

УДК 004.94:62-9-027.45

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ПО ИНФОРМАТИВНЫМ ПАРАМЕТРАМ



С.М. Боровиков

*Доцент кафедры проектирования
информационно-компьютерных
систем БГУИР, кандидат
технических наук, доцент
bsm@bsuir.by*

С.М. Боровиков

Окончил Минский радиотехнический институт. Основная область научных интересов – прикладные математические методы в проектировании изделий радиоэлектроники, включая алгоритмы статистического прогнозирования надёжности изделий электронной техники и оценку надёжности прикладного программного обеспечения на ранних этапах его разработки.

Аннотация. Рассматривается применение статистического имитационного моделирования для исследования эффективности моделей прогнозирования класса работоспособности изделий электронной техники для заданной наработки по результатам контроля информативных параметров изделий в начальный момент времени. Особенностью исследуемых моделей прогнозирования является преобразование информативных параметров в дискретный двоичный или троичный код. Рассматривается несколько способов построения моделей на основе использования двоичных или троичных сигналов. Модели получены с помощью обработки данных обучающего эксперимента большого объёма, смоделированного на компьютере, а эффективность моделей определена путём их применения как к экземплярам обучающей выборки, так и к экземплярам смоделированных контрольных выборок.

На основе исследований даны рекомендации по использованию моделей для решения практических задач прогнозирования класса работоспособности изделий для заданных наработок.

Ключевые слова: информативные параметры, преобразование в кодовые сигналы, класс надёжности изделий, модели прогнозирования.

Введение. Решение о надёжности технических изделий, в том числе изделий электронной техники (ИЭТ) при использовании информативных параметров, контролируемых в начальный момент времени, принимают в виде отнесения прогнозируемого изделия (конкретного экземпляра) к одному из двух классов с точки зрения работоспособности (надёжности) этого экземпляра для заданной наработки (времени работы) t_n :

– K_1 – класс работоспособных экземпляров (экземпляров повышенного уровня надёжности);

– K_2 – класс неработоспособных экземпляров (потенциально ненадёжных экземпляров).

Практика показала, что использование одного информативного параметра может привести к заметным ошибкам прогнозирования в виде «перепутывания» по результатам

индивидуального прогнозирования номера класса экземпляров, к которому они в действительности будут принадлежать на момент наработки t_n . Поэтому для прогнозирования используют несколько информативных параметров. Их число k в основном выбирают в диапазоне $k = 2 \dots 5$ [1].

Совокупность информативных параметров $x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$, измеренная в начальный момент времени у конкретного экземпляра (будем называть его j -м экземпляром) создаёт образ этого экземпляра. Задача индивидуального прогнозирования в этом случае состоит в том, чтобы правильно распознать этот образ, т.е. верно указать класс (K_1 или K_2), к которому для интересующей наработки t_n будет принадлежать j -й экземпляр. Поэтому методы индивидуального прогнозирования надёжности ИЭТ по их информативным параметрам известны также как методы «распознавания образов».

Для выполнения индивидуального прогнозирования класса изделий для заданной наработки t_n нужно располагать моделью прогнозирования. Её получают, используя предварительные экспериментальные исследования на надёжность некоторой выборки изделий интересующего типа. Эти исследования называют обучающим экспериментом.

Модель прогнозирования обычно получают в виде [1, 2]

$$\begin{aligned} j \in K_1, \text{ если } F[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}] \geq P_0, \\ j \in K_2, \text{ если } F[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}] < P_0, \end{aligned} \quad (1)$$

