computation for Modeling and Optimization / D. Ashlock. – New York : Springer, 2006. – 248 p.
5. Lebedev, B. K. Synthesis of Mathematical Expressions by Methods of Genetic Search / B. K. Lebedev, V. B. Lebedev // Proceedings of the International Scientific Conferences "Intelligent Systems (IEEE AIS'06)" and "Intelligent CAD's (CAD – 2006)". Scientific publication in 3 vol. Vol. 3. – M. : Physmathlit, 2006. – P. 29–34.
6. Intellectual Evolution Method for Synthesis of Mobile Robot Control System / A. I. Diveev, D. B. Khamadiyarov, E. Yu. Shmalko and E.A. Sofronova // Proc. of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2013). – Cancún, México, 2013, 20–23 June. – P. 24–31.
7. Дивеев, А. И. Метод сетевого оператора / А. И. Дивеев. – М. : ВЦ РАН, 2010. – 178 с.
8. Дивеев, А. И. Синтез системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий методом сетевого оператора / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 3–10.
9. Надежность ЭРИ : справочник. – М. : МО РФ, 2006. – 641 с.
10. Жаднов, В. В. Модели характеристик надежности составных частей РЭА / В. В. Жаднов, Д. В. Лазарев // Надежность. – 2004. – № 4. – С. 15–23.

Дивеев Асхат Ибрагимович
доктор технических наук,
начальник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Учреждение Российской академии наук,
Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: aidiveev@mail.ru

Diveev Askhat Ibragimovich
doctor of technical sciences, head of department
of safety and nonlinear analysis,
Dorodnicyn Computer Center
of the Russian Academy of Sciences
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia)

Шмалько Елизавета Юрьевна
кандидат технических наук,
научный сотрудник,
отдел безопасности и нелинейного анализа,
Учреждение Российской академии наук,
Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: asiedora@mail.ru

Shmal'ko Elizaveta Yur'evna
candidate of technical sciences,
scientific worker,
department of safety and nonlinear analysis,
Dorodnicyn Computer Center
of the Russian Academy of Sciences
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia)

Жаднов Валерий Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций,
Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики»
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)
E-mail: vzhadnov@hse.ru

Zhadnov Valeriy Vladimirovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronic
and telecommunications,
Moscow Institute of Electronic and Mathematic
of National Research University
«High School of Economics»
(101000, 20 Myasnitskaya street, Moscow, Russia)

Аннотация. Показатель надежности различных электронных изделий определяется по экспериментальным данным тестов при различных значениях параметров изделий. Эти данные собраны в громоздких таблицах и справочниках. В настоящей работе представлен современный численный подход, позволяющий обобщать экспериментальные данные об изменении показателя надежности не в виде таблиц, а в виде функциональных зависимостей от исследуемых параметров изделий. Методология основана на применении метода сетевого оператора для описания оптимальной структуры функции и подбора ее параметров. Метод сетевого оператора относится к классу методов символьной регрессии и осуществляет эволюционный поиск оптимальных композиций математических выражений на пространстве структур. Метод позволяет в автоматическом режиме получать описания искомых функциональных зависимостей. Эффективность метода продемонстрирована на примере поиска функции, описывающей зависимость изменения показателя интенсивности отказов от трех параметров, характеризующих его конструктивно-технологическое исполнение и условия эксплуатации.

Abstract. A reliability index of various electronics is determined by the experimental data of tests for different values of parameters of the equipment. The received data are collected in bulky tables and references. This paper presents modern numerical approach, allowing to compile the experimental data on changes of reliability index not in the form of tables but as a function of the operating parameters of the devices. The methodology is based on the method of network operator for the design of the optimal structure of function and selection of its parameters. The network operator method belongs to a class of methods of symbolic regression and provides an evolutionary search for the best compositions of mathematical expressions on the space of elementary structures. The method allows you to automatically receive the required description of the functional dependencies. The effectiveness of the method is demonstrated by the example of searching the law, which describes the change in the failure rate depending on three parameters that characterize its constructive and technological performance and operating conditions.

Ключевые слова: интенсивность отказов, показатель надежности, электронное оборудование, символьная регрессия, эволюционный поиск.

Key words: failure rate, reliability index, electronics, symbolic regression, evolutionary search.

УДК 621.3.088, 51-74

Дивеев, А. И.

Поиск закона изменения надежности электронных модулей методом символьной регрессии / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько, В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 32–38.