# Проект методики прогнозирования параметрической надёжности выборок полупроводниковых приборов по моделям деградации электрических параметров с использованием алгоритмов машинного обучения

## 1 Область применения

Настоящий руководящий технический материал устанавливает порядок проведения обучающего эксперимента применительно к выборке однотипных ППП для получения математической модели деградации электрического параметра с использованием алгоритмов машинного обучения и прогнозирования с её помощью уровня параметрической надёжности новых выборок рассматриваемого типа ППП. Здесь и далее под новыми понимают такие выборки исследуемого типа ППП, экземпляры которых не принимали участия в обучающем эксперименте.

Прогнозирование надёжности новых выборок выполняют в начальный момент времени (*t* = 0). Прогноз получают в виде определения вероятности того, что для любого экземпляра выборки ППП функциональный параметр для заданной будущей наработки *t*з (нормированная наработка) будет находиться в пределах норм, записанных в технической документации на ППП рассматриваемого типа, или же в границах, указанных потребителем ППП.

**Обучающий эксперимент** представляет собой предварительные экспериментальные исследования определённой выборки ППП, называемой **обучающей выборкой**. Для рассматриваемого типа ППП эти исследования проводят один раз. Обучающая выборка предназначена исключительно для получения математической модели деградации функционального параметра. На момент окончания экспериментальных исследований рабочий ресурс экземпляров этой выборки значительно расходован, и поставка потребителю ППП этой выборки не должна проводиться.

Методика определяет порядок решения задачи прогнозирования уровня параметрической надёжности для заданной наработки выборок однотипных ППП после этапа их изготовления (получения готовой продукции).

Используя результаты прогнозирования, можно для выборок, взятых из готовой продукции, определить уровень их параметрической надёжности для нормированной наработки и поставлять эти выборки заинтересованным потребителям по специальным ценам.

## 2 Нормативные ссылки

В методике использованы ссылки на следующие нормативно-технические документы:

ГОСТ 27.002-89 [Д.2];

ОСТ 11.336.938-83 [Д.3];

РД 11 0755-90 [Д.4].

## 3 Термины, определения и сокращения

3.1 В методике применены общие термины в области надёжности, определения которых установлены ГОСТ 27.002-89. Дополнительно в методике использованы следующие термины и понятия, относящиеся к прогнозированию параметрической надёжности ППП:

– параметрическая надёжность – свойство ППП, состоящее в отсутствии в нём постепенного отказа по рассматриваемому функциональному параметру в течение заданной наработки;

– обучающая выборка – взятая случайным образом из партии ППП выборка, используемая для получения модели деградации функционального параметра с использованием алгоритмов машинного обучения;

– контрольная выборка – выборка, взятая случайным образом из партии ППП, из которой бралась и обучающая выборка, и используемая для определения ошибок, которые могут иметь место при прогнозировании с помощью полученной модели деградации функционального параметра;

– модель деградации функционального параметра – математическое выражение, описывающее закономерность изменения функционального параметра при наработке ППП;

– получение математической модели функционального параметра – процедура выбора вида модели и получения выражений (уравнений) расчёта её коэффициентов с использованием алгоритмов машинного обучения;

– временнáя точка – термин, используемый для обозначения наработки (времени работы), соответствующей конкретному численному значению.

3.2 В настоящей методике использованы следующие сокращения:

ППП – полупроводниковый прибор;

ФП – функциональный параметр.

## 4 Общие положения

### 4.1 Параметрическая надёжность и принципы её прогнозирования

4.1.1 Под постепенным понимают отказ в виде постепенного ухода ФП ППП [обозначим этот параметр как *y*(*t*)] за пределы норм от *a* до *b* в течение наработки *t* при выбранных режимах и условиях работы. Норма для ФП *y*(*t*) приводится в технической документации на ППП, а в ряде случаев устанавливается потребителем в зависимости от особенности использования ППП в электрической схеме электронного устройства.

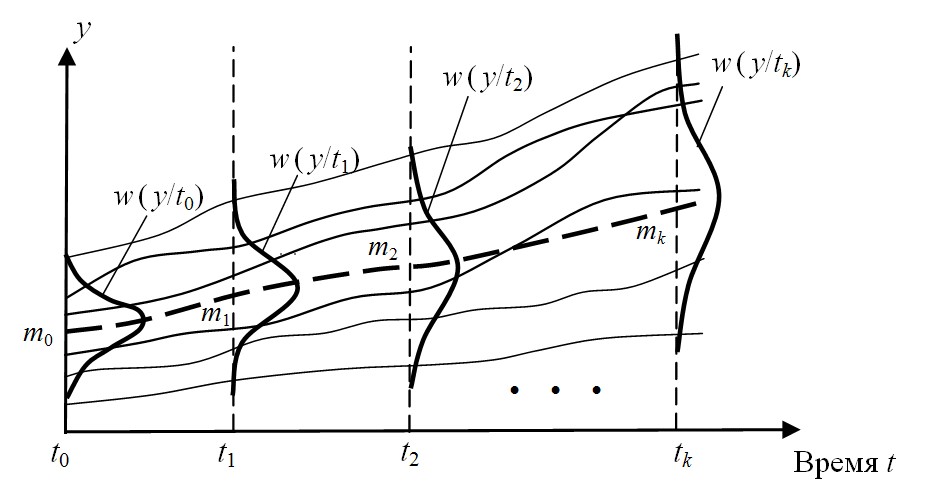
Постепенные отказы определяют такое понятие как параметрическая надёжность ППП, под которой будем понимать свойство ППП, состоящее в отсутствии в нём постепенного отказа по рассматриваемому ФП *y*(*t*) в течение заданной наработки *t*з.

В качестве количественной меры уровня параметрической надёжности рассматривается вероятность выполнения условия *a* ≤ *y*(*t*) ≤ *b* в течение наработки *t*з, то есть

*P*п(*t*з) = Вер[*a* ≤ *y*(*t*) ≤ *b*, *t* ≤ *t*з ] = *R*[ *a* ≤ *y*(*t*) ≤ *b*, *t* ≤ *t*з ], (1)

где запись «Вер» означает вероятность, обозначена символом *R*.

