



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-92-100>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.33–027.45

ЭВРИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В.О. КАЗЮЧИЦ, С.М. БОРОВИКОВ, Е.Н. ШНЕЙДЕРОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27 декабря 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Метод пороговой логики, применяемый для изделий электронной техники при оценке их надежности в виде прогнозирования класса работоспособности изделий для заданной наработки (K_1 – класс работоспособных, K_0 – класс неработоспособных экземпляров), предусматривает преобразование в двоичный код информативных параметров, полученных в начальный момент времени, и позволяет построить модель прогнозирования в виде таблицы, показывающей, каким комбинациям кода соответствуют экземпляры класса K_1 . Использование двоичного преобразования упрощает процедуру прогнозирования, но немного снижается достоверность прогнозов. Актуальным является получение модели прогнозирования, обладающей простотой ее применения и обеспечивающей более высокую достоверность прогнозирования класса изделий, нежели при двоичном преобразовании параметров. На примере биполярных транзисторов типа КТ872А установлены закономерности электрических параметров, используемых в качестве информативных, и для их преобразования в код предложено рассматривать три области изменения параметра: первая область – диапазон значений между математическими ожиданиями, полученными отдельно для экземпляров классов K_1 и K_0 ; две другие области – значения параметра, находящиеся слева и справа от этого диапазона. Значениям параметра, попадающим в диапазон, присваивается код R (от слова Range – диапазон), за пределами указанного диапазона – код 1 (единица) или 0 (нуль) в зависимости от закономерности информативного параметра. Поясняется, как выполнять преобразование параметров в коды 1, 0 и R и получать модель прогнозирования в виде логической таблицы, построенной из этих кодов. На примере исследуемых транзисторов показано, что предлагаемая эвристическая модель обеспечивает лучшие результаты прогнозирования, практически сохраняя простоту базового метода пороговой логики.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, надежность, индивидуальное прогнозирование, информативные параметры, прогнозирующее правило, прогнозирующая функция.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа подготовлена в рамках выполнения проекта № Т20МВ-026 на тему «Прогнозирование эксплуатационной надежности мощных полупроводниковых приборов с использованием методов и алгоритмов машинного обучения», утвержденного научным советом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (протокол № 1 от 22.04.2020).

Для цитирования. Казючиц В.О., Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н. Эвристическая модель прогнозирования работоспособности полупроводниковых приборов. Доклады БГУИР. 2022; 20(1): 92-100.

HEURISTIC MODEL OF FORECASTING OF OPERATING STATE OF SEMICONDUCTOR DEVICES

VLADISLAV O. KAZIUCHYTS, SERGEI. M. BOROVNIKOV, EVGENI N. SHNEIDEROV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 27 December 2021

© *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022*

Abstract. The threshold logic method used for electronic products when assessing their reliability in the form of predicting the performance class of products for a given operating time (K_1 is a class of operable ones, K_0 is a class of inoperable copies) provides for the transformation into a binary code of informative parameters obtained at the initial moment of time, and allows to build a forecasting model in the form of a table showing which code combinations correspond to the instances of the K_1 class. The use of a binary transformation simplifies the forecasting procedure, but the reliability of the predictions is slightly reduced. It is relevant to obtain a forecasting model that has the simplicity of its application and provides a higher reliability of forecasting a class of products than with a binary transformation of parameters. On the example of bipolar transistors of the KT872A type, the regularities of electrical parameters used as informative ones are established, and for their transformation into a code, it is proposed to consider three areas of parameter change: the first area is the range of values between the mathematical expectations obtained separately for instances of the classes K_1 and K_0 ; the other two areas are the parameter values to the left and right of this range. Parameter values falling within the range are assigned the R code (from the word Range), outside the specified range - the code 1 (one) or 0 (zero), depending on the pattern of the informative parameter. It is explained how to convert parameters to codes 1, 0 and R and get a prediction model in the form of a logical table built from these codes. Basing on the example of the investigated transistors, it is shown that the proposed heuristic model provides the best forecasting results, practically keeping the simplicity of the basic method of threshold logic.

