

3 Термины, определения и сокращения

3.1 В методике применены общие термины в области надёжности, определения которых установлены ГОСТ 27.002-2015, ГОСТ 27.003-90, ГОСТ Р 27.301-2011, а также и использованы следующие термины, относящиеся к электронным устройствам и прогнозированию надёжности полупроводниковых приборов с использованием информативных параметров:

3.1.1 **Электронное устройство (ЭУ)** – радиоэлектронное устройство по ГОСТ 26632-85, содержащее только электрорадиоизделия (ЭРИ) и несущие основания, служащие для установки ЭРИ и выполнения их электрического монтажа. ЭУ не содержит механических, оптических и гидравлических частей.

3.1.2 **Эксплуатационная безотказность** – безотказность изделия (полупроводникового прибора) с учётом эксплуатационных факторов: электрического режима в составе электронного устройства, условий эксплуатации, функциональных и других особенностей.

3.1.3. **Наработка** – по ГОСТ 27.002-2015 представляет собой продолжительность работы ППП (использования по функциональному назначению), выраженную в часах.

3.1.4 **Информативный параметр** – электрический параметр изделия электронной техники, в том числе полупроводникового прибора, интегральной микросхемы, значения которого в начальный момент времени несут информацию о надёжности (работоспособности) изделия в будущие моменты времени, т.е. для заданной наработки.

3.1.5 **Индивидуальное прогнозирование** надёжности или прогнозирование индивидуальной надёжности – метод прогнозирования, при котором у конкретного экземпляра измеряются информативные параметры, обрабатываются значения этих параметров и принимается решение об уровне надёжности этого же экземпляра.

3.1.5 **Класс работоспособности** экземпляров – дискретная оценка соответствия экземпляров требованию надёжности (работоспособности) изделий на интересующий будущий момент времени работы, т.е. для заданной наработки.

Примечание. Для практических применений интерес представляет разделение (классификация) изделий выборки на два класса с точки зрения работоспособности, обозначаемые как:

Класс K_1 – условное обозначение экземпляров, которые по результатам выполнения индивидуального прогнозирования соответствуют условию работоспособности ППП данного типа для заданной наработки;

Класс K_0 – условное обозначение экземпляров, которые по результатам выполнения индивидуального прогнозирования не соответствуют условию работоспособности ППП данного типа для заданной наработки.

3.1.6 **Обучающий эксперимент** – предварительные исследования экземпляров ППП данного типа с целью установления взаимосвязи между значениями информативных параметров в начальный момент времени и классом работоспособности экземпляров на момент окончания заданной наработки.

Примечание. Поскольку заданная наработка обычно составляет десятки тысяч часов, то для установления указанной взаимосвязи используют **ускоренные** (обычно форсирован-

ные) испытания, позволяющие за более короткое время, чем заданная наработка, получить примерно ту же информацию о работоспособности исследуемых экземпляров, что и в обычных (рабочих) условиях в течение заданной наработки.

3.1.7 Обучающая выборка – совокупность случайно отобранных экземпляров из партии однотипных изделий, используемых для проведения обучающего эксперимента.

3.1.8 Модель прогнозирования (прогнозирующее правило) символическая и/или словесная запись процедуры, показывающая, какие математические и/или логические операции надо выполнить со значениями информативных параметров конкретного экземпляра, полученными в начальный момент времени, и как по результатам этих операций принять решение (сделать прогноз) о классе работоспособности экземпляра для заданной наработки.

3.1.9 Эвристическая модель прогнозирования – модель прогнозирования, полученная не из строгих положений теории статистических решений, а основанная на предшествующем опыте решения задач прогнозирования с использованием информативных параметров.

3.2 В настоящей методике применяют следующие сокращения:

ИП – индивидуальное прогнозирование

ОТК – отдел технического контроля

ОЭ – обучающий эксперимент

ППП – полупроводниковый прибор

ТУ – технические условия

ЭУ – электронное устройство.

3.3 В настоящей методике для параметров, используемых для описания информативных параметров, промежуточных результатов их обработки, а также при получении модели прогнозирования, приняты обозначения, приведённые в таблице 1, кроме тех обозначений, которые поясняются в тексте в соответствующих местах методики.

Таблица 1 – Обозначения и пояснения параметров моделей и формул

Параметр	Пояснение
F	Прогнозирующая функция (общее обозначение)
$F^{(j)}$	Значение прогнозирующей функции, полученное для j -го экземпляра
k	Число используемых информативных параметров
L	Порог разделения классов в модели прогнозирования
m_1	Среднее значение (оценка математического ожидания) информативного параметра для экземпляров класса K_1 в обучающей выборке
m_0	Среднее значение (оценка математического ожидания) информативного параметра для экземпляров класса K_0 в обучающей выборке
$m_1(x_i)$	Математическое ожидание – центр класса K_1 для информативного параметра x_i ($i = 1, 2, \dots, k$)
$m_0(x_i)$	Математическое ожидание – центр класса K_0 для информативного параметра x_i ($i = 1, 2, \dots, k$)
n	Объём обучающей выборки
$n_1, n(K_1)$	Количество экземпляров класса K_1 в обучающей выборке