4.1.2 Для получения достоверного прогноза постепенных отказов ППП и, следовательно, их параметрической надёжности надо располагать математической моделью деградации ФП *y*(*t*), показывающей, как этот параметр зависит от наработки и особенностей самого ФП.

4.1.3 В качестве научной основы прогнозирования в начальный момент времени (*t* = 0) постепенных отказов и, следовательно, параметрической надёжности выборки ППП по статистическим данным рассматриваемого ФП *y*(*t*) является наличие тесной корреляции между значениями *y*(*t*) в начальный момент времени (*t* = 0) и значениями этого параметра, взятыми в разных временны́х точках (рисунок 1).

**t0, t1, …, tk – временны́е точки;  
m0, m1, …, mk – средние значения y(t) во временны́х точках (штриховая линия)**

**Рисунок 1 – Изменение плотности распределения ФП y(t) при работе ППП**

4.1.4 В качестве математической модели (далее кратко – модели) деградации ФП *y*(*t*) используется условная плотность его распределения *w*(*y*|*t*), описывающая ФП *y*(*t*) в контролируемых точках наработки *t* = *ti* (*i* = 1, 2, …, *k*), где *k* – последняя рассматриваемая временнáя точка (см. рисунок 1).

4.1.5 Приближённое аналитическое выражение условной плотности распределения *w*(*y*|*t*) ФП *y*(*t*) для любой интересующей наработки *t* = *ti* получают путём математических преобразований начального распределения *w*(*y*|*t* = 0):

, (2)

где ψ – символ функциональной зависимости, подлежащий определению.

Физико-химические характеристики деградации ФП *y*(*t*), получаемые усреднением по исследуемой выборке ППП, войдут в виде коэффициентов в правую часть равенства (2).

4.1.6 Количественную характеристику параметрической надёжности *P*(*ti*) для наработки *t* = *ti* определяют по принятым в теории вероятностей правилам нахождения вероятностей вида

*P*[*a* ≤ *y*(*t*) ≤ *b*, *t* ≤ *ti*],

используя закон распределения случайных величин:

, (3)

где *F*(*a*|*ti*), *F*(*b*|*ti*) – условная (для времени *ti*) функция распределения функционального параметра *y*(*t*), подсчитанная соответственно для значений *y* = *a* и *y* = *b*.

4.1.7 За основу получения модели деградации ФП *y*(*t*) принимают закон его распределения: условный нормальный или же условный закон Вейбулла (двухпараметрический экспоненциальный).

### 4.2 Модель деградации функционального параметра на основе нормального распределения

4.2.1 Модель деградации ФП *y*(*t*) в виде условной плотности его распределения для любого рассматриваемой временно́й точки *t* в этом случае ищется в виде [6]

 (4)

где *m*(*y*|*t*), σ(*y*|*t*) – характеристики (параметры) условного нормального закона распределения;

*y*|*t* – текущее значение ФП *y*(*t*) для временно́й точки *t*.

Величины *m*(*y*|*t*), σ(*y*|*t*) представляют собой соответственно среднее значение и стандартное отклонение ФП *y*(*t*), соответствующие временно́й точке *t*, и в неявном виде включают физико-химические характеристики деградации ФП для интересующей наработки *t*. Величины *m*(*y*|*t*) и σ(*y*|*t*) будем называть коэффициентами модели.

4.2.2 В соответствии с выражением (2) значения коэффициентов модели *m*(*y*|*t*) и σ(*y*|*t*) определяются как функции наработки *t*, а также величин  
*m*0 = *m*(*y*|*t* = 0) и σ0 = σ(*y*|*t* = 0), являющихся параметрами условного нормального закона распределения в начальный момент времени (*t* = 0):

*m*(*y*|*t*) = φ1[*t*, *m*0, σ0], (5)

σ(*y*|*t*) = φ2[*t*, *m*0, σ0], (6)

где φ1, φ2 – операторы функциональных зависимостей, подлежащие определению по результатам обучающего эксперимента.

4.2.3 Условная плотность распределения (4), полученная с учётом выражений (5) и (6), рассматривается в качестве модели деградации ФП *y*(*t*).

### 4.3 Модель деградации функционального параметра на основе распределения Вейбулла

4.3.1 Модель деградации ФП *y*(*t*) в виде условной плотности его распределения для любого рассматриваемой временно́й точки *t* в этом случае ищется в виде [6]

 *y|t*  ≥ *с*, (7)

где μ, *с* – коэффициенты модели, представляют собой параметры закона Вейбулла, соответствующие временно́й точке *t*, т. е. μ = μ(*y*|*t*) и *c = c*(*y*|*t*).

Коэффициент μ представляет собой параметр масштаба, а коэффициент *c* – параметр сдвига, показывающий смещение ФП *y*(*t*) относительно его нулевого значения.

Распределение (7) можно рассматривать и как разновидность более общего трёхпараметрического распределения Вейбулла со значением коэффициента формы η=1.

Коэффициенты модели μ(*y*|*t*) и *c*(*y*|*t*), соответствующие временно́й точке *t*, в неявном виде включают физико-химические характеристики деградации ФП *y*(*t*) для интересующей наработки *t*.

4.3.2 В соответствии с выражением (2) коэффициенты μ(*y*|*t*) и *c*(*y*|*t*) можно определять как функции наработки *t*, а также величин μ(*y*|*t* = 0) и *с*(*y*|*t* = 0), являющихся параметрами двухпараметрического экспоненциального распределения в начальный момент времени (*t* = 0). Однако для практических приложений интерес представляет определение коэффициентов μ(*y*|*t*) и *с*(*y*|*t*) как функций наработки *t* и величин *m*0, σ0:

μ(*y*|*t*) = φ3[*t*, *m*0, σ0]; (8)

*с*(*y*|*t*) = φ4[*t*, *m*0, σ0], (9)

где φ3, φ4 – операторы функциональных зависимостей, подлежащие определению по результатам обучающего эксперимента; *m*0, σ0 – среднее значение и стандартное отклонение ФП *y*(*t*)в начальный момент времени (во временно́й точке *t* = 0).