Keywords: semiconductor devices, reliability, individual prediction, informative parameters, predictive rule, predictive function.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The article was prepared as part of the project No. T20MB-026 on the topic “Predicting the Operational Reliability of Powerful Semiconductor Devices Using Machine Learning Methods and Algorithms”, approved by the Scientific Council of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Protocol No. 1 dated 22.04.2020).

For citation. Kaziuchyts V.O., Borovnikov S.M., Shneiderov E.N. Heuristic Model of Forecasting of Operating State of Semiconductor Devices. Doklady BGUIR. 2022; 20(1): 92-100.

Введение

Индивидуальное прогнозирование надежности изделий электронной техники, в том числе мощных полупроводниковых приборов (ППП), по их информативным параметрам позволяет выполнить отбор экземпляров, отвечающих требованиям по надежности для элементов, используемых при сборке ответственных электронных устройств. Отбор экземпляров высокого уровня надежности в большинстве случаев выполняют предприятия, изготавливающие электронные устройства. Для таких предприятий одним из важнейших требований к процедуре прогнозирования является ее простота. После проведения предварительных исследований на надежность интересующего типа ППП получают модель прогнозирования, называемую прогнозирующим правилом. Сами исследования называют обучающим экспериментом [1, 2]. Их цель – установить взаимосвязь между значениями информативных параметров ППП рассматриваемого типа в начальный момент времени и уровнем надежности приборов для интересующего времени работы (наработки). Применение на практике находит случай дискретной оценки надежности в виде соответствия

(класс K_1) или несоответствия (класс K_0) приборов требованиям надежности. Модель прогнозирования получают один раз, а далее ее используют для отбора однотипных ППП высокого уровня надежности из выборки, экземпляры которой не использовались в обучающем эксперименте.

Актуальность исследований

В общем случае применение полученной по результатам обработки обучающего эксперимента модели прогнозирования состоит в измерении в начальный момент времени у конкретного экземпляра информативных параметров, подстановке их значений в модель и получении для рассматриваемого экземпляра прогнозирующей функции, по значению которой принимается решение о соответствии или несоответствии прибора требованию надежности в виде класса экземпляра (K_1 или K_0). Наличие вычислительной процедуры получения решающей функции во многих случаях ограничивает, а в ряде случаев вынуждает предприятия отказаться от применения методов прогнозирования надежности ППП по их информативным параметрам.

В [3, 4] для прогнозирования по информативным параметрам был предложен метод, в котором значения параметров, полученные при измерении, преобразуются в двоичный код. В итоге этот метод позволяет получить для практического применения эвристическую модель прогнозирования в виде логической таблицы, показывающей, при каких комбинациях двоичного кода должен делаться прогноз о принадлежности экземпляра к интересующему классу, например, классу K_1 в случае отбора ППП, отвечающих требованию надежности. Прогнозное решение о соответствии экземпляра требованию надежности принимается в данном случае по набору двоичных чисел без выполнения математических вычислений. Причем пороговые уровни информативных параметров, необходимые для преобразования параметров в двоичный код, а также те комбинации (сочетания) двоичных чисел, которые отвечают требованию надежности приборов, получают заранее один раз, используя результаты обучающего эксперимента. Этот метод был назван базовым методом пороговой логики [1, 2]. Переход на двоичное преобразование информативных параметров заметно упрощает процедуру прогнозирования, но при этом немного снижается достоверность прогнозов. Актуальным является получение такой модели прогнозирования, которая позволила бы повысить достоверность прогнозирования надежности ППП, максимально сохранив при этом простоту базового метода пороговой логики.