Продолжение таблицы

Параметр	Пояснение
$n_0, n(K_0)$	Количество экземпляров класса K_0 в обучающей выборке
$n_{1 \rightarrow 1}$	Количество в обучающей выборке экземпляров класса K_1 , правильно распознанных с помощью полученной модели прогнозирования
$n_{0 \rightarrow 0}$	Количество в обучающей выборке экземпляров класса K_0 , правильно распознанных с помощью полученной модели прогнозирования
$n(K_1 \tau_i = 1),$ $n(\tau_i = 1 K_1)$	Количество экземпляров класса K_1 в обучающей выборке, для которых по результатам преобразования код принял значение $\tau_i = 1$ и, что то же самое, число кодовых сигналов $\tau_i = 1$, полученных для экземпляров класса K_1
$n(K_1 \tau_i = 0),$ $n(\tau_i = 0 K_1)$	Количество экземпляров класса K_1 в обучающей выборке, для которых по результатам преобразования код принял значение $\tau_i = 0$ и, что то же самое, число кодовых сигналов $\tau_i = 0$, полученных для экземпляров класса K_1
$n(K_1 \tau_i = R),$ $n(\tau_i = R K_1)$	Количество экземпляров класса K_1 в обучающей выборке, для которых по результатам преобразования код принял значение $\tau_i = R$ и, что то же самое, число кодовых сигналов $\tau_i = R$, полученных для экземпляров класса K_1
$n(K_0 \tau_i = 1),$ $n(\tau_i = 1 K_0)$	Количество экземпляров класса K_0 в обучающей выборке, для которых по результатам преобразования код принял значение $\tau_i = 1$ и, что то же самое, число кодовых сигналов $\tau_i = 1$, полученных для экземпляров класса K_0
$n(K_0 \tau_i = 0),$ $n(\tau_i = 0 K_0)$	Количество экземпляров класса K_0 в обучающей выборке, для которых по результатам преобразования код принял значение $\tau_i = 0$ и, что то же самое, число кодовых сигналов $\tau_i = 0$, полученных для экземпляров класса K_0
$n(K_0 \tau_i = R),$ $n(\tau_i = R K_0)$	Количество экземпляров класса K_0 в обучающей выборке, для которых по результатам преобразования код принял значение $\tau_i = R$ и, что то же самое, число кодовых сигналов $\tau_i = R$, полученных для экземпляров класса K_0
$n(\tau_i = 1)$	Количество экземпляров в обучающей выборке, для которых по результатам преобразования код принял значение $\tau_i = 1$
$n(\tau_i = 0)$	Количество экземпляров в обучающей выборке, для которых по результатам преобразования код принял значение $\tau_i = 0$
$n(\tau_i = R)$	Количество экземпляров в обучающей выборке, для которых по результатам преобразования код принял значение $\tau_i = R$
$P(\tau_i^{(j)} K_1)$	Вероятность того, что для j -го экземпляра, принадлежащего к классу K_1 обучающей выборки, кодовый сигнал примет значение τ_i
$P(\tau_i^{(j)} K_0)$	Вероятность того, что для j -го экземпляра, принадлежащего к классу K_0 обучающей выборки, кодовый сигнал примет значение τ_i
τ	Кодовый сигнал (код), получаемый для информативного параметра (общее обозначение)
τ_i	Кодовый сигнал (код) i -го информативного параметра
$T^{(j)}$	Сочетание (комбинация) кодовых сигналов τ_i ($i = 1, 2, \dots, k$), полученное для j -го экземпляра; $T^{(j)} = \{ \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)} \}$
x_1, x_2, \dots, x_k	Информативные параметры ППП
Y	Электрический функциональный параметр, используемый в качестве критерия работоспособности ППП

4 Общие положения

4.1 Решение задачи ИП по информативным параметрам условно можно разбить на два этапа [1, 2]:

- получение модели прогнозирования с использованием обучающей выборки;
- применение модели прогнозирования для разделения на классы с точки зрения работоспособности тех экземпляров, которые не принимали участия в ОЭ, т.е. не являлись представителями обучающей выборки.

4.2 Получение модели прогнозирования предполагает следующие действия:

- уточнение электрических параметров, которые будут использоваться в качестве информативных;
- формирование обучающей выборки;
- измерение у каждого экземпляра обучающей выборки значений информативных параметров в начальный момент времени;
- проведение обучающего эксперимента в виде ускоренных испытаний на наработку экземпляров обучающей выборки в течение времени, эквивалентного заданной наработке с точки зрения надёжности;
- получение модели прогнозирования;
- проверка качества модели прогнозирования путём её применения к экземплярам обучающей выборки, действительный класс которых для заданной наработки нам известен по результатам ускоренных испытаний;
- ИП класса работоспособности новых однотипных экземпляров, т.е. экземпляров, не участвовавших в ОЭ.

4.3 С учётом этапов, указанных в п. 4.1, и действий, перечисленных в п. 4.2, процедура решения задач ИП ППП по значениям их информативных параметров может быть представлена схемой, показанной на рисунке 1.

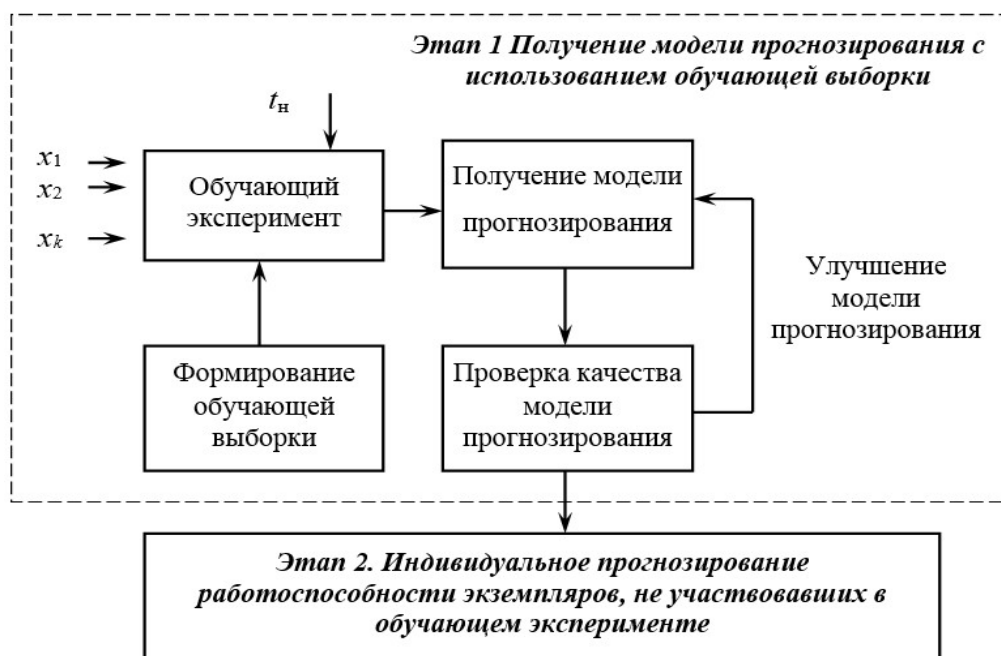


Рисунок 1 – Этапы решения задачи прогнозирования

Схема (см. рисунок 1) приведена в предположении, что известны информативные параметры x_1, x_2, \dots, x_k и уточнена интересующая наработка t_n .