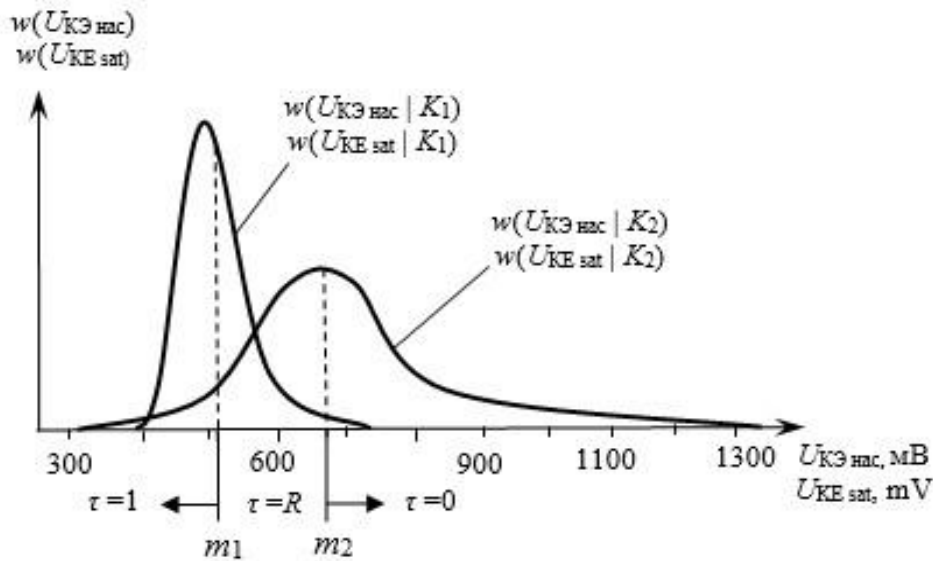
где j – символ, используемый для обозначения конкретного экземпляра; $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ – значения информативных параметров, измеренные для j -го экземпляра в момент времени $t = 0$; $F[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}]$ – значение прогнозирующей функции, подсчитанной для j -го экземпляра; k – число информативных параметров, используемых для решения задачи индивидуального прогнозирования класса экземпляров для заданной наработки; P_0 – порог (иначе – критерий) разделения классов, определяемый экспериментально.

Полученную модель вида (1) применяют к однотипным экземплярам, не принимавшим участия в обучающем эксперименте.

Известные методы прогнозирования [1, 2], такие как метод статистических решений, метод потенциальных функций и некоторые другие являются сложными как для понимания, так и для автоматизации процедуры прогнозирования.

Известно [2], что непрерывные отчёты информативных параметров ИЭТ в определённой степени содержат избыточное количество информации о классе работоспособности экземпляра для интересующей наработки t_n . С учётом этого представилось возможным перейти на двоичное представление информативных параметров. Тогда образ прогнозируемого экземпляра можно описать набором двоичных чисел и далее выполнять дальнейшую их логическую обработку. Используя принципы пороговой логики [3], модель прогнозирования можно получить в виде логической таблицы, показывающей какой комбинации двоичных сигналов соответствует тот или иной класс работоспособности ИЭТ [1, 4, 5].

Актуальность исследований. Установлено, что лучшие результаты прогнозирования обеспечивает преобразование информативных параметров в троичный код [1, 6, 7]. Такое преобразование иллюстрируется рисунком 1 на примере информативного параметра $U_{КЭнас}$ (напряжение насыщения коллектор эмиттер) биполярных транзисторов типа КТ872А.



m_1, m_2 – среднее значение (математическое ожидание) параметра соответственно для экземпляров классов K_1 и K_2

Рисунок 1. Преобразование информативного параметра $U_{КЭнас}$ в тричный код

В случае тричного преобразования для каждого информативного параметра x_i рассматривается три области его изменения и каждой из них присваивается свой кодовый тричный сигнал τ_i (см. рисунок 1). Для области, находящейся между средними значениями информативного параметра в классах K_1 и K_2 , т.е. для области от m_1 до m_2 , присваиваем код $\tau_i = R$ (от англ. Range – диапазон). Для этой области характерна высокая степень неопределённости класса работоспособности рассматриваемого ИЭТ (экземпляра). За пределами диапазона от m_1 до m_2 кодовый сигнал $\tau_i = 1$ (единица) присваивается той области информативного параметра, значения которой в основном соответствуют экземплярам класса K_1 , а код $\tau_i = 0$ (нуль) – области информативного параметра, значения которой в основном соответствуют экземплярам класса K_2 . С учётом этого алгоритм преобразования информативных параметров в тричный код запишется в виде [6, 7]

$$\begin{aligned} \Phi &= 1, \text{ если } x_i > m_1 \\ \Phi &= 0, \text{ если } x_i < m_2 \\ \Phi &= R, \text{ если } m_2 > x_i > m_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Соотношения (2) должны использоваться для информативных параметров в случае выполнения условия $m_1 > m_2$. Если имеет место $m_1 < m_2$, то следует использовать соотношения

$$\begin{aligned} \Phi &= 1, \text{ если } x_i < m_1 \\ \Phi &= 0, \text{ если } x_i > m_2 \\ \Phi &= R, \text{ если } m_1 > x_i > m_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Общая модель прогнозирования в случае преобразования информативных параметров в тричные сигналы 1, 0 и R может быть записана в виде, аналогичном модели метода пороговой логики [1, 3, 4], согласно которому информативные параметры