4.3.3 Условная плотность распределения (7), полученная с учётом выражений (8) и (9), рассматривается в качестве модели деградации ФП *y*(*t*).

## 5 Этапы решения задачи прогнозирования

5.1 Решение задачи прогнозирования параметрической надёжности выборок ППП включает следующие этапы:

– проведение обучающего эксперимента – экспериментальное исследование обучающей выборки;

– получение модели деградации ФП *y*(*t*);

– оценка пригодности модели деградации для прогнозирования параметрической надёжности выборок однотипных ППП;

– прогнозирование параметрической надёжности новых выборок однотипных ППП.

5.2 Обучающий эксперимент представляет собой предварительные экспериментальные исследования определённой выборки ППП интересующего типа. Эту выборку называют обучающей. Исследования представляют собой ускоренные испытания обучающей выборки на длительную наработку. В процессе наработки для каждого экземпляра обучающей выборки наблюдают за изменениями ФП *y*(*t*) и фиксируют его значения во временны́х точках *ti* (*i* = 0, 1, 2, …, *k*), причём *t*0 = 0 соответствует начальному моменту времени. Ускоренные испытания в данном случае можно рассматривать как физическое моделированиенаработки экземпляров этой выборки ППП.

5.3 Используя результаты обучающего эксперимента, коэффициенты выбранной модели деградации ФП *y*(*t*) получают в виде уравнений (выражений) (5) и (6) в случае выбора в качестве модели условного нормального закона распределения ФП *y*(*t*), или в виде выражений (8) и (9) – в случае условного распределения Вейбулла. Вид искомых уравнений (5) и (6), или (8) и (9) определяется найденными операторам φ1 и φ2 в первом случае, или φ3 и φ4 – во втором случае.

5.4 Пригодность математической модели, которую планируют использовать для прогнозирования параметрической надёжности новых выборок однотипных ППП, выясняют на другой выборке, называемой контрольной. Вначале для этой выборки с учётом выбранного в п. 5.3 вида модели деградации ФП *y*(*t*) получают коэффициенты модели, используя полученные в п. 5.3 (по результатам обучающего эксперимента) уравнения для расчёта коэффициентов модели. Для этого в уравнения подставляют значения ti, а также полученные для контрольной выборки значения *m*0 и σ0 ФП *y*(*t*). В итоге для ФП *y*(*t*) контрольной выборки получают модель деградации, используя которую расчётным способом для ППП этой выборки находят прогнозные значения параметрической надёжности Р(ti)пр, соответствующие рассматриваемым временны́м точкам *ti*, *i* = 1, 2, …, *k*.

После этого выполняют ускоренные испытания на наработку экземпляров контрольной выборки (по аналогии с испытанием обучающей выборки). Используя результаты этих испытаний, находят экспериментальные значения уровня параметрической надёжности [*Р*(*ti*)]Э, соответствующие временны́м точкам *ti*, *i* =  1, 2, …, *k*.

Заключение о возможности использования модели деградации ФП у(t) для прогнозирования параметрической надёжности новых выборок однотипных ППП принимают по значению ошибки прогнозирования, которую определяют путём сравнения значений Р(ti)пр и Р(ti)Э в каждой временно́й точке *ti*, *i* = 1, 2, …, *k*.

**Рекомендация**. С целью уменьшения продолжительности процедуры прогнозирования экспериментальные исследования обучающей и контрольной выборок рекомендуется выполнять одновременно. Дальнейшие действия, предусмотренные методикой, описываются применительно к этому случаю.

## 6 Экспериментальные исследования

6.1 Для проведения экспериментальных исследований формируется выборка ППП рассматриваемого типа. Её общий объём *N* включает обучающую выборку размером *n* ≥ 80 и контрольную выборку размером *m* ≥ 80. Выборку объёмом *N*, включающую обучающую и контрольную выборки, будем называть объединённой. Отбор *N* экземпляров объединённой выборки должен выполняться случайным образом из одной и той же партии ППП.

6.2 Результаты экспериментальных исследований обучающей выборки используют для выбора вида модели деградации ФП *y*(*t*) и получения выражений (уравнений) расчёта её коэффициентов, результаты экспериментальных исследований контрольной выборки – для определения ошибок прогнозирования.

6.3 Уточняют число временны́х точек *k* и значение наработки *ti*, соответствующую *i*-й временно́й точке, *i* = 1, 2, …, *k*.

6.4 У каждого экземпляра объединённой выборки в начальный момент времени (*t*0 = 0) измеряют значения ФП *y*(*t*). Результаты этих измерений у экземпляров обучающей выборки будут использоваться для получения уравнений расчёта коэффициентов математической модели деградации ФП *y*(*t*), а у экземпляров контрольной выборки – для получения в дальнейшем прогнозного уровня параметрической надёжности этой выборки для выбранных временны́х точек *ti*, *i* = 1,  2, …, *k*.

6.5 Проводят работу по планированию ускоренных испытаний для получения деградации ФП *y*(*t*) экземпляров объединённой выборки в течение интересующей наработки от *t*0= 0до *tk*, а также определяют процедуру контроля значений *y*(*t*) в интересующих временны́х точках *t* = *ti*, *i* = 1, 2, …, *k*.

6.6 Для уменьшения времени испытаний ППП на длительную наработку рекомендуется использовать ускоренные форсированные испытания ППП, проводимые по типовым методикам [3, 4]. Эти испытания позволяют для каждого экземпляра объединённой выборки относительно быстро получить экспериментальные значения ФП *y*(*t*) во временны́х точках *ti* (*i* = 0, 1, 2, …, *k*) в диапазоне наработок от *t*0 = 0 до *tk*.