5 Выбор информативных параметров

5.1 В случае, если информативные параметры ППП интересующего типа известны изначально, то рекомендуемое их число k выбирать от 2-х до 4-х.

5.2 Если информативные параметры заранее не известны, то следует определить 4...7 электрических параметров, предполагаемых на информативность и проводить ОЭ, измерив в начальный момент времени ($t \rightarrow 0$) у каждого экземпляра обучающей выборки значения этих электрических параметров.

Примечание. Перед выполнением измерения параметров экземпляры обучающей выборки следует пронумеровать, но таким способом, чтобы нумерацию можно было идентифицировать после завершения высокотемпературных ускоренных испытаний.

5.3 После завершения ускоренных испытаний, используя результаты ОЭ, выполняется анализ степени информативности рассматриваемых электрических параметров методом корреляционного анализа. Суть анализа [1, 2]: определяются коэффициенты парной корреляции между параметром, предполагаемым на информативность, и номером класса экземпляра на момент окончания ускоренных испытаний. Критерий выбора параметров, используемых в качестве информативных – максимальное значение модуля коэффициента парной линейной корреляции параметра с номером класса экземпляра на момент окончания испытаний.

6 Формирование обучающей выборки

6.1 В качестве экземпляров обучающей выборки следует брать экземпляры из одной партии ППП данного типа, причём из той, применительно к которой в дальнейшем будет выполняться ИП с распознаванием класса работоспособности экземпляров для заданной наработки t_n .

6.2 При отсутствии технических проблем в части постановки и проведения на имеющемся экспериментальном оборудовании высокотемпературных испытаний с приложением к ППП рабочего напряжения объём обучающей выборки n выбирают из условия $n \geq 100$ экземпляров.

6.3 Последовательность определения объёма обучающей выборки в случаях, отличных от указанных в п. 6.2:

6.3.1 Рассчитывается ожидаемый коэффициент ускорения испытаний $K_y^{(T)}$ за счёт высокой температуры T , используя формулы

$$q = 0,085 \left[T_y - \left(55 + K_n P_{\max} R_{\text{кр-корп}} \right) \right], \quad (1)$$

$$K_y^{(T)} = 2^q, \quad (2)$$

где T_y – температура ускоренных испытаний, по умолчанию принимается, равной $+150^\circ\text{C}$; K_n – коэффициент электрической нагрузки по мощности, по умолчанию принимается $K_n \leq 0,5$; P_{\max} – максимальная допустимая рассеиваемая мощность по ТУ; $R_{\text{кр-корп}}$ – тепловое сопротивление кристалл-корпус ППП, указанное в ТУ.

6.3.2 Определяется ожидаемый коэффициент ускорения испытаний $K_y^{(U)}$ за счёт повышенного рабочего напряжения на ППП

$$K_y^{(U)} = \exp[\beta (U_y - U_{\text{раб}})], \quad (3)$$

где β – коэффициент, зависящий от конструкции и материала ППП, по умолчанию для ППП большой мощности биполярной структуры принимается $\beta = 0,00443 \text{ 1/V}$ [4, 5]; U_y – рабочее напряжение, прикладываемое к ППП при ускоренных испытаниях; $U_{\text{раб}}$ – рабочее напряжение в предполагаемом режиме использования в ЭУ, по умолчанию принимается: $U_{\text{раб}} \leq 0,7 \cdot U_{\text{max}}$, где U_{max} – максимально допустимое напряжение по ТУ.

6.3.3 Оценивается ожидаемая доля отказавших экземпляров D при ускоренных испытаниях, используя формулу

$$D = 1 - \exp(-\lambda_{\text{ТУ}} \cdot t_{\text{н}} \cdot K_y^{(T)} \cdot K_y^{(U)}), \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{ТУ}}$, $t_{\text{н}}$ – соответственно интенсивность отказов и наработка, указанные в ТУ.

6.3.4 Выбирается объём обучающей выборки n , используя алгоритм:

$$\left. \begin{array}{l} n = 50, \text{ если } 15 \leq 50 \cdot D \leq 35, \\ n = 100 \text{ в других случаях.} \end{array} \right\} \quad (5)$$

7 Проведение обучающего эксперимента

7.1 Общие сведения об обучающем эксперименте

7.1.1 Цель обучающего эксперимента – установление взаимосвязи между значениями информативных параметров в начальный момент времени ($t \rightarrow 0$) и номером класса экземпляра (K_1 или K_0) для заданной наработки $t_{\text{н}}$ [1–3].

7.1.2 Результаты обучающего эксперимента в виде таблицы 2 служат основой для получения прогнозирующего правила.

Таблица 2 – Форма представления результатов обучающего эксперимента

Номер экземпляра обучающей выборки	Значения информативных параметров при $t = 0$				Начальное значение электрического функционального параметра Y – критерия годности ППП	Класс экземпляра K_S для наработки $t_{\text{н}}$ $S = 1$ или $S = 0$
	x_1	x_2	...	x_k		
1	$x_1^{(1)}$	$x_2^{(1)}$		$x_k^{(1)}$	$Y^{(1)}$	$K_S^{(1)}$
2	$x_1^{(2)}$	$x_2^{(2)}$		$x_k^{(2)}$	$Y^{(2)}$	$K_S^{(2)}$
...
n	$x_1^{(n)}$	$x_2^{(n)}$		$x_k^{(n)}$	$Y^{(n)}$	$K_S^{(n)}$

Данные таблицы 2 в неявном виде показывают взаимосвязь между значениями информативных параметров x_1, x_2, \dots, x_k , полученными путём измерения в момент времени $t = 0$, и уровнем надёжности экземпляра в виде класса работоспособности для наработки $t_{\text{н}}$.