преобразуются в двоичные сигналы 1 (единица) или 0 (нуль). При троичном преобразовании модель индивидуального прогнозирования примет вид

$$D^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{если } F^{(j)} = \mathbb{W}[\mathfrak{b}_i, \mathfrak{f}^{(j)}] \geq T, \\ 0, & \text{если } F^{(j)} = \mathbb{W}[\mathfrak{b}_i, \mathfrak{f}^{(j)}] < T, \end{cases} \quad (4)$$

где $D^{(j)}$ – двоичный сигнал на выходе, соответствующий j -му экземпляру и равный единице для класса надёжных (K_1) и нулю – для класса потенциально ненадёжных (K_2) экземпляров; $F^{(j)}$ – прогнозирующая функция, получаемая для j -го экземпляра; \mathbb{W} – оператор, определяющий вид математических операций, выполняемых над троичными сигналами $\tau_i^{(j)}$ и их весовыми коэффициентами α_i , полученными для j -го экземпляра; $i = 1, \dots, k$.

В качестве весовых коэффициентов α_i , выбираемых для j -го экземпляра в зависимости от значения его троичного сигнала τ_i , предлагается использовать условные вероятности принадлежности j -го экземпляра к классу K_1 или к классу K_2 [5, 7]. Поэтому можно говорить о весовых коэффициентах, показывающих принадлежность (близость) экземпляра к классу K_1 и принадлежность к классу K_2 при условии, что троичный сигнал τ_i этого экземпляра принял конкретное значение из числа 1, 0 или R . Указанные коэффициенты (обозначим их через $[\alpha_i^{(K_1)}(\tau_i)]$ и $[\alpha_i^{(K_2)}(\tau_i)]$ определяют по результатам обучающего эксперимента:

$$\begin{aligned} \mathfrak{b}_i^{(K_1)}(\tau_i) &= P(K_1 | \mathfrak{f} = 1) \text{ при } \mathfrak{f}^{(j)} = 1, \\ \mathfrak{b}_i^{(K_2)}(\tau_i) &= P(K_2 | \mathfrak{f} = R) \text{ при } \mathfrak{f}^{(j)} = R, \\ \mathfrak{b}_i^{(K_2)}(\tau_i) &= P(K_2 | \mathfrak{f} = 0) \text{ при } \mathfrak{f}^{(j)} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $P(K_S | \tau_i = \varepsilon)$ – условная вероятность принадлежности экземпляра к классу K_S при условии, что троичный сигнал принял значение $\tau_i = \varepsilon$ ($\varepsilon = 1; 0; R$); нижний индекс S указывает на номер класса работоспособности изделия ($S = 1; 2$); верхний индекс j при τ_i означает, что в качестве весового коэффициента должно выбираться значение, соответствующее полученному троичному сигналу для j -го экземпляра (изделия).

Вероятности $P(K_S | \tau_i = \varepsilon)$ определяют с использованием классических подходов теории вероятностей [8], обрабатывая результаты преобразования информативных параметров в троичные сигналы и принимая во внимание в обучающей выборке количество экземпляров классов K_1 и K_2 , для которых троичные сигналы приняли значения $\varepsilon = 1, 0, R$.

На основе общей модели прогнозирования (4) были предложены конкретные модели для индивидуального прогнозирования класса работоспособности экземпляра для заданной наработки. Актуальным является вопрос об эффективности моделей прогнозирования. Ответ на этот вопрос позволит сформулировать рекомендации по практическому применению моделей для индивидуального прогнозирования класса работоспособности изделий: экземпляр повышенного уровня надёжности (K_1) или потенциально ненадёжный (K_2).

Исследуемые модели прогнозирования. Для исследования на эффективность выбрано четыре модели в случае троичного преобразования информативных параметров. Математический вид прогнозирующих функций F для этих моделей приведён в таблице 1.