Методика проведения эксперимента

В качестве ППП, на примере которых разработан подход к получению новой эвристической модели прогнозирования их работоспособности, использовались биполярные транзисторы большой мощности типа КТ872А. Объем обучающей выборки составлял 94 экземпляра. Был выполнен обучающий эксперимент и получены табличные данные о взаимосвязи электрических параметров, исследуемых на информативность, с классом экземпляров с учетом их работоспособности в течение заданной наработки: K_1 – класс надежных экземпляров в течение наработки, составляющей 15 000 ч; K_0 – класс потенциально ненадежных экземпляров, то есть экземпляров, у которых до момента окончания этой наработки возник внезапный отказ либо постепенный отказ по электрическому параметру, рассматриваемому в качестве критерия годности ППП для рабочих условий ($U_{КЭнас}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер). Использовались проводимые по типовым методикам ускоренные форсированные испытания, обсуждаемые в [1, 2, 5, 6]. Испытания проводились в лабораториях Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. С описанием используемой экспериментальной установки можно ознакомиться в [6]. Измерения большинства электрических параметров, исследуемых на информативность, и контроль работоспособности транзисторов выполнялись с использованием сертифицированного измерительного оборудования филиала «Транзистор» – предприятия, входящего состав ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющей компании холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 записаны электрические параметры, проверяемые на информативность, указываются значения коэффициентов линейной корреляции электрических параметров в начальный момент времени с номером класса экземпляров (1 или 0) на момент окончания испытаний. Символом * отмечены параметры, которые использовались в качестве информативных как в базовом методе пороговой логики, так и в модификации метода, использующей предлагаемую модель. Для принятия решения о классе (K_1 или K_0) новых однотипных экземпляров с точки зрения их работоспособности в течение заданной наработки с помощью базового метода пороговой логики была получена логическая таблица для прогнозирования, показывающая, каким комбинациям двоичных чисел (единица и нуль) должен соответствовать прогноз о принадлежности экземпляра к классу K_1 [6]. Вероятность принятия правильных решений $P_{\text{прав}}$ с учетом как класса K_1 , так и класса K_0 составила 0,81. Для практических применений такой результат не всегда является приемлемым. Можно увеличить порог, например, до значения $P_0 = 0,5 \dots 1$ дв. ед., и тем самым повысить вероятность правильного распознавания экземпляров класса K_1 . Однако в этом случае возрастет риск изготовителя, что будет проявляться в том, что немалое количество в действительности надежных экземпляров будут считаться по прогнозу потенциально ненадежными.

Таблица 1. Исследуемые электрические параметры транзисторов КТ872А
Table 1. The investigated electrical parameters of the КТ872А transistors

Параметр и обозначение Parameter and designation	Режим измерения Measurement mode	Коэффициент корреляции Correlation coefficient	Условие получения кода $\tau_i = R$ в новой модели прогнозирования Condition for code receiving $\tau_i = R$ in the new forecasting model
1. *Статический коэффициент передачи тока, $h_{21Э}$	$I_K = 7 \text{ А}$, $U_{КЭ} = 5 \text{ В}$	0,452	$3,22 \leq h_{21Э} \leq 3,51$
2. *Обратный ток коллектора, $I_{КБ0}$	$U_{КБ} = 500 \text{ В}$	-0,453	$0,209 \leq I_{КБ0} \leq 0,233 \text{ (мкА)}$
3. *Напряжение насыщения коллектор-эмиттер, $U_{КЭ \text{ нас}}$	$I_K = 7 \text{ А}$, $I_B = 3,5 \text{ А}$	-0,443	$521 \leq U_{КЭ \text{ нас}} \leq 675 \text{ (мВ)}$
4. Емкость коллекторного перехода, C_K	$U_{КБ \text{ обр}} = 2 \text{ В}$	0,387	–
5. Пробивное напряжение коллектор-база, $U_{КБ \text{ проб}}$	$I_{КБ} = 0,1 \text{ мА}$	-0,332	–

Анализ, проведенный авторами, показал, что возможны два основных пути повышения вероятности принятия правильных решений.

1. Увеличение числа используемых информативных параметров. Этот путь для ППП сдерживается проблемой поиска параметров с заметным уровнем информативности.

2. Получение эвристической модели прогнозирования, учитывающей для классов K_1 и K_0 область перекрытия, которая применительно к ППП имеет место для всех информативных параметров электрической природы.

Закономерности информативных параметров

Для получения эвристической модели прогнозирования работоспособности ППП были проанализированы электрические параметры, исследуемые в работе и используемые в обучающем эксперименте применительно к биполярным транзисторам типа КТ872А. Для электрических параметров, которые могут быть использованы в качестве информативных, установлены закономерности, пояснение которых приводится ниже.