7.2 Последовательность проведения обучающего эксперимента

7.2.1 Нумеруются экземпляры обучающей выборки. Способ нумерации должен быть таким, чтобы на момент окончания высокотемпературных испытаний идентификация номеров не вызывала проблем.

7.2.2 Перед началом проведения ускоренных испытаний у каждого экземпляра обучающей выборки измеряются значения информативных параметров x_1, x_2, \dots, x_k и электрического функционального параметра Y , рассматриваемого в качестве критерия работоспособности ППП. Результаты измерений заносятся в таблицу 2 (столбцы со значениями x_1, x_2, \dots, x_k и значением Y).

Примечания. 1. Если информативные параметры изначально не известны, то выполняются измерения электрических параметров, предполагаемых на информативность. Число таких электрических параметров должно быть не более 7...10.

2. В качестве электрического функционального параметра Y – критерия работоспособности ППП для биполярных транзисторов большой мощности рекомендуется выбирать: для режима переключения – напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$, для других режимов работы – статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$.

3. Электрический функциональный параметр Y , являющийся критерием работоспособности ППП, может одновременно использоваться также в качестве информативного параметра, наряду с другими электрическими параметрами.

7.2.3 Экземпляры обучающей выборки ставятся на ускоренные высокотемпературные испытания в течение времени испытаний t_y , эквивалентному с точки зрения надёжности наработке t_n в обычном рабочем режиме ППП.

С порядком выбора режима и определением времени проведения ускоренных испытаний можно ознакомиться в разделе «12 Пример применения методики» и в технической литературе [6–9].

7.2.4 По истечении времени ускоренных испытаний t_y выполняется контроль работоспособности каждого экземпляра обучающей выборки. Экземпляры, у которых не возник внезапный отказ и электрический функциональный параметр Y изменился не более чем на $\pm 20\%$ от его начального значения следует считать представителями класса K_1 , при наличии внезапного отказа или изменении Y более, чем на $\pm 20\%$ – представителями класса K_0 .

8 Получение модели прогнозирования класса работоспособности

8.1 Принцип получения модели прогнозирования

8.1.1 Для получения модели прогнозирования класса работоспособности экземпляров используются результаты ОЭ, показанные ранее в таблице 2.

8.1.2 Для удобства получения модели прогнозирования информативные параметры x_i ($i = 1, 2, \dots, k$) для времени $t = 0$, приведённые в таблице 2, вначале рекомендуется сгруппировать отдельно по классам K_1 и K_0 , как показано в таблице 3. При этом столбец таблицы 2, содержащий начальные значения электрического функционального параметра Y – критерия годности ППП, в таблицу 3 включать не следует.

Таблица 3 – Результаты ОЭ, сгруппированные по классам

Номер экземпляра	Значения информативных параметров при $t = 0$				Номер класса экземпляра для наработки t_n
	x_1	x_2	...	x_k	
1	$(x_1)_{(1, K_1)}$	$(x_2)_{(1, K_1)}$		$(x_k)_{(1, K_1)}$	1
2	$(x_1)_{(2, K_1)}$	$(x_2)_{(2, K_1)}$		$(x_k)_{(2, K_1)}$	1
...
n_1	$(x_1)_{(n_1, K_1)}$	$(x_2)_{(n_1, K_1)}$		$(x_k)_{(n_1, K_1)}$	1
1	$(x_1)_{(1, K_0)}$	$(x_2)_{(1, K_0)}$		$(x_k)_{(1, K_0)}$	0
2	$(x_1)_{(2, K_0)}$	$(x_2)_{(2, K_0)}$		$(x_k)_{(2, K_0)}$	0
...
n_0	$(x_1)_{(n_0, K_0)}$	$(x_2)_{(n_0, K_0)}$		$(x_k)_{(n_0, K_0)}$	0

В дальнейшем учёт номеров экземпляров для каждого класса ведётся отдельно: от 1 до n_1 – для экземпляров класса K_1 и от 1 до n_0 – для экземпляров класса K_0 , поэтому для столбца «Номер экземпляра» таблицы 3 должно выполняться условие

$$n_1 + n_0 = n. \quad (6)$$

8.1.3 Значения информативных параметров, представленные в таблице 3, преобразуются в кодовые сигналы: 1 (единица), 0 (ноль) и R . Преобразование в код поясняется рисунком 2 на примере электрического параметра $U_{KЭ\text{нас}}$ [10].

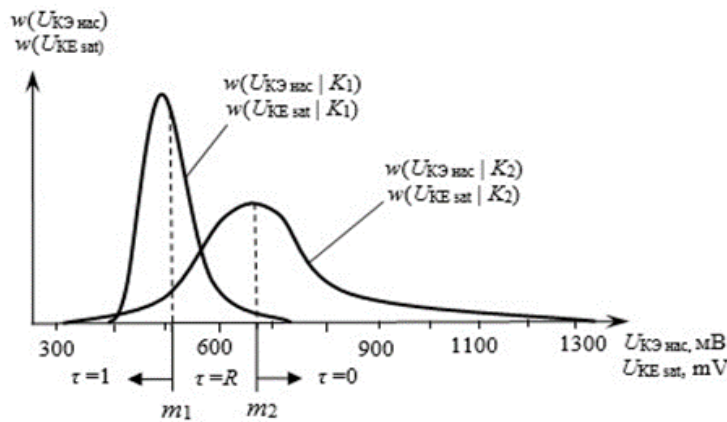


Рисунок 2 – Преобразование информативного параметра в код (на примере электрического параметра $U_{KЭ\text{нас}}$)

Если информативный параметр x_i попадает в область между средними значениями (математическими ожиданиями) m_1 и m_0 , полученными отдельно для экземпляров классов K_1 и K_0 , то ему присваивается код $\tau_i = R$ (от английского слова Range – диапазон). Областям за пределами указанного диапазона присваивается код $\tau_i = 1$ (единица) или $\tau_i = 0$ (ноль) в зависимости от закономерности информативного параметра. Причём преобразование выполняется так, что код $\tau = 1$ в основном будет соответствовать экземплярам класса K_1 , код $\tau = 0$ – экземплярам класса K_0 .

