ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПО КРИТЕРИЮ БАЙЕСА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь, доцент, кандидат технических наук, доцент

Высокая надежность электронных устройств систем телекоммуникаций может быть обеспечена отбором изделий электронной техники (ИЭТ), отвечающих требованию надежности для заданной наработки, используя методы индивидуального прогнозирования по значениям информативных параметров ИЭТ в начальный момент времени [1]. При выполнении индивидуального прогнозирования класса надежности экземпляров (единиц ИЭТ) для заданной наработки возможны ошибки, связанные с перепутыванием класса надежности экземпляра:

$n_{1\to2}$ – количество экземпляров, в действительности являющиеся надежными для заданной наработки (класс K_1), но которые по прогнозу будут отнесены к потенциально ненадежным экземплярам (класс K_2); эти ошибки называют ошибками первого рода, их доля в прогнозируемой выборке ИЭТ оценивается вероятностью $P_{\text{изг}}$, называемой риском изготовителя;

$n_{2\to1}$ – количество экземпляров, в действительности являющиеся потенциально ненадежными для заданной наработки (класс K_2), но которые по прогнозу будут отнесены к надежным экземплярам (класс K_1); эти ошибки называют ошибками второго рода, их доля в прогнозируемой выборке ИЭТ оценивается вероятностью $P_{\text{потр}}$, называемой риском потребителя.

Для изготовителей ИЭТ при выполнении индивидуального прогнозирования экземпляров однотипных выборок ИЭТ (будем называть их контрольными выборками) важным является риск изготовителя $P_{\text{изг}}$, характеризующий по результатам прогнозирования наличие ошибок первого рода $n_{1\to2}$. Для предприятий, занимающихся сборкой электронных устройств, более важным является значение риска потребителя $P_{\text{потр}}$, характеризующего для прогнозируемой выборки ИЭТ наличие ошибок второго рода $n_{2\to1}$.

Вывод об эффективности исследуемых моделей прогнозирования был сделан с помощью критерия Байеса в виде минимизации средних удельных потерь ρ (среднего риска), обусловленных ошибками прогнозирования первого $n_{1\to2}$ и второго $n_{2\to1}$ рода с учетом априорных вероятностей классов надежности ИЭТ [1]:

$$\rho = [1 - P(K_1)] \cdot P_1 \cdot C_{12} + [1 - P(K_2)] \cdot P_2 \cdot C_{21} \to \min, \qquad (1)$$

где $P(K_1)$, $P(K_2)$ – вероятности правильного распознавания (при индивидуальном прогнозировании) соответственно экземпляров классов надежности K_1 и K_2; P_1, P_2 – начальные (априорные) вероятности принадлежности прогнозируемого экземпляра для заданной наработки соответственно к классам надежности K_1 и K_2, найденные по результатам обучающего эксперимента; C_{12}, C_{21} – средняя удельная цена потерь, обусловленная соответственно ошибкой первого $n_{1\to2}$ и второго $n_{2\to1}$ рода.

Отметим, что величины $[1 - P(K_1)]$ и $[1 - P(K_2)]$ представляют собой условные вероятности решений (прогнозов) о принадлежности экземпляра к классу надежности соответственно K_2 и K_1 при условии, что в действительности он является представителем соответственно класса надежности K_1 и K_2, например $[1 - P(K_1)] = P(\text{реш } K_2 \,|\, K_1)$.

Результаты анализа моделей прогнозирования по критерию (1) при отношении средней удельной цены потерь C_{12} к C_{21} как 1 : 1, 1 : 20 и 1 : 100 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение моделей прогнозирования по критерию Байеса ρ → min

Модель	Значение ρ → min (условные единицы):						Обобщенный ранг модели
	эксперимент при $C_{12} : C_{21}$			статистическое моделирование при $C_{12} : C_{21}$			
	1 : 1	1:20	1 : 100	1 : 1	1 : 20	1:100	
2БМПЛ	0,104	1,495	7,351	0,104	1,461	7,173	5
2(Ч1-Ч2)	0,112	1,093	5,221	0,131	0,990	4,606	4
3БМПЛ	0,103	0,756	3,508	0,069	0,392	1,752	2
3(Ч1-Ч2)	0,088	0,741	3,493	0,067	0,398	1,790	1
МСР (н/з)	0,087	1,151	5,631	0,068	0,710	3,414	4
МПФ	0,098	1,246	6,078	0,061	0,753	3,665	3

