УДК 621.382.019.3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ МЕТОДОМ ПОРОГОВОЙ ЛОГИКИ

С.М. БОРОВИКОВ, А.И. БЕРЕСНЕВИЧ, А.А. ХМЫЛЬ,
А.В. ЕМЕЛЬЯНОВ, И.Н. ЦЫРЕЛЬЧУК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь,

Поступила в редакцию 20 марта 2006

Предлагается метод прогнозирования надежности изделий электронной техники по информативным параметрам. Отличительной особенностью метода является то, что значения информативных параметров, полученные при измерении в начальный момент времени, преобразуются в двоичные сигналы (в нуль или единицу) и решение о классе изделия с точки зрения его надежности на заданный интересующий момент времени принимается по набору двоичных сигналов. Обсуждаются некоторые подходы к определению порогов, необходимых для преобразования информативных параметров в двоичные сигналы.

Ключевые слова: изделия электронной техники, информативные параметры, прогнозирование надежности с разделением на классы, прогнозирующее правило, пороговая логика.

Введение

Использование высоконадежных изделий электронной техники (ИЭТ) для сборки радиоэлектронных устройств является одним из основных условий обеспечения безотказности аппаратуры. Требуемый уровень надежности ИЭТ можно достичь путем отбора, применяя методы индивидуального прогнозирования. Большой интерес в отечественной и зарубежной практике представляют методы прогнозирования по информативным параметрам, позволяющие определить принадлежность каждого экземпляра (ИЭТ) к определенному классу с точки зрения надежности на заданный будущий момент времени $t_{пр}$ [1–3]. Основой такого прогнозирования является наличие вероятностной связи между значениями информативных параметров (кратко – признаков), полученными для ИЭТ в начальный момент времени (t=0), и надежностью изделий на момент времени $t_{пр}$. В качестве математического аппарата методов используется распознавание образов [2–4]. По совокупности признаков (образу) каждого экземпляра в отдельности обычно принимают решение о его принадлежности на момент времени $t = t_{пр}$ к одному из двух классов: K_1 — классу надежных экземпляров, K_2 — классу потенциально ненадежных экземпляров.

Актуальность разработки

Для принятия решения о классе экземпляра при известных признаках используют прогнозирующее правило. Его получают один раз с помощью предварительных экспериментальных исследований выборки интересующего типа ИЭТ. Эти исследования называют обучающим экспериментом, а используемую выборку – обучающей. Для изделий обучающей выборки находят взаимосвязь между признаками в момент времени t = 0 и принадлежностью к классу K_1 или к классу K_2 на момент времени $t_{пр}$. Если признаки априорно не известны, то их поиск совмещают с получением прогнозирующего правила.

Прогнозирующее правило при использовании k признаков ищут в виде [4]

$$\left.\begin{array}{ll} j \in K_1\text{, если} & F\left(x_1^{(j)},\ldots,\, x_k^{(j)}\right) \geq P_0; \\ j \in K_2\text{, если} & F\left(x_1^{(j)},\ldots,\, x_k^{(j)}\right) < P_0, \end{array}\right\} \qquad (1)$$

где j означает конкретный экземпляр ИЭТ рассматриваемого типа; $\in$ — знак принадлежности к классу K_1 или K_2; $x_1^{(j)}$, …, $x_k^{(j)}$ — признаки, полученные для j-го экземпляра в момент времени t=0; $F(x_1^{(j)}, \ldots, x_k^{(j)})$ — решающая функция, подсчитанная для j-го экземпляра; P_0 — порог разделения классов, определяемый экспериментально из условия лучшего разделения экземпляров обучающей выборки.

Применяя построенное правило вида (1) для других экземпляров того же типа ИЭТ, что и изделия обучающей выборки, можно выполнять прогнозирование их класса на момент времени t=$t_{пр}$ и, следовательно, осуществлять отбор экземпляров повышенного уровня надежности (класс K_1) или отбраковать потенциально надежные экземпляры (класс K_2).