8.1.4 Основу модели прогнозирования класса экземпляра составляет прогнозирующая функция $F^{(j)}$.

При определении прогнозирующей функции $F^{(j)}$ для j -го экземпляра учитывается «частная информация о классе K_1 и классе K_0 , содержащаяся в сообщении о том, что набор кодовых сигналов (из числа $\tau_i = 1; 0$ или R) для j -го экземпляра принял конкретные значения $T^{(j)} = \{\tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)}\}$ ». Причём для экземпляров класса K_1 определяемая частная информация о классе K_1 будет в основном принимать положительные значения, а о классе K_0 – в основном отрицательные значения. Для экземпляров класса K_0 частная информация о классе K_0 будет в основном положительной, а о классе K_1 – в основном отрицательной.

8.1.5 Модель прогнозирования класса экземпляра получают в виде [1–3]

$$\begin{aligned} j \in K_1, \text{ если } F^{(j)} \geq L, \\ j \in K_0, \text{ если } F^{(j)} < L, \end{aligned} \quad (7)$$

где j означает конкретный экземпляр; L – порог разделения классов.

С учётом знаков частной информации теоретическим порогом разделения классов в модели прогнозирования (7) является значение $L = 0$.

8.1.6 Вероятности, необходимые для подсчёта частной информации, оцениваются по результатам ОЭ.

8.2 Последовательность получения модели прогнозирования

8.2.1 Пользуясь таблицей 3, для каждого информативного параметра x_i определяется среднее значение m_1 для экземпляров класса K_1 и среднее значение m_0 для экземпляров класса K_0 . Рассчитанные значения m_1 и m_0 в дальнейшем будут рассматриваться в качестве центров классов:

- $m_1(x_i)$ – центр класса K_1 для x_i , $i = 1, 2, \dots, k$;
- $m_0(x_i)$ – центр класса K_0 для x_i , $i = 1, 2, \dots, k$.

Формулы, используемые для подсчёта средних значений m_1 и m_0 , соответствующих экземплярам классов K_1 и K_0 , пояснение значений информативного параметра x_i , используемых в этих формулах, приводятся в таблице 4.

Таблица 4 – Определение средних значений информативных параметров для классов K_1 и K_0

Обозначение	Пояснение	Формула расчёта	Номер
$m_1(x_i)$	Среднее значение (математическое ожидание) i -го информативного параметра, соответствующее экземплярам класса K_1 (центр класса K_1)	$m_1(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^{n_1} (x_i)_{j,K1}}{n_1}$	(8)
$m_0(x_i)$	Среднее значение (математическое ожидание) i -го информативного параметра, соответствующее экземплярам класса K_0 (центр класса K_0)	$m_0(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^{n_0} (x_i)_{j,K0}}{n_0}$	(9)
$(x_i)_{j,K1}$	Значение i -го информативного параметра для j -го экземпляра, принадлежащего к классу K_1	—	—
$(x_i)_{j,K0}$	Значение i -го информативного параметра для j -го экземпляра, принадлежащего к классу K_0	—	—

8.2.2 Полученные по формулам (8) и (9) центры классов K_1 и K_0 для каждого информативного параметра x_i заносятся в таблицу 5.

Таблица 5 – Центры классов K_1 и K_0 , найденные по результатам ОЭ

Искомая характеристика	Информативный параметр x_i			
	x_1	x_2	...	x_k
Центр класса K_1 : $m_1(x_i)$	$m_1(x_1)$	$m_1(x_2)$...	$m_1(x_k)$
Центр класса K_0 : $m_0(x_i)$	$m_0(x_1)$	$m_0(x_2)$...	$m_0(x_k)$

8.2.3 Значения информативных параметров x_i , представленные в таблице 3, с учётом центров классов (см. таблицу 5) преобразовываются в код τ_i ($i = 1, 2, \dots, k$), используя следующий алгоритм:

$$\left. \begin{array}{l} \tau_i = 1, \text{ если } x_i > m_1, \\ \tau_i = 0, \text{ если } x_i < m_0, \\ \tau_i = R, \text{ если } m_0 \leq x_i \leq m_1, \end{array} \right\} \quad \text{при } m_1 > m_0, \quad (10)$$

$$\left. \begin{array}{l} \tau_i = 1, \text{ если } x_i < m_1, \\ \tau_i = 0, \text{ если } x_i > m_0, \\ \tau_i = R, \text{ если } m_1 \leq x_i \leq m_0. \end{array} \right\} \quad \text{при } m_1 < m_0. \quad (11)$$

В условиях (10) и (11) для краткости записи использовано обозначение $m_1 = m_1(x_i)$, $m_0 = m_0(x_i)$.

8.2.4 Выполнив по условиям (10) и (11) преобразование информативных параметров x_i в код (1; 0 или R), таблица 3 трансформируется в таблицу 6, в которой информативные параметры x_i представлены их кодом τ_i ($i = 1, 2, \dots, k$).