Таблица 1. Прогнозирующие функции моделей прогнозирования

Номер модели	Математический вид прогнозирующей функции	Суть прогнозирующей функции
1	$F^{(j)} = \prod_{i=1}^k \sigma^{(K_1)}(\Phi_i^{(j)})$	Числовой потенциал, показывающий близость (принадлежность) j -го экземпляра к классу K_1
2	$F^{(j)} = \prod_{i=1}^k \sigma^{(K_1)}(\Phi_i^{(j)}) - \prod_{i=1}^k \sigma^{(K_2)}(\Phi_i^{(j)})$	Сравнение числовых потенциалов о близости j -го экземпляра к классам K_1 и K_2
3	$F^{(j)} = \frac{\prod_{i=1}^k \sigma^{(K_1)}(\Phi_i^{(j)})}{\prod_{i=1}^k \sigma^{(K_2)}(\Phi_i^{(j)})}$	Отношение числовых потенциалов о близости j -го экземпляра к классу K_1 и к классу K_2
4	$F^{(j)} = \prod_{i=1}^k \log_2 \frac{P(K_1 \Phi_i^{(j)})}{P(K_1)} - \prod_{i=1}^k \log_2 \frac{P(K_2 \Phi_i^{(j)})}{P(K_2)}$	Количество частной информации о классе K_1 и классе K_2 , содержащейся в полученном наборе троичных сигналов τ_1, \dots, τ_k j -го экземпляра

Обозначения параметров, указанных в таблице 1:

$F^{(j)}$ – значение прогнозирующей функции, соответствующее j -му экземпляру; k – число информативных параметров, используемых для индивидуального прогнозирования класса работоспособности; $\sigma^{(K_s)}(\Phi_i^{(j)})$ – весовой коэффициент, определяемый по выражению (5), выбираемый с учётом значения троичного сигнала τ_i , полученного для j -го экземпляра ($i = 1, \dots, k$); $P(K_s|\Phi_i^{(j)})$ – условная вероятность принадлежности j -го экземпляра к классу K_s ($S = 1; 2$) при условии, что по результатам преобразования i -го информативного параметра с использованием алгоритмов (2) или (3) получен троичный сигнал $\tau_i^{(j)}$; $i = 1, \dots, k$; $P(K_s)$ – начальная вероятность принадлежности экземпляра к классу работоспособности K_s ($S = 1; 2$).

Условия статистического имитационного моделирования обучающего эксперимента. На примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А и полевых транзисторов типа КП744А были исследованы статистические закономерности информативных параметров [6, 7]. В таблице 2 в качестве иллюстрации приведены статистические характеристики информативных параметров, используемых для биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А. Пояснения электрических параметров, указанных в таблице 2:

- $h_{21Э}$ – статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером;
- $I_{КЭ0}$ – обратный ток коллектора;
- $U_{КЭнас}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер.

Таблица 2. Статистические характеристики информативных параметров

Характеристика	Информативный параметр					
	$x_1 \rightarrow h_{21Э}$		$x_2 \rightarrow I_{кЭ0}, \text{мкА}$		$x_3 \rightarrow U_{кЭнас}, \text{мВ}$	
	Класс K_1	Класс K_2	Класс K_1	Класс K_2	Класс K_1	Класс K_2
Минимальное значение, x_{\min}	2,97	2,68	0,15	0,16	396	392
Максимальное значение, x_{\max}	4,00	3,95	0,26	0,31	723	1395
Среднее значение, m	3,51	3,22	0,209	0,233	521,1	674,5
Стандартное отклонение, σ	0,267	0,317	0,0193	0,0293	71,15	221,4
Коэффициент вариации, ν	0,075	0,092	0,132	0,093	0,125	0,323
Отношение σ_2/σ_1	1,14		1,52		3,15	
Отношение ν_2/ν_1	1,24		1,36		2,44	

Для выполнения статистического имитационного моделирования обучающего эксперимента использовано три информативных параметра (обозначены через x_1 , x_2 и x_3). При выборе условий моделирования информативных параметров приняты во внимание экспериментально наблюдаемые расхождения между центрами классов m_1 и m_2 (средними значениями информативных параметров в классе K_1 и K_2), которые составляли до 30 %. Средние значения (математические отклонения) каждого из трёх рассматриваемых информативных параметров x_1 , x_2 и x_3 для экземпляров класса K_1 условно приняты, как $m_1 = 10$ единиц. С учётом этого, а также статистических характеристик информативных параметров, определены условия моделирования информативных параметров x_1 , x_2 и x_3 в предположении, что они имеют законы распределения, близкие к нормальным, а коэффициенты парной корреляции между информативным параметром x_i и номером класса работоспособности ИЭТ S ($S = 1, 2$), а также между самими информативными параметрами x_i соответствуют уровню «заметная корреляция» по шкале Чеддока, согласно которой модуль коэффициентов парной корреляции имеет значения $|r| = 0,5 \dots 0,7$ (таблица 3).