При решении практических задач возникает ряд вопросов, связанных с возможностью и простотой автоматизации процедуры индивидуального прогнозирования, оперативностью принятия решений с использованием правила (1). Известные методы прогнозирования [3], такие как метод статистических решений, метод потенциальных функций и ряд других, являются сложными как для понимания, так и для автоматизации прогнозирования. Для этих методов производительность процедуры принятия решения о классе экземпляра без использования ЭВМ крайне мала, поэтому методы находят ограниченное применение на практике. Актуальным является разработка таких методов, которые позволяли бы легко автоматизировать прогнозирование и в то же время оперативно принимать решение о классе каждого экземпляра ИЭТ в отдельности в случаях, когда процедура прогнозирования не автоматизирована. Во многом этому отвечает предложенный метод, основанный на принципах пороговой логики.

Теоретический анализ

Поясним предпосылки применения принципов пороговой логики применительно к индивидуальному прогнозированию надежности ИЭТ.

С одной стороны, решение о классе экземпляра (ИЭТ) в случае разделения на два класса может быть представлено в двоичной форме: R=1, если экземпляр принадлежит классу K_1; R=0, если экземпляр принадлежит классу K_2, где R — параметр (двоичная функция), характеризующий принадлежность экземпляра к классу K_S (S=1, 2) на момент времени $t_{пр}$ — заданное время прогнозирования.

С другой стороны, значения признаков x_1, …, x_k, полученные в момент t=0, несут избыточное количество информации о классе экземпляра, что дает возможность перейти к дискретному описанию признаков путем преобразования их в двоичный код (например, в нуль или единицу), используя определенные правила. Тогда ИЭТ можно представить моделью устройства с k двоичными сигналами z_1, …, z_k на входе в соответствии с числом признаков, используемых для прогнозирования, и одним двоичным параметром R на выходе, соответствующим решению о классе надежных (K_1) или ненадежных (K_2) экземпляров.

После преобразования признаков в двоичный код (сигналы z_1, …, z_k) параметр R можно рассматривать как двоичную функцию от двоичных аргументов z_1, …, z_k. Другими словами, функция R есть пороговая (в частном случае — мажоритарная) функция от двоичных аргументов z_1, …, z_k. Это позволяет к функции R и ее аргументам z_1, …, z_k применить принципы пороговой логики. Согласно [5], пороговая логика — раздел математической логики, исследующий закономерности функционирования устройств с несколькими двоичными входами и одним двоичным выходом. Эти закономерности характеризуются тем, что происходит скачкообразное изменение выходного состояния устройства. Параметр R на выходе устройства равен константе, обозначаемой логическим значением нуль, до тех пор, пока взвешенная сумма входных двоичных сигналов z_1, …, z_k не станет равной или не превысит вещественное число T, называемое порогом. В этом случае выходной сигнал R станет равным другой константе, обозначаемой логическим значением единица.

Разработка метода прогнозирования

В основу предложенного метода прогнозирования положен принцип функционирования пороговых устройств, поэтому он назван методом пороговой логики, а одна из его разновидностей — методом мажоритарной логики. Впервые метод упоминается в работе [6], а свое дальнейшее развитие получил в работе [7].

Условимся признаки $x_1, \ldots, x_k$ преобразовывать в двоичные сигналы $z_1, \ldots, z_k$ так, чтобы значения z_i=1 в основном соответствовали экземплярам класса K_1. Для обеспечения этого могут использоваться выражения

$$\left.\begin{aligned} z_i &= 1, \text{ если } \quad x_i \geq x_{i0}; \\ z_i &= 0, \text{ если } \quad x_i < x_{i0}; \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned} z_i &= 1, \text{ если } \quad x_i \leq x_{i0}; \\ z_i &= 0, \text{ если } \quad x_i > x_{i0}, \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

где x_{i0} — пороговый уровень (кратко — порог) i-го признака, определяемый экспериментально с использованием результатов обучающего эксперимента.