Таблица 6 – Результат преобразования информативных параметров в коды

Номер экземпляра обучающей выборки	Кодовый сигнал τ_i (для $t = 0$), $\tau_i = 1; 0; R$				Номер класса экземпляра S для наработки t_n (1 или 0)
	τ_1	τ_2	...	τ_k	
1	$\tau_1^{(1)}$	$\tau_2^{(1)}$		$\tau_k^{(1)}$	1
2	$\tau_1^{(2)}$	$\tau_2^{(2)}$		$\tau_k^{(2)}$	1
...
n_1	$\tau_1^{(n1)}$	$\tau_2^{(n1)}$		$\tau_k^{(n1)}$	1
1	$\tau_1^{(1)}$	$\tau_2^{(1)}$		$\tau_k^{(1)}$	0
2	$\tau_1^{(2)}$	$\tau_2^{(2)}$		$\tau_k^{(2)}$	0
...
n_0	$\tau_1^{(n0)}$	$\tau_2^{(n0)}$		$\tau_k^{(n0)}$	0

Примечания: 1. Кодовые сигналы $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ принимают значения либо 1, либо 0, либо R .
2. Верхний индекс, записанный для $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ указывает номер экземпляра для соответствующего класса.

8.2.5 Используя данные таблицы 6, определяются оценки вероятностей (далее, просто вероятностей), указанные в таблице 7.

Таблица 7 – Вероятности, определяемые с использованием данных таблицы 6

Обозначение вероятности	Смысл, пояснение	Формула определения	Номер формулы
$P(K_1 \tau_i = 1)$	Вероятность принадлежности экземпляра к классу K_1 при условии, что кодовый сигнал принял значение $\tau_i = 1$	$P(K_1 \tau_i = 1) = \frac{n(K_1 \tau_i = 1)}{n(\tau_i = 1)}$	(12)
$P(K_1 \tau_i = 0)$	Вероятность принадлежности экземпляра к классу K_1 при условии, что кодовый сигнал принял значение $\tau_i = 0$	$P(K_1 \tau_i = 0) = \frac{n(K_1 \tau_i = 0)}{n(\tau_i = 0)}$	(13)
$P(K_1 \tau_i = R)$	Вероятность принадлежности экземпляра к классу K_1 при условии, что кодовый сигнал принял значение $\tau_i = R$	$P(K_1 \tau_i = R) = \frac{n(K_1 \tau_i = R)}{n(\tau_i = R)}$	(14)
$P(K_0 \tau_i = 1)$	Вероятность принадлежности экземпляра к классу K_0 при условии, что кодовый сигнал принял значение $\tau_i = 1$	$P(K_0 \tau_i = 1) = \frac{n(K_0 \tau_i = 1)}{n(\tau_i = 1)}$	(15)
$P(K_0 \tau_i = 0)$	Вероятность принадлежности экземпляра к классу K_0 при условии, что кодовый сигнал принял значение $\tau_i = 0$	$P(K_0 \tau_i = 0) = \frac{n(K_0 \tau_i = 0)}{n(\tau_i = 0)}$	(16)
$P(K_0 \tau_i = R)$	Вероятность принадлежности экземпляра к классу K_0 при условии, что кодовый сигнал принял значение $\tau_i = R$	$P(K_0 \tau_i = R) = \frac{n(K_0 \tau_i = R)}{n(\tau_i = R)}$	(17)
$p(\tau_i = 1)$	Вероятность того, что по результатам преобразования i -го информативного параметра в код, сигнал τ_i примет значение 1	$p(\tau_i = 1) = \frac{n(\tau_i = 1)}{n}$	(18)
$p(\tau_i = 0)$	Вероятность того, что по результатам преобразования i -го информативного параметра в код, сигнал τ_i примет значение 0	$p(\tau_i = 0) = \frac{n(\tau_i = 0)}{n}$	(19)
$p(\tau_i = R)$	Вероятность того, что по результатам преобразования i -го информативного параметра в код, сигнал τ_i примет значение R	$p(\tau_i = R) = \frac{n(\tau_i = R)}{n}$	(20)
$P(\tau_i = 1 K_1)$	Вероятность того, что кодовый сигнал τ_i с использованием выражений (10) или (11) примет значение $\tau_i = 1$ при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_1	$P(\tau_i = 1 K_1) = \frac{n(\tau_i = 1 K_1)}{n(K_1)}$	(21)
$P(\tau_i = 0 K_1)$	Вероятность того, что кодовый сигнал τ_i с использованием выражений (10) или (11) примет значение $\tau_i = 0$ при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_1	$P(\tau_i = 0 K_1) = \frac{n(\tau_i = 0 K_1)}{n(K_1)}$	(22)
$P(\tau_i = R K_1)$	Вероятность того, что кодовый сигнал τ_i с использованием выражений (10) или (11) примет значение $\tau_i = R$ при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_1	$P(\tau_i = R K_1) = \frac{n(\tau_i = R K_1)}{n(K_1)}$	(23)
$P(\tau_i = 1 K_0)$	Вероятность того, что кодовый сигнал τ_i с использованием выражений (10) или (11) примет значение $\tau_i = 1$ при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_0	$P(\tau_i = 1 K_0) = \frac{n(\tau_i = 1 K_0)}{n(K_0)}$	(24)
$P(\tau_i = 0 K_0)$	Вероятность того, что кодовый сигнал τ_i с использованием выражений (10) или (11) примет значение $\tau_i = 0$ при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_0	$P(\tau_i = 0 K_0) = \frac{n(\tau_i = 0 K_0)}{n(K_0)}$	(25)
$P(\tau_i = R K_0)$	Вероятность того, что кодовый сигнал τ_i с использованием выражений (10) или (11) примет значение $\tau_i = R$ при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_0	$P(\tau_i = R K_0) = \frac{n(\tau_i = R K_0)}{n(K_0)}$	(26)
$P(K_1)$	Начальная вероятность класса K_1	$P(K_1) = \frac{n(K_1)}{n}$	(27)
$P(K_0)$	Начальная вероятность класса K_0	$P(K_0) = \frac{n(K_0)}{n}$	(28)

8.2.6 Используя значения вероятностей, указанные в таблице 7, рассчитываются по формулам таблицы 8 значения частной информации о классе K_1 и о классе K_0 , содержащейся в сообщении о том, что для j -го экземпляра получен конкретный набор кодовых сигналов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$. В этой же таблице приводятся пояснения и формулы расчёта вероятностей $P(K_1|T^{(j)})$ и $P(K_0|T^{(j)})$, входящих в выражения расчёта частной информации [11].