Таблица 3. Условия моделирования информативных параметров

Класс работоспособности ИЭТ	Характеристика информативного параметра	Значение характеристики, используемое при моделировании информативного параметра		
		x_1	x_2	x_3
K_1	m_1	10	10	10
	σ_1	0,6	0,9	1,3
K_2	m_2	11	12	13
	σ_2	0,75	1,35	2,6

Фрагмент обучающего эксперимента, смоделированного на компьютере с использованием приложения *Microsoft Excel*, показан на рисунке 2. Объём обучающей выборки выбран в количестве 5000 экземпляров, из них для заданной наработки количество

надёжных экземпляров (класс K_1) составляет $n_1 = 3000$ и потенциально ненадёжных (класс K_2) – $n_2 = 2000$.

Номер в классе	x_1	x_2	x_3	Номер класса, S
1	10,125	10,321	11,450	1
2	9,855	8,899	9,597	1
3	9,792	10,383	9,163	1
4	10,674	10,157	9,583	1
5	10,337	9,377	11,333	1
6	9,097	9,486	9,317	1
7	11,465	10,681	8,779	1
8	10,603	10,134	10,891	1
9	9,326	10,395	11,579	1
10	9,134	10,574	9,399	1

Номер в классе	x_1	x_2	x_3	Номер класса, S
1	11,209	11,517	14,502	2
2	12,274	13,969	15,661	2
3	10,715	12,265	7,027	2
4	11,869	11,406	12,639	2
5	11,213	10,775	10,179	2
6	11,219	10,613	11,243	2
7	9,907	12,372	11,596	2
8	11,052	13,134	14,068	2
9	10,998	9,980	14,176	2
10	11,210	12,626	18,057	2

2991	10,097	9,670	9,564	1
2992	9,213	9,709	10,146	1
2993	9,171	11,448	11,239	1
2994	9,590	10,162	8,730	1
2995	9,616	10,082	9,724	1
2996	10,034	12,367	10,665	1
2997	10,690	9,832	10,368	1
2998	10,437	10,226	11,939	1
2999	10,252	10,054	9,940	1
3000	10,011	9,796	10,332	1
min	4,278	6,793	5,048	
max	11,853	13,250	17,242	
m1	9,997	9,993	10,012	
$\sigma 1$	0,618	0,919	1,354	

1991	12,174	11,840	15,947	2
1992	10,335	10,727	12,456	2
1993	9,850	11,382	14,033	2
1994	10,503	11,999	9,923	2
1995	11,513	13,723	11,665	2
1996	12,448	14,685	10,818	2
1997	11,775	11,061	9,590	2
1998	9,732	11,888	11,814	2
1999	10,328	12,539	12,370	2
2000	10,959	10,959	15,690	2
min	8,850	7,877	3,012	
max	13,303	17,051	21,486	
m2	11,003	12,049	13,146	
$\sigma 2$	0,772	1,339	2,635	

Рисунок 2. Фрагмент результатов обучающего эксперимента

Используя результаты статистического имитационного моделирования обучающего эксперимента, для каждого информативного параметра были определены средние значения m_1 и m_2 для экземпляров класса K_1 и класса K_2 и по алгоритму (2) выполнено преобразование информативных параметров в троичные сигналы 1, 0 или R, а затем на основе анализа результатов преобразования найдены весовые коэффициенты, представляющие собой условные вероятности $P(K_S|\tau_i = \varepsilon)$ ($\varepsilon = 1; 0; R$); $S = 1; 2$ (таблица 4).