6.7 Результаты ускоренных испытаний, пересчитанные с учётом коэффициента ускорений к нормальным условиям функционирования ППП, рекомендуется сводить в таблицы отдельно для экземпляров обучающей и экземпляров контрольной выборок. Рекомендуемая форма на примере обучающей выборки соответствует таблице 1.

Таблица 1 – Результаты деградации ФП *y*(*t*), обучающая выборка

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер экземпляра | Значение ФП *y*(*t*) при наработке *t* | | | | |
| *t*0 | *t*1 | *t*2 | … | *tk* |
| 1 | *y*(*t*0)1 | *y*(*t*1)1 | *y*(*t*2)1 | … | *y*(*tk*)1 |
| 2 | *y*(*t*0)2 | *y*(*t*1)2 | *y*(*t*2)2 | … | *y*(*tk*)2 |
| … | *…* | *…* | *…* | … | *…* |
| *n* | *y*(*t*0)*n* | *y*(*t*1)*n* | *y*(*t*2)*n* | … | *y*(*tk*)*n* |

6.8 Для экземпляров контрольной выборки результаты деградации ФП *y*(*t*) представляют аналогичный вид (см. таблицу 1), но учитывают то, что количество экземпляров этой выборки составляет значение *m*. В частном случае для экземпляров обучающей и контрольной выборок может иметь место равенство *n* = *m*.

**Примечание**. При проведении ускоренных испытаний (физическом моделировании наработки ППП) некоторые экземпляры обучающей и/или контрольной выборок могут отказать по типу внезапный отказ. В таких случаях количество экземпляров обучающей выборки, которые в дальнейшем будут использоваться для получения уравнений расчёта коэффициентов математической модели деградации ФП *y*(*t*), окажется меньше значения *n* (см. п. 6.1). Точно так же количество экземпляров контрольной выборки, которые могут быть использованы для оценки ошибки прогнозирования, может оказаться меньше значения *m*. Это обстоятельство необходимо принимать во внимание, выбирая объём выборок.

## 7 Получение модели деградации функционального параметра

### 7.1 Общие сведения

7.1.1 Получение модели деградации ФП *y*(*t*) включает выбор вида математической модели и получение уравнений расчёта её коэффициентов. Для этого используют только экземпляры обучающей выборки.

7.1.2 Выполнив ускоренные испытания, экземпляры обучающей выборки разбивают на *l* групп с одинаковым или неодинаковым количеством экземпляров в каждой группе. Число групп следует брать *l* ≥ 3…5, при этом количество экземпляров в каждой группе в соответствии с математической статистикой [5] должно быть не менее 20.

7.1.3 На основе анализа результатов ускоренных испытаний во временны́х точках *ti*, *i* = 1, 2, …, *k* (см. пп. 4.2, 4.3) и/или из теоретических сведений о возможном механизме деградации ФП *y*(*t*) принимают решение о виде используемой модели распределения ФП *y*(*t*).

7.1.4 С учётом выбранной модели распределения ФП *y*(*t*) формируют матрицу данных, используемую для получения операторов φ1, φ2 выражений (5) и (6) в случае модели на основе нормального распределения, или операторов φ3, φ4 выражений (8) и (9) – в случае модели на основе распределения Вейбулла.

### 7.2 Получение модели на основе нормального закона распределения

7.2.1 В случае модели на основе нормального распределения матрица данных, используемая для получения операторов φ1, φ2 выражений (5) и (6), представляет вид таблицы 2.

Таблица 2 – Матрица данных для получения операторов φ1, φ2 выражений (5) и (6)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер экземпляра обучающей выборки | Номер группы *j* | Обозначение множества элементов *j*-й группы | Фактор | | | Функция отклика | |
| *m*0(*j*) | σ0(*j*) | Временная точка *ti* | *m*(*y*|*t*) | σ(*y*|*t*) |
| 1…*n*1 | 1 | *G*1 | *m*0(1) | σ0(1) | *t*0 | *m*0(1) | σ0(1) |
| (*n*1 + 1)…*n*2 | 2 | *G*2 | *m*0(2) | σ0(2) | *t*0 | *m*0(2) | σ0(2) |
| … | … | … | … | … | … | … | … |
| (*nl*-1 + 1)…*nl* | *l* | *Gl* | *m*0(*l*) | σ0(*l*) | *t*0 | *m*0(*l*) | σ0(*l*) |
| 1…*n*1 | 1 | *G*1 | *m*0(1) | σ0(1) | *t*1 | [*m*(*y*|*t*1)]1 | [σ(*y*|*t*1)]1 |
| (*n*1 + 1)…*n*2 | 2 | *G*2 | *m*0(2) | σ0(2) | *t*1 | [*m*(*y*|*t*1)]2 | [σ(*y*|*t*1)]2 |
| … | … | … | … | … | … | … | … |
| (*nl*-1 + 1)…*nl* | *l* | *Gl* | *m*0(*l*) | σ0(*l*) | *t*1 | [*m*(*y*|*t*1)]*l* | [σ(*y*|*t*1)]*l* |
| ··· | … | … | … | … | … | … | … |
| 1…*n*1 | 1 | *G*1 | *m*0(1) | σ0(1) | *tk* | [*m*(*y*|*tk*)]1 | [σ(*y*|*ti*)]1 |
| (*n*1 + 1)…*n*2 | 2 | *G*2 | *m*0(2) | σ0(2) | *tk* | [*m*(*y*|*tk*)]2 | [σ(*y*|*ti*)]2 |
| … | … |  | … | … | … | … | … |
| (*nl*-1 + 1)…*nl* | *l* | *Gl* | *m*0(*l*) | σ0(*l*) | *tk* | [*m*(*y*|)*tk*]*l* | [σ(*y*|*tk*)]*l* |

В таблице 2 приняты следующие обозначения:

*n*1, *n*2, …, *nl* – номер экземпляра обучающей выборки, отвечающий последнему элементу соответствующей группы;

*m*0(*j*), σ0(*j*) – среднее значение и стандартное отклонение ФП *y*(*t*) для экземпляров *j*-й группы, *j* = 1, 2, …, *l*;

*ti* – момент времени (временная точка), для которого контролировались значения ФП при физическом моделировании его деградации, *i* = 0, 1, 2, …, *k*.