Таблица 8 – Определение частной информации

Обозначение	Пояснение	Формула определения	Номер формулы
$I(T^{(j)} \rightarrow K_1)$	Частная информация о классе K_1 , содержащаяся в сообщении о том, что кодовые сигналы (из числа $\tau_i = 1; 0$ и R) для j -го экземпляра приняли значения $T^{(j)} = \{ \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)} \}$	$I(T^{(j)} \rightarrow K_1) = \log_2 \left[\frac{P(K_1 T^{(j)})}{P(K_1)} \right]$	(29)
$I(T^{(j)} \rightarrow K_0)$	Частная информация о классе K_0 , содержащаяся в сообщении о том, что кодовые сигналы (из числа $\tau_i = 1; 0$ и R) для j -го экземпляра приняли значения $T^{(j)} = \{ \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)} \}$	$I(T^{(j)} \rightarrow K_0) = \log_2 \left[\frac{P(K_0 T^{(j)})}{P(K_0)} \right]$	(30)
$P(K_1 T^{(j)})$	Вероятность принадлежности j -го экземпляра к классу K_1 при условии, что по результатам преобразования информативных параметров $x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ этого экземпляра в кодовые сигналы по условиям (10) или (11), получен конкретный набор кодированных сигналов $T^{(j)} = \{ \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)} \}$	$P(K_1 T^{(j)}) = \frac{P(K_1)P(T^{(j)} K_1)}{P(K_1)P(T^{(j)} K_1) + P(K_0)P(T^{(j)} K_0)}$	(31)
$P(K_0 T^{(j)})$	Вероятность принадлежности j -го экземпляра к классу K_0 при условии, что по результатам преобразования информативных параметров $x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ этого экземпляра в кодовые сигналы по условиям (10) или (11), получен конкретный набор кодированных сигналов $T^{(j)} = \{ \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)} \}$	$P(K_0 T^{(j)}) = \frac{P(K_0)P(T^{(j)} K_0)}{P(K_1)P(T^{(j)} K_1) + P(K_0)P(T^{(j)} K_0)}$	(32)
$P(T^{(j)} K_1)$	Вероятность того, что j -й экземпляр, принадлежащий к классу K_1 , будет иметь набор кодовых сигналов $T^{(j)} = \{ \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)} \}$	$P(T^{(j)} K_1) = \prod_{i=1}^k P(\tau_i^{(j)} K_1)$	(33)
$P(T^{(j)} K_0)$	Вероятность того, что j -й экземпляр, принадлежащий к классу K_0 , будет иметь набор кодовых сигналов $T^{(j)} = \{ \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)} \}$	$P(T^{(j)} K_0) = \prod_{i=1}^k P(\tau_i^{(j)} K_0)$	(34)

8.2.7 Принимая во внимание значения частной информации о классе K_1 и о классе K_0 , полученные по формулам (29) и (30) для j -го экземпляра, подсчитывается для этого же экземпляра значение прогнозирующей функции $F^{(j)}$, используя выражение

$$F^{(j)} = I(T^{(j)} \rightarrow K_1) - I(T^{(j)} \rightarrow K_0) = \log_2 \left[\frac{P(K_1|T^{(j)})}{P(K_1)} \right] - \log_2 \left[\frac{P(K_0|T^{(j)})}{P(K_0)} \right]. \quad (35)$$

Прогнозирующая функция $F^{(j)}$, определяемая по выражению (35), сформирована таким образом, что для экземпляров класса K_1 она принимает в основном положительные значения, а для экземпляров класса K_0 – в основном отрицательные значения, т.е. порогом разделения классов в модели прогнозирования (7) является значение $L = 0$.

9 Представление модели прогнозирования логической таблицей

9.1 Для удобства использования на практике и с целью исключения необходимости выполнения расчётов по определению значения прогнозирующей функции F , соответствующей новому одностипному экземпляру (будем называть его l -м экземпляром), модель прогнозирования вида (7) рекомендуется представлять логической таблицей, показывающей, каким комбинациям кодовых сигналов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ должен соответствовать прогноз о принадлежности l -го экземпляра, например к классу K_1 или же к классу K_0 в зависимости от цели прогнозирования.

Возможный вид логической таблицы для экземпляров класса K_1 на примере использования трёх информативных параметров показан на рисунке 3.

Сочетание τ_i			Значение F , подсчитанное по выражению (35), дв. ед.	Сочетание τ_i			Значение F , подсчитанное по выражению (35), дв. ед.
τ_1	τ_2	τ_3		τ_1	τ_2	τ_3	
1	1	1	$F = \dots (F \geq 0)$	1	R	R	$F = \dots (F \geq 0)$
1	1	R	$F = \dots (F \geq 0)$	R	R	R	$F = \dots (F \geq 0)$
1	R	1	$F = \dots (F \geq 0)$	1	1	0	$F = \dots (F \geq 0)$
R	1	1	$F = \dots (F \geq 0)$	1	0	1	$F = \dots (F \geq 0)$
R	R	1	$F = \dots (F \geq 0)$	0	1	1	$F = \dots (F \geq 0)$
R	1	R	$F = \dots (F \geq 0)$	–	–	–	–

Рисунок 3 – Модель прогнозирования в виде логической таблицы для класса K_1

В логической таблице (см. рисунок 3) столбец «Значение F , подсчитанное по выражению (35), дв. ед.», является справочным. В логических таблицах, используемых для определения класса экземпляра для заданной наработки, он может не приводиться.

9.2 Для представления модели прогнозирования (7) логической таблицей вида рисунка 3, соответствующей классу K_1 , необходимо для всевозможных сочетаний кодовых сигналов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ подсчитать по выражению (35) значения

прогнозирующей функции F и включить в логическую таблицу те сочетания кодов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$, для которых значение $F \geq 0$, т.е. это будут те сочетания кодов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$, для которых разность между частной информацией о классе K_1 и частной информацией о классе K_0 будет положительной или равной нулю.