Таблица 4. Весовые коэффициенты троичных сигналов

Весовой коэффициент: вероятность	Значение вероятности для τ_i :			Весовой коэффициент: вероятность	Значение вероятности для τ_i :		
	τ_1	τ_2	τ_3		τ_1	τ_2	τ_3
$P(K_1 1)$	0,885	0,931	0,867	$P(K_2 1)$	0,115	0,069	0,133
$P(K_1 0)$	0,123	0,036	0,033	$P(K_2 0)$	0,877	0,964	0,967
$P(K_1 R)$	0,634	0,623	0,652	$P(K_2 R)$	0,366	0,377	0,348

С учётом математического вида прогнозирующей функции F были определены её значения для исследуемых моделей, указанных в таблице 1 под номерами 1–4. В таблице 5 в качестве примера приведены значения F для первых 20-и экземпляров класса K_1 смоделированной обучающей выборки.

В качестве критерия оценки эффективности моделей прогнозирования использовалась вероятность принятия правильных решений $P_{\text{прав}}$, определяемая по формуле [1, 2]

$$P_{\text{прав}} = \frac{n_{11} + n_{22}}{n}, \quad (6)$$

где n_{11} – количество правильно распознанных с использованием модели прогнозирования экземпляров класса K_1 в обучающей или контрольной выборке; n_{22} – количество правильно распознанных с использованием модели прогнозирования экземпляров класса K_2 в обучающей или контрольной выборке; n – объём выборки (обучающей или контрольной).

Таблица 5. Значения прогнозирующей функции для исследуемых моделей

Номер в классе	Информативный параметр			Троичный сигнал			Прогнозирующая функция F для модели (см. таблицу 1):			
	x_1	x_2	x_3	τ_1	τ_2	τ_3	1	2	3	4
1	10,125	10,321	11,450	R	R	R	1,908	0,817	1,748	0,664
2	9,855	8,899	9,597	1	1	1	2,683	2,366	8,470	7,650
3	9,792	10,383	9,163	1	R	1	2,375	1,750	3,798	4,620
4	10,674	10,157	9,583	R	R	1	2,124	1,247	2,423	2,464
5	10,337	9,377	11,333	R	1	R	2,217	1,433	2,830	3,694
6	9,097	9,486	9,317	1	1	1	2,683	2,366	8,470	7,650
7	11,465	10,681	8,779	0	R	1	1,613	0,225	1,162	-1,160
8	10,603	10,134	10,891	R	R	R	1,908	0,817	1,748	0,664
9	9,326	10,395	11,579	1	R	R	2,160	1,319	2,570	2,820
10	9,134	10,574	9,399	1	R	1	2,375	1,750	3,798	4,620
11	9,771	9,943	13,369	1	1	0	1,849	0,697	1,606	0,050
12	9,202	10,040	10,977	1	R	R	2,160	1,319	2,570	2,820
13	11,126	11,112	8,962	0	R	1	1,613	0,225	1,162	-1,160
14	9,243	11,800	11,207	1	R	R	2,160	1,319	2,570	2,820
15	10,327	9,887	11,312	R	1	R	2,217	1,433	2,830	3,694
16	9,935	9,503	11,290	1	1	R	2,468	1,936	4,639	5,850
17	9,683	9,078	11,160	1	1	R	2,468	1,936	4,639	5,850
18	10,281	9,854	8,295	R	1	1	2,432	1,864	4,281	5,494
19	10,452	9,808	10,768	R	1	R	2,217	1,433	2,830	3,694
20	9,859	9,173	9,440	1	1	1	2,683	2,366	8,470	7,650

Результаты исследований. В таблице 6 приведены значения вероятностей $P_{\text{прав}}$, полученные путём применения построенных моделей (с использованием данных смоделированного обучающего эксперимента) для индивидуального прогнозирования класса работоспособности (K_1 или K_2) экземпляров этой же обучающей выборки (5000 экземпляров). Указываются также усреднённые значения $P_{\text{прав}}$, полученные по результатам применения построенных по обучающей выборке исследуемых моделей к пяти смоделированным контрольным выборкам, каждая из которых имела объём 5000 экземпляров. Кроме того, приводятся значения $P_{\text{прав}}$, полученные по моделям прогнозирования, построенным с учётом преобразования информативных параметров в двоичные сигналы (1 и 0). Эти данные приведены для модели базового метода пороговой логики [1] и модели, обеспечивающей максимальное значение вероятности $P_{\text{прав}}$ из числа исследуемых моделей прогнозирования, использующих двоичное преобразование информативных параметров.