В обозначениях *m*0(*j*), σ0(*j*) нижний индекс «ноль» подчёркивает то, что эти характеристики относятся к начальному моменту времени *t*0, т. е. для времени *t* = 0.

Данные таблицы 2 можно рассматривать как результаты пассивного факторного эксперимента, в котором факторами являются значения *m*0(*j*), σ0(*j*) и *ti*, а функциями отклика – интересующие коэффициенты нормальной модели *m*(*y*|*ti*) и σ(*y*|*ti*). Первые два столбца таблицы 2 задают номер опыта пассивного факторного эксперимента.

7.2.2 Среднее значение *m*0(*j*) и стандартное отклонение σ0(*j*) ФП *y*(*t*) для элементов каждой (*j*-й) группы для начального момента времени *t*0 (см. таблицу 2) рассчитывают по формулам

 (10)

 (11)

…,

 (12)

 (13)

 (14)

…,

 (15)

где *n*1, *n*2, …, *nl* – количество экземпляров, включённых в *j*-ю группу; записи *q*∈ *G*1, *q*∈ *G*2, …, *q*∈ *Gl* означают, что суммирование выполняется только с учётом экземпляров, входящих в подмножество *Gj*, т. е. только экземпляров *j*-й группы; *j* = 1, 2, …, *l*.

7.2.3 Параметры нормальной модели [*m*(*y*|*ti*)]*j* и [σ(*y*|*ti*)]*j*, рассматриваемые в качестве функций отклика для *j*-й группы во временной точке *t*0, совпадают со значениями *m*0(*j*) и σ0(*j*) соответствующей группы (*j =* 1, 2, …, *l*)*.*

7.2.4 Параметры нормальной модели [*m*(*y*|*ti*)]*j* и [σ(*y*|*ti*)]*j* для значений *ti*  
(*i =* 1, 2, …, *k*) подсчитывают по выражениям

 (16)

 (17)

где запись *q*∈ *Gj* под знаками сумм означает, что для подсчёта характеристик  
*j-*й группы должны использоваться экземпляры обучающей выборки, входящие в подмножество *Gj*; *j* = 1, 2, …, *l*.

7.2.5 Пользуясь данными таблицы 2, для величин *m*(*y*|*t*), σ(*y*|*t*) находят функциональные зависимости (уравнения) вида (5) и (6) – операторы φ1 и φ2. Для их получения рекомендуется использовать библиотеку sklearn для обработки данных на языке Python:

*m*(*y*|*t*) = φ1(*t*, *m*0, σ0), (18)

σ(*y*|*t*) = φ2(*t*, *m*0, σ0). (19)

7.2.6 С учётом вида операторов φ1 и φ2, найденных для величин *m*(*y*|*t*) и σ(*y*|*t*) в п.  7.2.5, записывают в соответствии с выражением (4) модель деградации ФП *y*(*t*):

 (20)

**7.3 Получение модели на основе закона распределения Вейбулла**

7.3.1 Матрица данных, используемая для получения операторов φ3 и φ4 выражений (8) и (9), по которым будут рассчитываться коэффициенты µ(*y*|*t*) и *c*(*y*|*t*) модели на основе распределения Вейбулла, соответствует таблице 2, однако в качестве функций отклика вместо коэффициентов *m*(*y*|*t*) и σ(*y*|*t*) нормальной модели следует рассматривать коэффициенты µ(*y*|*t*) и *c*(*y*|*t*) распределения вейбулла.

7.3.2 Здесь, как и в случае нормальной модели, группы 1, 2, …, *l* для временны́х точек *ti* при получении таблицы 2 необходимо формировать, используя только экземпляры обучающей выборки.

7.3.3 Среднее значение *m*0(*j*) и стандартное отклонение σ0(*j*) ФП *y*(*t*) для элементов *j*-й группы для начального момента времени *t*0 (см. таблицу 2) определяют, как и ранее, в соответствии с п. 7.2.2.

7.3.4 В качестве оценки параметра [*с*(*y*|*ti*)]*j*, соответствующего *i*-му временно́й точке для *j* й группы должно быть принято:

[*с*\*(*y*|*ti*)]*j* = (*yi.*min)*j*, *i* = 0, 1, 2, …, *k*, (21)

где верхний индекс \* означает оценку параметра [*с*(*y*|*ti*)]*j*, соответствующую временно́й точке *ti* для *j*-й группы;(*yi.*min)*j* – минимальное значение рассматриваемого ФП *y*(*t*), соответствующее временно́й точке *ti* для экземпляров *j*-й группы.

7.3.5 Пункт 7.3.4 последовательно выполняется для всех *l* групп (*j* = 1, 2, …, *l*).

7.3.6 Оценку коэффициента [μ(*y*|*ti*)]*j* для *j*-й группы (*j* = 1, 2, …, *l*) во временно́й точке *ti* находят по формуле [6]

 (22)

где *yq*(*ti*) – значение ФП экземпляра, входящего в подмножество *Gj*, для *i*-й временно́й точки; *nj* – количество экземпляров в *j*-й группе (размер подмножества *Gj*); [*с*\*(*y*|*ti*)]*j* – оценка параметра распределения *с*(*y*|*ti*), полученная по равенству (Д.21) для *j*-й группы во временно́й точке *ti*; *i* = 0, 1, 2, …, *k*; *j* = 1, 2, …, *l*.