10 Проверка качества модели прогнозирования

10.1 Качество модели прогнозирования проверяется путём её применения к экземплярам обучающей выборки, действительный класс которых для заданной наработки нам известен по результатам ускоренных испытаний (см. таблицу 3, в которой экземпляры обучающей выборки сгруппированы по классам K_1 и K_0).

10.2 Пользуясь логической таблицей, построенной, например для класса K_1 , определяется класс по прогнозу экземпляров обучающей выборки (класс K_1 или класс K_0).

10.3 Подсчитывается количество правильно распознанных по прогнозу экземпляров в классе K_1 (обозначено через $n_{1 \rightarrow 1}$) и классе K_0 (обозначено через $n_{0 \rightarrow 0}$).

10.4 Определяются важнейшие характеристики качества прогнозирования по следующим формулам [1–3]:

- вероятность принятия правильных решений по прогнозу $P_{\text{прав}}$ для всей обучающей выборки:

$$P_{\text{прав}} = \frac{n_{1 \rightarrow 1} + n_{0 \rightarrow 0}}{n} ; \quad (36)$$

- вероятность принятия по прогнозу ошибочных решений $P_{\text{ош}}$ для всей обучающей выборки:

$$P_{\text{ош}} = 1 - P_{\text{прав}} = \frac{(n_1 - n_{1 \rightarrow 1}) + (n_0 - n_{0 \rightarrow 0})}{n} ; \quad (37)$$

- вероятность правильного прогноза экземпляров класса K_1 — $P_{\text{прав}}(K_1)$:

$$P_{\text{прав}}(K_1) = \frac{n_{1 \rightarrow 1}}{n_1} ; \quad (38)$$

- вероятность правильного прогноза экземпляров класса K_0 — $P_{\text{прав}}(K_0)$:

$$P_{\text{прав}}(K_0) = \frac{n_{0 \rightarrow 0}}{n_0} ; \quad (39)$$

- риск потребителя $P_{\text{потреб}}$:

$$P_{\text{потреб}} = \frac{n_0 - n_{0 \rightarrow 0}}{n_{1 \rightarrow 1} + (n_0 - n_{0 \rightarrow 0})} ; \quad (40)$$

- риск изготовителя $P_{\text{изгот}}$:

$$P_{\text{изгот}} = \frac{n_1 - n_{1 \rightarrow 1}}{n_{0 \rightarrow 0} + (n_1 - n_{1 \rightarrow 1})} . \quad (41)$$

10.5 Если характеристики, подсчитанные в п. 10.4 отвечают требованиям, то построенной логической таблицей можно пользоваться для ИП новых

однотипных экземпляров. Под «новыми» понимают однотипные экземпляры, которые не принимали участия в ОЭ.

10.6 При несоответствии интересующей характеристики заданному требованию рекомендуется в модели прогнозирования (7) сместить порог разделения классов L влево или вправо от нуля и найти такое значение $L_{\text{опт}}$, при котором интересующая характеристика качества прогнозирования будет отвечать заданному требованию.

10.7 Строится логическая таблица для модели прогнозирования (7), в которой в качестве порога разделения классов L используется значение $L_{\text{опт}}$.

11 Прогнозирование класса работоспособности новых однотипных экземпляров

11.1 Для ИП класса работоспособности новых однотипных экземпляров используются:

- модель прогнозирования в виде логической таблицы для экземпляров класса K_1 (см. рисунок 3);
- таблица с указанием центров классов K_1 и K_0 , (средних значений m_1 и m_0), найденных по результатам ОЭ;
- алгоритм (условия) преобразования значений информативных параметров в кодовые сигналы 1, 0 и R (см. выражения (10) и (11) в п. 8.2.3).

11.2 Порядок ИП класса работоспособности нового однотипного экземпляра (обозначен как l -й экземпляр):

- с помощью специализированного оборудования или устройств измерить значения информативных параметров l -го экземпляра $x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_k^{(l)}$;
- преобразовать полученные значения $x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_k^{(l)}$ в кодовые сигналы $\tau_1^{(l)}, \tau_2^{(l)}, \dots, \tau_k^{(l)}$, используя условие либо (10), либо (11) в зависимости от расположения центров классов для информативного параметра x_i ($i = 1, 2, \dots, k$);
- уточнить, присутствует ли сочетание кодовых сигналов l -го экземпляра $\tau_1^{(l)}, \tau_2^{(l)}, \dots, \tau_k^{(l)}$ в логической таблице:

а) если присутствует, то принимается решение о принадлежности l -го экземпляра к классу K_1 для заданной наработки t_n ;

б) если отсутствует, то принимается решение о принадлежности l -го экземпляра к классу K_0 для заданной наработки t_n .

11.3 В п. 11.2 описан параллельный принцип анализа: измерение всех информативных параметров $x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_k^{(l)} \rightarrow$ преобразования $x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_k^{(l)}$ в кодовые сигналы $\tau_1^{(l)}, \tau_2^{(l)}, \dots, \tau_k^{(l)} \rightarrow$ поиск сочетания $\tau_1^{(l)}, \tau_2^{(l)}, \dots, \tau_k^{(l)}$ в логической таблице.

В ряде случаев по результатам преобразования достаточно получить два-три кодовых сигнала $\tau_i^{(l)} = 1$ и сразу можно принять решение о принадлежности l -го экземпляра к классу K_1 для заданной наработки t_n , независимо от кодовых сигналов для других оставшихся информативных параметров. Примером является рисунок 3, из которого видно, что достаточно получить два кодовых сигнала $\tau_i = 1$ и должно быть принято решение о принадлежности экземпляра к

классу K_1 , независимо от того, какой код будет получен для оставшегося третьего информативного параметра. В таких случаях более рациональным является последовательный способ работы с информативными параметрами: измерение $x_1 \rightarrow$ преобразование в τ_1 , измерение $x_2 \rightarrow$ преобразование в τ_2 , ...