Причем система соотношений (2) используется, когда классу K_1 в среднем соответствуют большие значения признака x_i, система (3) — в противоположных случаях.

Обычно признаки $x_1, \ldots, x_k$ имеют разную ценность для процедуры прогнозирования, поэтому логично каждому двоичному сигналу $z_1, \ldots, z_k$ поставить в соответствие вещественное число α_i, называемое весом двоичного сигнала. Тогда, согласно принципам пороговой логики [5], прогнозирующее правило вида (1) может быть представлено выражениями

$$\left.\begin{aligned} R^{(j)} &\equiv 1, \text{ если } \quad \sum_{i=1}^{k} \alpha_i z_i^{(j)} \geq T; \\ R^{(j)} &\equiv 0, \text{ если } \quad \sum_{i=1}^{k} \alpha_i z_i^{(j)} < T, \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

где $R^{(j)}$ — двоичная функция на выходе, соответствующая j-му экземпляру, равная единице для класса надежных (K_1) и нулю для класса ненадежных экземпляров (K_2); $z_i^{(j)}$ — i-й входной двоичный сигнал, полученный для j-го экземпляра с учетом преобразования i-го признака (i=1, ..., k); α_i — вес двоичного сигнала z_i, представляет вещественное число (i=1, …, k); k — общее число входных двоичных сигналов, равное количеству признаков, используемому для прогнозирования; T — порог разделения классов, конечное вещественное число.

Заметим, что сумма в выражениях (4), сравниваемая с порогом разделения T, представляет собой решающую функцию F прогнозирующего правила (1).

На рис. 1 показана структурная схема, поясняющая алгоритм прогнозирования методом пороговой логики в случае, когда прогнозирующее правило (4) получено.

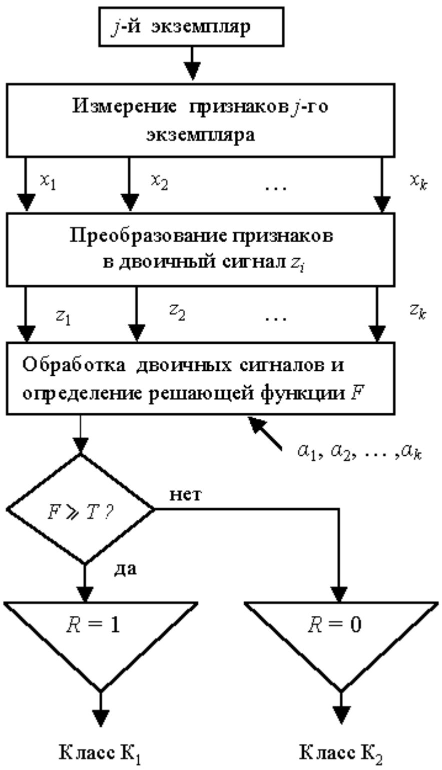

Рис. 1. Структурная схема алгоритма прогнозирования

Модификации метода пороговой логики

Прогнозирующее правило (4) принимает во внимание только двоичные сигналы z_i=1. Однако двоичные сигналы z_i=0 также могут вносить некоторый вклад в формирование решающей функции — суммы выражений (4). Для учета этого пригоден алгоритм прогнозирования вида

$$\left.\begin{aligned} R^{(j)} &\equiv 1, \text{если } \sum_{i=1}^{k} \alpha(z_i^{(j)} = \xi) \geq T; \\ R^{(j)} &\equiv 0, \text{если } \sum_{i=1}^{k} \alpha(z_i^{(j)} = \xi) < T, \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

где $\alpha(z_i^{(j)}=\xi)$ — вес i-го двоичного сигнала z_i, выбираемый в зависимости от значения ξ (нуль или единица), соответствующего j-му экземпляру.