7.3.7 Пользуясь данными таблицы 2, и рассматривая коэффициенты μ(*y*|*t*) и *с*(*y*|*t*) в качестве функций отклика, находят для них функциональные зависимости вида (8) и (9) – операторы φ3 и φ4, для получения которых рекомендуется использовать библиотеку sklearn для обработки данных на языке Python:

μ(*y*|*t*) = φ3(*t*, *m*0, σ0), (23)

*с*(*y*|*t*) = φ4(*t*, *m*0, σ0). (24)

7.3.8 С учётом вида операторов φ3 и φ4, найденных для коэффициентов µ(*y*|*t*) и *c*(*y*|*t*) в п. 7.3.7, записывают в соответствии с (7) модель деградации ФП *y*(*t*):

 (25)

где запись *y*|*t* означает, как и ранее, значение ФП *y*(*t*), соответствующее рассматриваемой наработке (временно́й точке) *t*.

## 8 Прогнозирование параметрической надёжности новых выборок однотипных ППП

### 8.1 Общие сведения

8.1.1 Прогнозирование параметрической надёжности выполняют для новых выборок однотипных ППП, если ошибки прогнозирования применительно к контрольной выборке оказались приемлемыми для практики. Под новыми (будем называть прогнозируемыми) понимают такие выборки ППП, взятые из рассматриваемой партии однотипных ППП, которые не принимали участия в обучающем эксперименте.

Определение ошибок прогнозирования рассмотрено в разделе 9 данной методики. В этом разделе покажем, как с помощью модели деградации ФП *y*(*t*) прогнозировать параметрическую надёжность новых выборок однотипных ППП.

8.1.2 Уточняют заданную наработку *ti*, для которой интересуются параметрической надёжностью прогнозируемой выборки ППП.

8.1.3 У экземпляров прогнозируемой выборки в начальный момент времени *t*0 измеряют значение ФП *y*(*t*), по значению которого судят о параметрической надёжности ППП.

8.1.4 Используя результаты п. 8.1.3, определяют среднее значение *m*0н и стандартное отклонение σ0н ФП *y*(*t*) прогнозируемой (новой) выборки:

 (26)

 (27)

где *ys*(*t*0) – значение ФП *y*(*t*), полученное в п. 8.1.3 для *s*-го экземпляра прогнозируемой выборки;

*n*н – количество экземпляров в прогнозируемой выборке – объём прогнозируемой выборки.

8.1.5 С учётом выбранного вида модели деградации ФП *y*(*t*) по ранее полученным (с использованием результатов обучающего эксперимента) уравнениям (18) и (19), или же (23) и (24) рассчитывают значения коэффициентов модели, соответствующие заданной наработке tз. Для этого в указанные уравнения в качестве *t* подставляют значение tз, а в качестве *m*0 и σ0 – значения величин *m*0н и σ0н, полученные при выполнении п. 8.1.4. Далее с учётом вида модели деградации ФП *y*(*t*) расчётным способом находят прогнозное значение вероятности *Р*(*t*з)пр, соответствующее заданной наработке *t*з

### 8.2 Прогнозирование с использованием модели на основе нормального распределения

8.2.1 Для прогнозируемой выборки определяют коэффициенты *m*(*y*|*t*з) и σ(*y*|*t*з) модели деградации ФП *y*(*t*), соответствующие заданной наработке *t* = *t*з. Используют выражениям (18) и (19), в которые в качестве аргументов *t*, *m*0, σ0 подставляют соответственно значение *t*з, а также полученные в п. 8.1.4 среднее значение *m*0н и стандартное отклонение σ0н ФП *y*(*t*) прогнозируемой выборки, соответствующие начальному моменту времени:

*m*(*y*|*ti*) = φ1(*t*з, *m*0н, σ0н), (28)

σ(*y*|*ti*) = φ2(*t*з, *m*0н, σ0н). (29)

8.2.2 Согласно формуле (Д.3) и полученной в п. 7.2.1…7.2.6 модели деградации ФП *y*(*t*) в предположении (гипотезы) о нормальном законе его распределения во временны́х точках, вероятность *Р*(*t*з)пр определяют по выражению [3]

 (30)

где Φ[…] – табличная нормальная функция распределения, найденная для аргумента, указанного в скобках (приложение А); *a* и *b* – нижнее и верхнее значение нормы на ФП *y*(*t*), записанное в технической документации на ППП рассматриваемого типа, или указанное потребителем ППП.

### 8.3 Прогнозирование с использованием модели на основе распределения Вейбулла

8.3.1 Для прогнозируемой выборки определяют коэффициенты µ(*y*|*ti*) и *с*(*y*|*ti*) модели деградации ФП *y*(*t*), соответствующие заданной наработке *t* = *t*з. Используют выражения (23) и (24), в которые в качестве аргументов *t*, *m*0, σ0 подставляют значение *t*з, а также найденные в п. 8.1.4 среднее значение *m*0н и стандартное отклонение σ0н ФП *y*(*t*) прогнозируемой выборки, соответствующие начальному моменту времени:

µ(*y*|*t*з) = φ3(*t*з, *m*0н, σ0н), (31)

*c*(*y*|*t*з) = φ4(*t*з, *m*0н, σ0н). (32)

8.3.2 Согласно формуле (3) и полученной в пп. 7.3.1…7.3.8 модели деградации ФП *y*(*t*) в предположении (гипотезе) о соответствии распределения ФП *y*(*t*) распределению Вейбулла во временны́х точках, определяют вероятность *Р*(*t*з)пр по выражению

 (33)

где *a* и *b* – как и ранее, нижнее и верхнее значения нормы на ФП *y*(*t*), записанные в технической документации на ППП рассматриваемого типа, или указанные потребителем ППП.

## 9 Определение ошибок прогнозирования

9.1 Для определения ошибок прогнозирования используют экземпляры контрольной выборки. Их количество *r* с учётом возможных внезапных отказов отдельных экземпляров контрольной выборки отвечаетусловию *r* ≤ *m*, где *m* – объём контрольной выборки (см. п. 6.1).