Таблица 6. Эффективность моделей прогнозирования по результатам статистического имитационного моделирования

Номер $F^{(j)}$ в таблице 1	Вид кодового сигнала	Описание прогнозирующей функции $F^{(j)}$	Значение порога разделения классов	Вероятность правильных прогнозов класса работоспособности	
				обучающая выборка	контрольная выборка
–	Двоичный	Базовый метод пороговой логики, использование близости к классу K_1 , коды: 1, 0	1,433*	0,894	0,871
–	Двоичный	Использование частной информации о классах K_1 и K_2	0 бит	0,906	0,894
1	Троичный	Аналог базового метода пороговой логики, использование близости к классу K_1 , коды: 1, 0, R	1,428*	0,906	0,894
2	Троичный	Разность показателей близости к классам K_1 и K_2	0	0,894	0,890
3	Троичный	Отношение показателей близости к классам K_1 и K_2	0	0,901	0,894
4	Троичный	Использование частной информации о классах K_1 и K_2	0 бит	0,913	0,906

* – Пороги найдены из условия $P_{\text{прав}} \rightarrow \max$.

Заключение. Как следует из результатов, приведённых в таблице 6, модели прогнозирования, использующие суммарное значение частной информации о классе K_1 и классе K_2 , получаемой от набора двоичных (1 или 0) и троичных (1, 0 или R), в рамках своего вида преобразования информативных параметров обеспечивают большее значение вероятности принятия правильных решений, т.е. меньшие ошибки прогнозирования класса работоспособности изделий, нежели другие модели. С использованием результатов индивидуального прогнозирования, полученным при рассмотрении обучающей и контрольных выборок установлено, что модель прогнозирования, использующая суммарное значение частной информации о классе K_1 и классе K_2 , в случае троичного преобразования информативных параметров обеспечивает ошибки прогнозирования на 10...20 % меньше, нежели аналогичная модель в случае двоичного преобразования информативных параметров. Поэтому эта модель рекомендуется для использования при решении практических задач индивидуального прогнозирования класса работоспособности изделий электронной техники.

Список литературы

- [1] Боровиков, С. М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники: монография / С. М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.
- [2] Пестряков, В. Б. Индивидуальное прогнозирование состояния РЭА с использованием теории распознавания : учеб. пособие / В. Б. Пестряков, В. В. Андреева. – Куйбышев : Изд-во КуАИ, 1980. – 88 с.
- [3] Дертоузос, М. Пороговая логика : пер. с англ. / М. Дертоузос. – М. : Мир, 1967. – 343 с.
- [4] Метод прогнозирования надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 4. – С. 105-109.
- [5] Прогнозирование надёжности изделий электронной техники методом пороговой логики / С. М. Боровиков [и др.] // Доклады БГУИР : электроника, материалы, технологии, информатика. – 2006. – № 2(14). – С. 49-56.

[6]. Прогнозирование класса надёжности изделий электронной техники методом преобразования информативных параметров в дискретный код / В. О. Казючиц [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 91–97. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-91-97.

[7] Казючиц В. О., Боровиков С. М., Шнейдеров Е. Н. // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 92- 100. – DOI : <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-92-100>.

[8] Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. – 10-е изд. стер. – М. : Высш. шк., 2006. – 575.

STATISTICAL SIMULATION MODELING IN THE RESEARCH OF THE EFFECTIVENESS OF MODELS FOR PREDICTING PRODUCT RELIABILITY BY INFORMATIVE PARAMETERS

S.M. Borovikov

*Associate Professor, Department of Information
Computer Systems Design,
PhD of Technical sciences, Associate Professor*

Abstract. The application of statistical simulation modeling is considered to study the effectiveness of models for predicting the reliability class of electronic equipment products for a given operating time based on the results of monitoring the informative parameters of products at the initial point in time. A feature of the forecasting models under study is the transformation of informative parameters into discrete binary or ternary code. Several ways to build models based on the use of binary or ternary signals are considered. The models are obtained by processing data from a computer-simulated training experiment, and the effectiveness of the models is determined by applying them both to instances of the training set and to instances of the simulated control samples.

Based on the research, recommendations are given on the use of models to solve practical problems of predicting the reliability class of products for given operating times.

Keywords: informative parameters, conversion to code signals, product reliability class, forecasting models.