1. Лучшему уровню надежности, т. е. экземплярам класса K_1 , в основном соответствуют большие значения информативного параметра, измеренные в начальный момент времени, а экземплярам класса K_0 – меньшие его значения. В этом случае ошибки прогнозирования в основном определяются шириной диапазона перекрытия значений информативного параметра для экземпляров классов K_1 и K_0 . Эта закономерность иллюстрируется на примере параметра $h_{21Э}$ с использованием гистограмм его распределения, построенных отдельно для экземпляров класса K_1 и класса K_0 (рис. 1, а, б).

Разновидностью этой закономерности является случай, когда классы K_1 и K_0 меняются местами на числовой оси параметра. Этой разновидности отвечал параметр $I_{КБ0}$ – обратный ток коллектора транзисторов типа КТ872А.

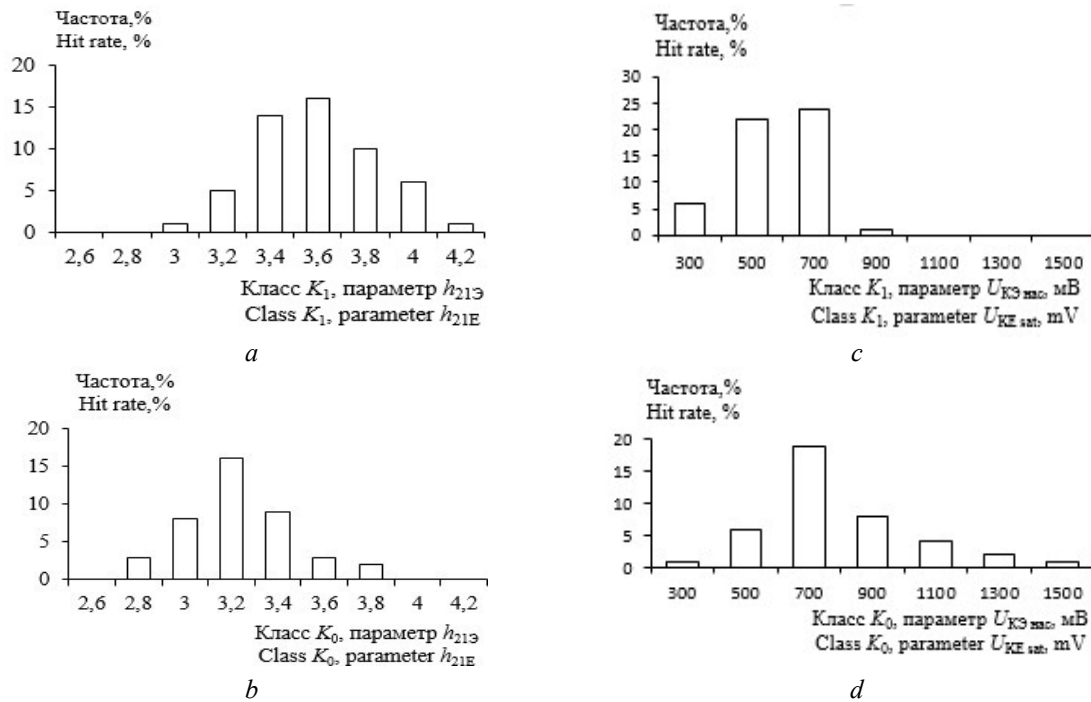


Рис. 1. Гистограммы распределения параметров: *a* – параметр h_{21E} , класс K_1 ; *b* – параметр h_{21E} , класс K_0 ; *c* – параметр $U_{КЭ\text{нас}}$, класс K_1 ; *d* – параметр $U_{КЭ\text{нас}}$, класс K_0

Fig. 1. Parameter distribution histograms: *a* - parameter h_{21E} , class K_1 ;

b - parameter h_{21E} , class K_0 ; *c* - parameter $U_{KE sat}$, class K_1 ; *d* - parameter $U_{KE sat}$, class K_0

2. Лучшему уровню надежности, т. е. экземплярам класса K_1 , в основном соответствуют меньшие значения информативного параметра, а экземплярам класса K_0 – большие его значения. Но при этом диапазон значений параметра для экземпляров класса K_1 оказывается внутри диапазона параметра для экземпляров класса K_0 . Эта закономерность имела место для параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ (напряжение насыщения коллектор-эмиттер). Закономерность для этого параметра иллюстрируется примером гистограмм его распределения, построенных отдельно для экземпляров класса K_1 и класса K_0 (рис. 1, *c*, *d*).