9.2 Решение о пригодности математической модели деградации ФП *y*(*t*) для прогнозирования параметрической надёжности ППП принимают по значению средней ошибки прогнозирования параметрической надёжности по рассматриваемому ФП y(t). Эту ошибку Δср определяют по формуле [1]

 (34)

где k – число временны́х точек, для которых находятся прогнозные и экспериментальные значения уровня параметрической надёжности; *P*пр*i* = [*P*(*ti*)]пр – прогнозное значение уровня параметрической надёжности экземпляров контрольной выборки, рассчитанное по формуле (30) или (33) для наработки *ti* (i-й временно́й точки); *P*Э*i* = [*P*(*ti*)]Э – экспериментальное значение уровня параметрической надёжности экземпляров контрольной выборки, полученное для наработки *ti*; i = 1, 2, …, k.

9.3 Используя результаты измерений ФП y(t), полученные в п. 6.4 для экземпляров контрольной выборки в начальный момент времени (*t*0 = 0), по формулам, аналогичным (26) и (27), рассчитывают среднее значение *m*0к и стандартное отклонение σ0к ФП *y*(*t*) контрольной выборки. При этом количество экземпляров, по значению которых определяют значения *m*0к и σ0к, равно *r* (см. п. 9.1).

9.4 Уточняют нижнее (*a*) и верхнее (*b*) значения нормы, записанной на ФП *y*(*t*) в технической документации на ППП рассматриваемого типа, или указанной потребителем с учётом специфики работы ППП в составе электронного устройства.

9.5 По формуле (30) в случае нормальной модели или по формуле (33) в случае двухпараметрической экспоненциальной модели деградации ФП y(t) находят прогнозное значение уровня параметрической надёжности экземпляров контрольной выборки *P*п*i* = [*P*п(*ti*)]пр для каждой временно́й точки ti; i = 1, 2, …, k.

9.6 По данным, полученным при испытании на наработку экземпляров контрольной выборки, определяют экспериментальные значения уровня параметрической надёжности [Р(ti)]э, соответствующие наработкам ti, i = 1, 2, …, k. Используют классическое выражение оценки вероятности события по его частоте, которое для решения данной задачи принимает вид

 i = 1, 2, ..., k, (35)

где r(a ≤ y ≤ b) – количество экземпляров контрольной выборки, для которых ФП y(t) во временно́й точке ti находится в пределах указанных норм от a до b; r – используемое количество экземпляров контрольной выборки (объём контрольной выборки без учёта экземпляров, для которых зафиксированы внезапные отказы, см. п. 9.1).

9.7 Сравнивая полученные значения Р(ti)пр и Р(ti)Э (таблица 3), делают заключение о возможности использования модели деградации ФП y(t) для прогнозирования параметрической надёжности новых однотипных выборок ППП в диапазоне наработок от t1 до tk. Для этого рассчитывают среднюю ошибку прогнозирования по формуле (34).

Таблица 3. – Сравнение прогнозного и экспериментального уровней параметрической надёжности экземпляров контрольной выборки

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Вероятность Pп(ti) для наработки ti | | | | | | |
| t1, ч | | t2, ч | | … | tk, ч | |
| [Р(t1)]пр | [Р(t1)]э | [Р(t2)]пр | [Р(t2)]э | … | [Р(tk)]пр | [Р(tk)]э |
| … | … | … | … | … | … | … | … |

9.8 Моделью деградации функционального параметра рекомендуется пользоваться на практике, если средняя ошибка прогнозирования Δср, подсчитанная по формуле (34), отвечает условию Δср ≤ 5…7 %.

## 10 Пример применения методики

10.1 В качестве ППП, параметрической надёжностью которых интересуются, были выбраны биполярные транзисторы (БТ) большой мощности типа КТ872А.

В качестве ФП рассматривался параметр UКЭнас – напряжение насыщения перехода коллектор-эмиттер. Электрические режимы измерения UКЭнас соответствовали требованиям технической документации на БТ типа КТ872А.

10.2 Объединённая выборка, взятая случайным образом из партии БТ, включала 200 экземпляров, из которых 100 экземпляров рассматривались как обучающая выборка (*n* = 100), а остальные 100 экземпляров использовались в качестве контрольной выборки (*m* = 100).

10.3 Для получения деградации параметра UКЭнас (физического моделирования наработки БТ) использовались проводимые по типовым методикам [4] ускоренные форсированные испытания, эквивалентные времени 17 280 ч с точки зрения функционирования БТ в нормальных условиях работы.

Коэффициент ускорения испытаний *K*у составил около 80 единиц. Временны́е точки с учётом ускоренных испытаний и наработка, пересчитанная на функционирование БТ в обычных нормальных условиях, соответствуют данным таблицы 4.

Таблица Д.4. – Соответствие времени ускоренных испытаний БТ наработке в обычных нормальных условиях

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Номер временнόй точки, *i* | Значение времени ускоренных испытаний, ч | Наработка (время работы), пересчитанное на обычные нормальные условия, ч |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 104 | 8320 |
| 2 | 160 | 12800 |
| 3 | 216 | 17280 |

10.4 Результаты физического моделирования деградации ФП *U*КЭнас, пересчитанные с учётом коэффициента ускорения на наработку, соответствующую нормальным условиям функционирования БТ, сводим в таблицы отдельно для экземпляров обучающей и экземпляров контрольной выборок. Фрагменты этих результатов соответствуют таблицам 5 и 6.

Таблица 5. – Деградационные изменения параметра *U*КЭнас (обучающая выборка)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер экземпляра | Значения *U*КЭнас (в мВ) при наработке транзисторов, ч | | | |
| 0 | 8320 | 12800 | 17280 |
| 1 | 731 | 1028 | 1058 | 1087 |
| 2 | 556 | 623 | 633 | 787 |
| 3 | 690 | 953 | 978 | 1001 |
| 4 | 530 | 594 | 601 | 610 |
| 5 | 578 | 665 | 690 | 691 |
| 6 | 1171 | 1640 | 1780 | 1790 |
| … | … | … | … | … |
| 87 | 434 | 530 | 530 | 551 |
| 88 | 396 | 466 | 466 | 484 |
| 89 | 424 | 602 | 620 | 668 |
| 90 | 941 | 1520 | 1780 | 2110 |
| 91 | 558 | 746 | 777 | 809 |