Веса $\alpha(z_i=\xi)$ двоичных сигналов z_i предлагается оценивать как

$$\alpha(z_i) = \begin{cases} P(K_1 / z_i = 1), \text{ если } z_i = 1; \\ P(K_1 / z_i = 0), \text{ если } z_i = 0, \end{cases} \tag{6}$$

где $P(K_1/z_i=\xi)$ — оценка вероятности принадлежности экземпляра к классу K_1 при условии, что с использованием выражений (2) или (3) двоичный сигнал z_i принял значение, равное ξ (ξ=1, 0).

Оценки вероятностей $P(K_1/z_i=1)$ и $P(K_1/z_i=0)$ могут быть получены по данным обучающего эксперимента, используя формулы

$$P(K_1 / z_i = \xi) = \frac{n(K_1 / \text{реш } \; z_i = \xi)}{n(\text{реш } \; z_i = \xi)}; \; \xi = 1, 0; \; i = 1, 2, ..., k\,, \tag{7}$$

где $n(K_1/\text{реш } z_i=\xi)$ — количество в обучающей выборке экземпляров класса K_1, для которых с использованием соотношений вида (2) или (3) принято решение $z_i=\xi$(ξ=1, 0); $n(\text{реш } z_i=\xi)$ — общее количество в обучающей выборке экземпляров, для которых принято решение $z_i=\xi$(ξ=1, 0).

Для предлагаемого метода прогнозирования могут быть получены и другие способы обработки двоичных сигналов z_i и их весов α_i , поэтому в общем виде прогнозирующее правило (алгоритм прогнозирования) метода пороговой логики можно записать как

$$\left.\begin{aligned} R^{(j)} &\equiv 1, \text{если } \underset{i=1}{\overset{k}{L}}[z_i^{(j)}, \alpha_i] \geq T; \\ R^{(j)} &\equiv 0, \text{если } \underset{i=1}{\overset{k}{L}}[z_i^{(j)}, \alpha_i] < T, \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

где L — оператор, определяющий способ обработки двоичных сигналов $z_i^{(j)}$ и их весов α_i.

Можно убедиться, что в методе пороговой логики при использовании для индивидуального прогнозирования k признаков количество сочетаний (комбинаций) N двоичных сигналов z_i равно: $N=2^k$. Поэтому прогнозирующее правило в конечном виде может быть представлено простой логической таблицей, показывающий, какой комбинации двоичных сигналов z_i соответствует тот или иной класс экземпляра (таблица).

Прогнозирующее правило в виде логической таблицы

Номер комбинации двоичных сигналов	Значение двоичного сигнала для признака x_i				Прогнозируемый класс экземпляра на момент времени $t=t_{пр}$
	x_1	x_2	…	x_k	
1	1	1	…	1	K_1
2	1	1	….	0	K_1
...	...	...	...	...	. . .

2^k	0	0		0	K_2

Если признаки, используемые для индивидуального прогнозирования, имеют одинаковую информативность (ценность), то веса $\alpha(z_1=1)$, ..., $\alpha(z_k=1)$ будут равны между собой. Будут также равны между собой и веса $\alpha(z_1=0)$, ..., $\alpha(z_k=0)$. В таких случаях индивидуальное прогнозирование с использованием правила (4) или (5) может выполняться по количеству единиц, которые примут двоичные сигналы $z_i^{(j)}$ для j-го экземпляра (i=1, ..., k). Согласно [5], этот частный случай метода пороговой логики нами назван методом мажоритарной логики.

Выбор порогов признаков

В предложенном методе прогнозирования значительное влияние на ошибки прогнозирования оказывает удачность определения порогов признаков, т.е. величин x_{i0} . Их выбор должен быть сделан при использовании результатов обучающего эксперимента.