3. Лучшему уровню надежности, т. е. экземплярам класса K_1 , в основном соответствуют большие значения информативного параметра, а экземплярам класса K_0 – меньшие его значения. Но в этом случае диапазон значений параметра для экземпляров класса K_0 оказывается внутри диапазона значений параметра для экземпляров класса K_1 . В проводимых исследованиях этой закономерности отвечали следующие параметры: C_K – емкость коллекторного перехода; $U_{КБ\text{проб}}$ – пробивное напряжение коллектор-база (см. табл. 1).

Эвристическая модель прогнозирования работоспособности

Предлагаемая эвристическая модель прогнозирования, предназначенная для индивидуального прогнозирования ППП по их информативным параметрам, основана на использовании закономерностей, установленных экспериментально на примере биполярных транзисторов типа КТ872А для электрических параметров, рассматриваемых в качестве информативных. Ставилась задача предложить такую модель прогнозирования, которая использовала бы принципы метода пороговой логики и позволила бы представить прогнозирующее правило логической таблицей, исключающей необходимость проведения расчетов на этапе применения модели для прогнозирования новых однотипных экземпляров: только измерение у нового экземпляра значений информативных параметров, преобразование их в код путем сравнения с заранее полученными для каждого информативного параметра

пороговыми уровнями и уточнения по логической таблице, какому классу отвечает набор кодовых сигналов.

При получении модели были приняты во внимание следующие предпосылки, подтвержденные экспериментально при проведении обучающего эксперимента:

1. Электрические параметры, выбираемые в качестве информативных по значению коэффициента линейной корреляции между значениями параметра в начальный момент времени и надежностью изделий для интересующего времени работы (наработки), имеют разные значения математических ожиданий (средних значений) m_1 и m_0 для экземпляров классов K_1 и K_0 .

2. Если значение информативного параметра попадает в диапазон, границами которого являются математические ожидания m_1 и m_0 , то энтропия (степень неопределенности) класса экземпляра (K_1 или K_0) с учетом этого значения параметра выше, нежели в случае значения, находящегося за пределами диапазона (от m_1 до m_0). В этом можно убедиться, анализируя рис. 2, а.

3. За пределами диапазона, ограниченного значениями m_1 и m_0 , преобразование полученного при измерении параметра будем выполнять путем присваивания кода единицы или нуля с учетом того, что более высокому уровню надежности ППП в основном должен соответствовать код единица, меньшему уровню надежности – код нуль.

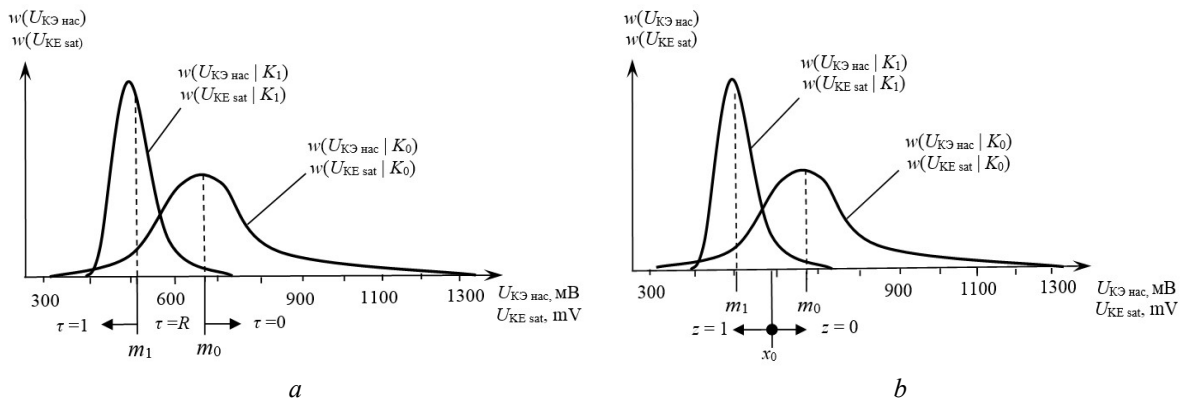


Рис. 2. Преобразование параметра $U_{KE\ sat}$ в код: а – предлагаемая модель; б – модель базового метода пороговой логики