Пояснение моделей приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Пояснение исследуемых моделей

Обозначение модели	Пояснение способа получения прогнозирующей функции $F^{(j)}$ для прогнозируемого (j-го) экземпляра ИЭТ	Литературный источник
2БМПЛ	Базовый метод пороговой логики. Преобразование информативных параметров в двоичный код (1 или 0), использование близости к классу K_1.	[1]
2(Ч1-Ч2)	Преобразование информативных параметров в двоичный код (1 или 0). Сравнение частной информации о классах надежности ИЭТ (K_1 и K_2), содержащейся в полученном наборе двоичных кодовых сигналов.	[2]
3БМПЛ	Аналог базового метода пороговой логики. Преобразование информативных параметров в троичный код (1, 0, R – неопределенность). Использование близости экземпляра к классу K_1.	[3]
3(Ч1-Ч2)	Преобразование информативных параметров в троичный код (1, 0, R – неопределенность. Сравнение частной информации о классах надежности K_1 и K_2, содержащейся в полученном наборе троичных кодовых сигналов.	[4]
МСР (н/з)	Метод статистических решений, нормальные законы распределения информативных параметров в классах надежности. Использование отношения правдоподобия.	[1]
МПФ	Метод потенциальных функций. Использование суммарного потенциала, наводимого на прогнозируемый экземпляр всеми экземплярами обучающей выборки.	[1]

Результаты, приведенные в таблице 1, получены путем обработки обучающего эксперимента, проведенного для полевых МОП-транзисторов большой мощности типа КП744А при объеме обучающей выборки 172 экземпляра, а также обучающего эксперимента, смоделированного на компьютере на примере этих же транзисторов при объеме выборки 5000 экземпляров с учетом распределения информативных параметров в каждом классе надежности по смещенному (трехпараметрическому) закону Вейбулла. В качестве информативных рассматривались следующие электрические параметры транзисторов: пороговое напряжение затвор–исток ($U_{\text{зи.пор}}$), емкость затвор–сток ($C_{\text{ЗС}}$) и емкость затвор–исток ($C_{\text{ЗИ}}$).

Анализ результатов, полученных с использованием реального обучающего эксперимента и обучающего эксперимента, выполненного методом статистического имитационного моделирования на компьютере, позволил определить обобщенный (усредненный) ранг исследуемых моделей прогнозирования по критерию (1). Модели прогнозирования, использующие преобразование информативных параметров в троичные кодовые сигналы, независимо от способа формирования прогнозирующей функции $F^{(j)}$, обеспечивают меньший средний риск ρ, обусловленный ошибками прогнозирования первого $n_{1\to2}$ и второго $n_{2\to1}$ рода, нежели модели, использующие преобразование информативных параметров в двоичные кодовые сигналы.

С учетом неопределенности отношения $C_{12} : C_{21}$ – средних удельных потерь, обусловленных соответственно ошибками первого $n_{1\to2}$ и второго $n_{2\to1}$ рода, предпочтение по минимуму среднего риска ρ определяемому по (1), необходимо отдавать модели, использующей сравнение частной информации о классах надежности K_1 и K_2, содержащейся в полученном наборе троичных кодовых сигналов (см. модель 3(Ч1-Ч2) в таблице 2).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боровиков, С. М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники / С. М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.

2. Казючиц, В. О. Эвристическая модель прогнозирования работоспособности полупроводниковых приборов / В. О. Казючиц, С. М. Боровиков, Е. Н. Шнейдеров // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 92–100.

3. Боровиков, С. М. Эффективность моделей прогнозирования надежности изделий электронной техники методом преобразования информативных параметров в троичный код / С. М. Боровиков // Технические средства защиты информации : матер. XXIII Международ. науч.-техн. конф., Минск, 08 апреля 2025 года. – Минск : БГУИР, 2025. – С. 88–92.

4. Боровиков, С. М. Статистическое имитационное моделирование в исследовании эффективности моделей прогнозирования надежности изделий по информативным параметрам / С. М. Боровиков // BIG DATA и анализ высокого уровня : сб. науч. статей X Международ. науч.-практ. конф., Минск, 13 марта 2024 г. : в 2 ч. Ч. 2. Минск : БГУИР, 2024. – С. 122–131.