В инженерных приложениях представляет интерес определение значений x_{i0} по величине среднего риска (средних потерь) в предложении использования для прогнозирования одного признака x_i . Ошибочные решения, которые могут иметь место при прогнозировании, всегда приводят к некоторым потерям. Обозначим потери, связанные с переименованием класса экземпляра из K_1 в K_2, т.е. цену такого переименования, как $C_{1\to2}$, а цену переименования класса экземпляра из K_2 в K_1 – как $C_{2\to1}$. Тогда величина среднего риска ρ при многократном распознавании класса ИЭТ будет равна:

$$\rho = P\,(\text{реш } K_2 / K_1)\, P\,(K_1)\, C_{1\to2} + P\,(\text{реш } K_1 / K_2)\, P\,(K_2)\, C_{2\to1}, \quad (9)$$

где P (реш K_V / K_U) — вероятность принятия решения об отнесении экземпляра к классу K_V при условии, что он фактически принадлежит к классу K_U (V, U=1, 2; $V \neq U$); P (K_S) — априорная вероятность принадлежности экземпляра к классу K_S (S=1, 2).

В качестве критерия выбора величины x_{i0} следует взять минимум среднего риска ρ:

$$\rho = \min. \quad (10)$$

Можно показать, что определение порога x_{i0} в соответствии с критерием (10) сводится к решению уравнения

$$\lambda(x_{i0}) = \frac{P(K_2)C_{2\to1}}{P(K_1)C_{1\to2}}, \quad (11)$$

где $\lambda(x_{i0})$ — отношение правдоподобия, соответствующее точке $x_i=x_{i0}$. $\lambda(x_i)$, находят как

$$\lambda(x_i) = \frac{w(x_i / K_1)}{w(x_i / K_2)}, \quad (12)$$

где $w(x_i / K_S)$ — плотность распределения признака x_i при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_S (S=1, 2).

Для частного случая, когда $P(K_2)$ $C_{2\to1}$=P (K_1) $C_{1\to2}$, значение x_{i0} есть точка, для которой выполняется равенство (рис. 2) $w(x_{i0}/K_1)=w(x_{i0}/K_2)$.

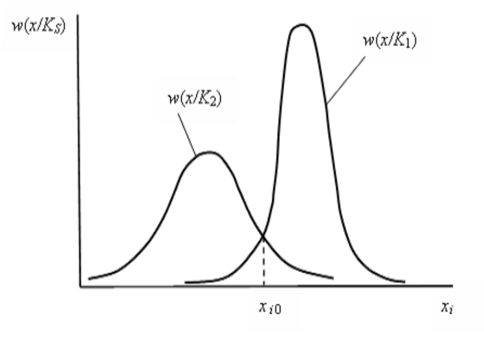

Рис. 2. Определение оптимального значения порога x_{i0}

Особый интерес представляет определение величины x_{i0} с использованием информационного подхода. Идея этого подхода состоит в следующем [8]. Контроль (измерение) признака $x_i^{(j)}$ j-го экземпляра и его преобразование по выражениям вида (2) или (3) в двоичный сигнал $z_i^{(j)}$ с учетом выбранного порога x_{i0} позволяет в определенной степени снять неопределенность класса j-го экземпляра. Например, если по результатам преобразования окажется, что $z_i^{(j)} = 1$, то исследователи склонны думать, что j-й экземпляр скорее всего окажется представителем класса K_1, и наоборот, при $z_i^{(j)} = 0$ – представителем класса K_2. Другими словами, порог x_{i0} дает определенное количество информации $I(x_{i0})$ о классе экземпляра. В качестве критерия выбора x_{i0} следует взять максимум этой информации:

$$I(x_{i0})=\max. \tag{13}$$

Для информации $I(x_{i0})$ справедливо выражение [9]

$$I(x_{i0})=H(K_S) - H(K_S/x_{i0}), \tag{14}$$

где $H(K_S)$ — энтропия (степень неопределенности) класса экземпляра до контроля признака x_i и его преобразования в двоичный сигнал z_i; $H(K_S / x_{i0})$ — условная энтропия класса экземпляра после контроля признака x_i и преобразования его в двоичный сигнал z_i с учетом значения x_{i0}.