Fig. 2. Conversion of the $U_{KE\ sat}$ parameter into the code: а – the proposed model; б – the model of the basic method of threshold logic

Для преобразования i -го информативного параметра (обозначим его через x_i) в кодовый сигнал (обозначим его через τ_i) выберем следующий алгоритм:

$$\begin{cases} \tau_i = 1, \text{ если } x_i > m_1, \\ \tau_i = 0, \text{ если } x_i < m_0, \\ \tau_i = R, \text{ если } m_0 \leq x_i \leq m_1, \end{cases} \quad (1)$$

где код R (от английского слова Range – диапазон) означает, что результат измерения информативного параметра попадает в диапазон между математическими ожиданиями m_1 и m_0 , соответствующими классам K_1 и K_0 для этого параметра.

Соотношения (1) следует использовать для тех информативных параметров, для которых выполняется условие $m_1 > m_0$. В случае $m_1 < m_0$ следует использовать соотношения:

$$\begin{cases} \tau_i = 1, \text{ если } x_i < m_1, \\ \tau_i = 0, \text{ если } x_i > m_0, \\ \tau_i = R, \text{ если } m_1 \leq x_i \leq m_0. \end{cases} \quad (2)$$

Применение условий (2) к информативному параметру $U_{KE\ sat}$ иллюстрирует рис. 2, а.

На рис. 2, б для сравнения показан подход, используемый в базовом методе пороговой логики для преобразования значений параметра $U_{KE\ sat}$ только в двоичный код.

В последнем столбце табл. 1 приведены условия получения кода $\tau_i = R$ для используемых информативных параметров. Если полученное при измерении значение информативного

параметра не отвечает записанному условию, то принимается $\tau_i = 1$ или $\tau_i = 0$ в зависимости от закономерности информативного параметра.

Предлагаемый алгоритм определения прогнозирующей функции для эвристической модели прогнозирования класса экземпляра (K_1 или K_0) основан на использовании понятия «частная информация о классе экземпляра, содержащаяся в сообщении о том, что кодовый сигнал τ_i принял конкретное значение (1, 0 или R)». С учетом [6] вычислительный алгоритм определения прогнозирующей функции $F^{(j)}$ для j -го экземпляра получен в виде

$$F^{(j)} = \sum_{i=1}^k \log_2 \frac{P(K_1 | \tau_i^{(j)} = \theta)}{P(K_1)} - \sum_{i=1}^k \log_2 \frac{P(K_0 | \tau_i^{(j)} = \theta)}{P(K_0)}, \text{ дв. ед.}, \quad (3)$$

где k – число используемых информативных параметров и, следовательно, кодовых сигналов τ_i ; $\tau_i^{(j)}$ – кодовый сигнал, полученный по соотношениям (1) или (2) для j -го экземпляра; $P(K_1 | \tau_i^{(j)} = \theta)$, $P(K_0 | \tau_i^{(j)} = \theta)$ – вероятность принадлежности экземпляра соответственно к классам K_1 и K_0 при условии, что в результате преобразования информативного параметра $x_i^{(j)}$ j -го экземпляра в кодовый сигнал $\tau_i^{(j)}$ последний принял значение θ ($\theta = 1, 0, R$); $P(K_1)$, $P(K_0)$ – начальная вероятность принадлежности экземпляра соответственно к классам K_1 и K_0 .

Первая сумма выражения (3) представляет собой частную информацию, получаемую для j -го экземпляра от набора кодовых сигналов $\tau_1^{(j)}$, $\tau_2^{(j)}$, ..., $\tau_k^{(j)}$ о классе K_1 , а вторая (вычитаемое) – частную информацию о классе K_0 . Результатом вычисления $F^{(j)}$ по выражению (3) является число, показывающее близость j -го экземпляра к классу K_1 , если $F^{(j)} > 0$, и близость к классу K_0 , если $F^{(j)} < 0$. Фактически решение о классе j -го экземпляра принимается в зависимости от того, информация о каком классе имеет большее значение, т. е. порогом P разделения классов является точка $P = F^{(j)} = 0$.

Ниже приводятся отношения, с помощью которых можно получить оценки вероятностей $P(K_1 | \tau_i = \theta)$, $P(K_0 | \tau_i = \theta)$, $P(K_1)$, $P(K_0)$, используемые в выражении (3).

$$P(K_S | \tau_i = \theta) = \frac{n(K_S | \tau_i = \theta)}{n(\tau_i = \theta)}, \quad P(K_S) = \frac{n(K_S)}{n}; \quad i=1, 2, \dots, k; \quad S=1; 0, \quad (4)$$

где $n(K_S | \tau_i = \theta)$ – количество в обучающей выборке экземпляров класса K_S , для которых кодовый сигнал τ_i i -го информативного параметра принял значение θ ($\theta = 1, 0, R$); $n(\tau_i = \theta)$ – общее количество в обучающей выборке экземпляров, для которых по соотношениям (1) или (2) кодовый сигнал τ_i i -го информативного параметра принял значение θ ($\theta = 1, 0, R$); $n(K_S)$ – количество экземпляров класса K_S в обучающей выборке; n – объем обучающей выборки.

Использование модели прогнозирования

В табл. 2 приведены полученные по результатам обучающего эксперимента вероятности, используемые в выражении (3) для подсчета частной информации о классах K_1 и K_0 .

Таблица 2. Данные для подсчета прогнозирующей функции
Table 2. Data for calculating the predictive function

Код τ_i	$P(K_1 \tau_i = 1)$	$P(K_1 \tau_i = 0)$	$P(K_1 \tau_i = R)$	$P(K_0 \tau_i = 1)$	$P(K_0 \tau_i = 0)$	$P(K_0 \tau_i = R)$
τ_1	0,813	0,185	0,629	0,181	0,815	0,371
τ_2	0,815	0,143	0,609	0,185	0,857	0,391
τ_3	0,800	0,050	0,588	0,200	0,950	0,412
Примечание – По результатам обучающего эксперимента для наработки $t_n = 15\ 000$ ч $P(K_1) = 0,564$; $P(K_0) = 0,436$						

С помощью данных табл. 2 определены сочетания, построенные из кодовых сигналов τ_1 , τ_2 и τ_3 , отвечающие экземплярам класса K_1 (табл. 3). Сочетания, не приведенные в этой таблице, соответствуют прогнозу о принадлежности экземпляров к классу K_0 . Порогом разделения классов является значение $F = 0$, т. е. экземплярам класса K_1 должно соответствовать положительное значение частной информации.

Таблица 3. Прогнозирующее правило в виде логической таблицы для класса K_1
Table 3. Predictive rule as a logical table for class K_1

Сочетание τ_i Combination τ_i			Значение F , подсчитанное по выражению (3), дв. ед. F value calculated by expression (3), binary unit	Сочетание τ_i Combination τ_i			Значение F , подсчитанное по выражению (3), дв. ед. F value calculated by expression (3), binary unit
τ_1	τ_2	τ_3		τ_1	τ_2	τ_3	
1	1	1	5,141	1	R	R	2,154
1	1	R	3,654	R	R	R	0,803
1	R	1	3,641	1	1	0	1,494
R	1	1	3,790	1	0	1	0,418
R	R	1	2,290	0	1	1	0,889
R	1	R	2,303	–	–	–	–

В табл. 4 приводится сравнение достоверности прогнозирования класса экземпляров обучающей выборки для двух случаев преобразования информативных параметров: преобразование в двоичный код [3, 4]; преобразование в троичный код по условиям (1) и (2), предложенным для новой эвристической модели прогнозирования. При этом в первом и во втором случаях использованы одни и те же информативные параметры. Для оценки достоверности прогнозирования выбрана вероятность принятия правильных решений $P_{\text{прав}}$ с учетом всех экземпляров выборки и вероятность правильных прогнозов для экземпляров класса K_1 (обозначена через $P(K_1|n_1)$), где n_1 – количество в обучающей выборке экземпляров класса K_1 .