Применяя положения теории информации, получим следующие формулы для подсчета величин $H(K_S)$ и $H(K_S / x_{i0})$:

$$H(K_S) = -\sum_{S=1}^{2} P(K_S)\log P(K_S), \tag{15}$$

$$H(K_S / x_{i0}) = -\sum_{l=1}^{2} p(z_i = \xi_l) \sum_{S=1}^{2} P(K_S / z_i = \xi_l)\log P(K_S / z_i = \xi_l), \tag{16}$$

где $P(K_S)$ — априорная (начальная) вероятность класса K_S (S=1, 2); $p(z_i = \xi_l)$ — априорная вероятность того, что с учетом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i примет значение, равное ξ_l ($\xi_1 = 1$; $\xi_2 = 0$); $P(K_S / z_i = \xi_l)$ — вероятность того, что экземпляр принадлежит к классу K_S при условии, что с учетом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i примет значение, равное ξ_l (S=1, 2; $\xi_1 = 1$; $\xi_2 = 0$).

Оценка вероятностей, используемых в формулах (15), (16), может быть сделана по данным обучающего эксперимента и результатам преобразования признака x_i в двоичный сигнал z_i с учетом выбираемого значения x_{i0}:

$$P(K_S) = \frac{n(K_S)}{n}, \tag{17}$$

$$p(z_i = \xi_l) = \frac{n(z_i = \xi_l)}{n}, \tag{18}$$

$$P(K_S / z_i = \xi_l) = \frac{n(K_S / z_i = \xi_l)}{n(z_i = \xi_l)}, \tag{19}$$

где $n(K_S)$ — количество в обучающей выборке экземпляров класса K_S; n — объем обучающей выборки; $n(z_i = \xi_l)$ — количество в обучающей выборке экземпляров, для которых с учетом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i принял значение, равное ξ_l ($\xi_1 = 1$; $\xi_2 = 0$); $n(K_S / z_i = \xi_l)$ — количество в обучающей выборке экземпляров класса K_S, для которых с учетом выбранного значения x_{i0} двоичный сигнал z_i принял значение, равное ξ_l (S=1, 2; $\xi_1 = 1$; $\xi_2 = 0$).

Изменяя значения x_{i0}, с использованием формул (14)–(16) можно построить график зависимости информации $I(x_{i0})$ от величины x_{i0} и с учетом критерия (13) выбрать оптимальный порог x_{i0} (рис. 3,*а*).

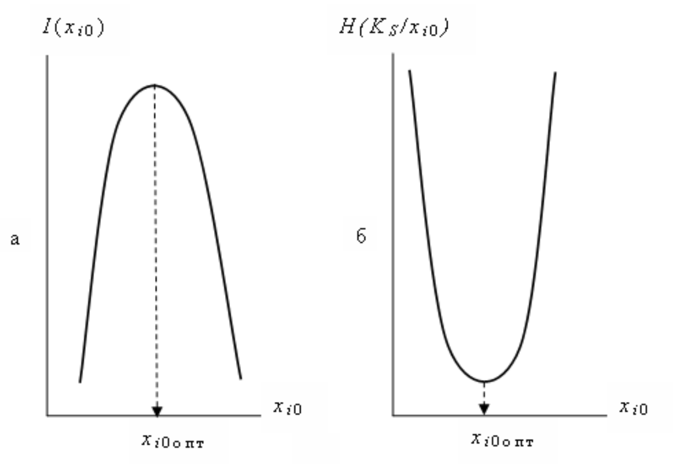

Рис. 3. Выбор оптимального значения порога ($x_{i0\ опт}$) при информационном подходе: *а* — по значению количества информации $I(x_{i0})$; *б* — по условной энтропии $H(K_S/x_{i0})$

Энтропия $H(K_S)$, используемая в выражении (14), в каждом конкретном случае является величиной постоянной. Поэтому при практическом определении оптимального порога x_{i0} можно пользоваться критерием

$$H(K_S/x_{i0})=\min, \tag{20}$$

согласно которому лучшим считается такое значение x_{i0}, при котором условная энтропия класса экземпляра минимальна. В этом случае выбор оптимального значения x_{i0} может выполняться по графику зависимости условной энтропии $H(K_S/x_{i0})$ от величины x_{i0} (рис. 3,*б*).