Таблица 4. Сравнение моделей прогнозирования
Table 4. Comparison of the forecasting models

Модель прогнозирования Forecasting model	С использованием двоичного кода Using the binary code	С учетом трех областей изменения информативного параметра Taking into account three areas of the informative parameter change
Кодовые сигналы (код), получаемые от преобразования информативных параметров	1 и 0	1, 0, R
Вероятность $P_{\text{прав}}$	0,81	0,90
Вероятность $P(K_1 n_1)$	0,87	0,93

Предлагаемая эвристическая модель прогнозирования отличается от модели, получаемой базовым методом пороговой логики, способом преобразования информативных параметров в кодовые сигналы и обеспечивает, как видно из табл. 4, более высокую достоверность прогнозирования.

Заключение

На примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А установлены закономерности электрических параметров, используемых в качестве информативных в задачах индивидуального прогнозирования класса экземпляров с точки зрения их работоспособности на интересующее время работы (заданную наработку). На основе закономерностей предложена эвристическая модель прогнозирования работоспособности, включающая новый способ преобразования информативных параметров в кодовые сигналы, и алгоритм определения прогнозирующей функции с учетом полученных кодовых сигналов. Для применения на практике эта модель может быть представлена логической таблицей, показывающей, каким комбинациям кодовых сигналов соответствуют экземпляры класса K_1 . Показано, что предложенная эвристическая модель прогнозирования обеспечивает лучшие результаты прогнозирования, нежели базовый метод пороговой логики, практически сохраняя его простоту.

Список литературы

1. Боровиков С.М. *Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники*. Москва: Новое знание; 2013.
2. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Шнейдеров Е.Н., Бересневич А.И. *Прогнозирование надежности изделий электронной техники*. Минск: МГВРК; 2010.
3. Боровиков С.М., Бересневич А.И., Хмыль А.А., Емельянов А.В., Цырельчук И.Н. Метод прогнозирования надёжности изделий электронной техники. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2006;50(4):105-109.
4. Боровиков С.М., Бересневич А.И., Хмыль А.А., Емельянов А.В., Цырельчук И.Н. Прогнозирование надежности изделий электронной техники методом пороговой логики. *Доклады БГУИР*. 2006; 2(14): 49-56.
5. Robinson L.E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
6. Боровиков С.М., Казючиц В.О. Индивидуальное прогнозирование надежности транзисторов большой мощности для электронных устройств медицинского назначения. *Доклады БГУИР*. 2021; 19(1): 88-95.

References

1. Borovikov S.M. [Statistical forecasting for the rejection of potentially unreliable electronic products]. Moscow: New Knowledge; 2013. (In Russ.)
2. Borovikov S.M., Tsyrelchuk I.N., Shneiderov E.N., Beresnevich A.I. [Predicting the reliability of electronic products]. Minsk: MGVRK; 2010. (In Russ.)
3. Borovikov S.M., Beresnevich A.I., Khmyl A.A., Emelyanov A.V., Tsyrelchuk I.N. [Method for predicting the reliability of electronic products]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2006;50(4):105-109. (In Russ.)
4. Borovikov S.M., Beresnevich A.I., Khmyl A.A., Emelyanov A.V., Tsyrelchuk I.N. [Predicting the reliability of electronic products using the threshold logic method]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2006; 2(14): 49-56. (In Russ.)
5. Robinson L.E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
6. Borovikov S.M., Kazyuchicz V.O. [Individual prediction of the reliability of semiconductor devices for electronic devices of medical purposes]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;19(1):88-95. (In Russ.)

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.
All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Казючиц В.О., м.т.н., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Боровиков С.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шнейдеров Е.Н., к.т.н., доцент, проректор по учебной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kazyuchyts V.O., M.Sc., Ph.D. student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Borovikov S.M., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information and Computer Systems Design of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shneiderov E.N., Cand. of Sci., Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Боровиков Сергей Максимович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Borovikov Sergei Maksimovich