Предложенные способы предполагает последовательное независимое определение величин x_{i0} (i=1, ..., k). Полученный при этом набор порогов $x_{10\ опт}$, …, $x_{k\,0\ опт}$ является строго оптимальным лишь в случае независимости признаков x_1, …, x_k. Как показывают исследования [3], параметры, используемые для ИЭТ в качестве признаков, коррелированны, следовательно, в определенной степени зависимы. Поэтому набор значений $x_{10\ опт}$, …, $x_{k\,0\ опт}$ близок к оптимальному, а способы определения порогов признаков могут рассматриваться как квазиоптимальные.

Выводы

Двоичное представление признаков существенно упрощает прогнозирование надежности ИЭТ, позволяет использовать в роли признаков также качественные факторы. На этапе индивидуального прогнозирования новых экземпляров (экземпляров, не принимавших участие в обучающем эксперименте) процедура предложенного метода не требует математических вычислений, предполагает лишь измерение признаков и их сравнение с заранее найденными порогами. Решение о классе экземпляра принимается по набору двоичных чисел и может выполняться с использованием прогнозирующего правила табличного вида (см. таблицу). Для рассматриваемого типа ИЭТ логическую таблицу получают один раз на этапе предварительных исследований, используя результаты обучающего эксперимента.

Метод легко поддается автоматизации и в то же время позволяет быстро принимать решение о классе экземпляра в случаях, когда процедура прогнозирования не автоматизирована.

RELIABILITY PREDICTION OF PRODUCTS OF ELECTRONICS BY A METHOD OF THE THRESHOLD LOGIC

S.M. BARAVIKOU, A.I. BERASNEVICH, A.A. KHMYL,
A.V. EMELYANOV, I.N. TSYRELCHYK

Abstract

The method of forecasting reliability of electronic devices by informative parameters is suggested. A specific feature of the method lies in the fact that informative parameters' values obtained in measuring at the initial moment of time are transformed into binary signals (0 or 1) and the decision on the device's class — from the point of view of its reliability for given moment of interest — is taken on the basis of binary signals' set. Some approaches to the definition of thresholds necessary for transformation of informative parameters into binary signals are discussed.

Литература

1. *Hughes R., Campbell D., Chew K.* // AIAAPap. 1975. Vol 8., No. 88.
2. *Пестряков В.Б., Андреева В.В.* Индивидуальное прогнозирование состояния РЭА с использованием теории распознавания образов. Куйбышев, 1980. 88 с.
3. *Никифоренко Л.Г., Боровиков С.М.* // Изв. Белорус. инж. акад. 2004. № 2 (18)/2. С. 117–119.
4. *Боровиков С.М.* Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Мн., 1998. 336 с.
5. *Дертоузос М.* Пороговая логика: Пер. с англ. М., 1967. 322 с.
6. *Боровиков С.М.* Проблема повышения качества и эффективности производства радиоаппаратуры: Сб. науч. трудов / Под ред. Б.В. Васильева. М., 1980. Вып. 2. С. 157–161.
7. *Боровиков С.М.* // Изв. Белорус. инж. акад. 1999. № 1 (7)/2. С. 130–132.
8. *Боровиков С.М., Зорин Д.В., Стасюк Д.М.* // Информатика-Машиностроение. 1998. № 2(20). С. 56–57.
9. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М., 1969. 596 с.