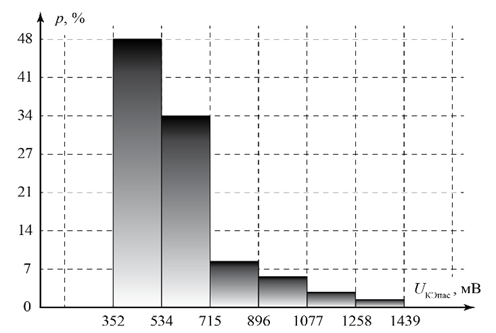
Таблица 6. – Деградационные изменения параметра *U*КЭнас (контрольная выборка)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер экземпляра | Значения *U*КЭнас (в мВ) при наработке транзисторов, ч | | | |
| 0 | 8320 | 12800 | 17280 |
| 1 | 660 | 1012 | 998 | 1133 |
| 2 | 470 | 581 | 585 | 601 |
| 3 | 456 | 549 | 562 | 585 |
| 4 | 723 | 1197 | 1316 | 1413 |
| 5 | 468 | 621 | 649 | 691 |
| 6 | 552 | 891 | 964 | 1100 |
| … | … | … | … | … |
| 89 | 474 | 489 | 489 | 511 |
| 90 | 532 | 805 | 851 | 932 |
| 91 | 1165 | 2040 | 2430 | 2740 |
| 92 | 901 | 1024 | 1032 | 1030 |
| 93 | 904 | 1052 | 1074 | 1075 |

**Примечание***.* В таблицах 5 и 6 число экземпляров меньше 100, т. к. в таблицы не включены экземпляры, у которых возник внезапный отказ.

10.5 Возникает вопрос, какую математическую модель деградации *U*КЭнас выбрать в данном случае. Напомним, что в качестве такой модели для рассматриваемого ФП используют условную плотность его распределения *y*(*t*) во временной точке *t.*

На рисунках 1 и 2 показаны гистограммы распределения, построенные для ФП *U*КЭнас по опытным данным обучающей выборки (см. таблицу 5) для временны́х точек (наработок) *t* = 0 и *t* = 17280 ч. На вертикальных осях координатных сеток указаны относительные частоты *p* (в %) попадания ФП в указанные интервалы значений.

Из гистограмм, приведённых на рисунках 1 и 2, видно, что для ФП *U*КЭнас, более удачной, скорее всего, окажется модель деградации вида (7) на основе распределения Вейбулла. Модель деградации на основе нормального распределения, судя по виду гистограмм, может не обеспечить приемлемых ошибок прогнозирования.

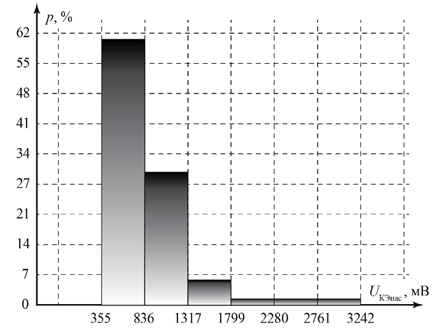
Рисунок 1. – Гистограмма распределения параметра UКЭнас для наработки *t* = 0

Рисунок 2. – Гистограмма распределения параметра UКЭнас для наработки *t* = 17 280 ч

10.6 Девять экземпляров обучающей выборки при испытании отказали по типу внезапный отказ. Из оставшихся 91 экземпляра обучающей выборки (см. таблицу 5) случайным образом было сформировано три группы по 30 экземпляров в каждой (один экземпляр таблицы 5 оказался невостребованным). Эти три группы использованы для получения матрицы данных, необходимой для получения операторов φ3, φ4, задающих математические выражения (8) и (9) для коэффициентов μ(*y*|*t*) и *с*(*y*|*t*) выбранной двухпараметрической модели деградации ФП *U*КЭнас. Далее для краткости вместо *U*КЭнас применяется также ранее принятое общее обозначение ФП как *y*(*t*).

10.7 Используя значения *U*КЭнас экземпляров обучающей выборки, подсчитываем по формулам (10)…(15) п. 7.2.2 характеристики *m*0 и σ0 для каждой группы (таблица 8).

Таблица 8. – Значения характеристик *m*0 и σ0 для сформированных групп  
из экземпляров обучающей выборки

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номер группы | Номер экземпляра обучающей выборки | *m*0, мВ | σ0, мВ |
| 1 | 1…30 | 608,46 | 174,25 |
| 2 | 31…60 | 627,79 | 194,26 |
| 3 | 61…90 | 567,33 | 187,7 |

10.8 По формулам (21) и (22), пп. 7.3.4…7.3.6, для временны́х точек *ti* определяем экспериментальные значения коэффициентов µ(*y*|t) и *с*(*y*|t) выбранной деградационной модели (таблица 9).

Таблица 9. – Экспериментальные значения коэффициентов µ(*y*/t) и *с*(*y*/t) деградационной модели для сформированных групп из экземпляров обучающей выборки (мВ)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер группы | Номер экземпляра обучающей выборки | Временная точка *ti*, ч | | | | | | | |
| 0 | | 8 320 | | 12 800 | | 17 280 | |
| μ(*y*|*t*) | *с*(*y*|*t*) | μ(*y*|*t*) | *с*(*y*|*t*) | μ(*y*|*t*) | *с*(*y*|*t*) | μ(*y*|*t*) | *с*(*y*|*t*) |
| 1 | 1…30 | 156,46 | 452 | 268,96 | 477 | 293,75 | 473 | 326 | 478 |
| 2 | 31…60 | 186,79 | 441 | 371 | 466 | 396,79 | 466 | 439,13 | 467 |
| 3 | 61…90 | 171,83 | 396 | 337,92 | 466 | 544,8 | 466 | 427,38 | 484 |

10.9 Строим матрицу с условиями и результатами пассивного факторного эксперимента (таблица 10).

Таблица Д.10. – Пассивный факторный эксперимент и его результаты

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер группы | Номер экземпляра обучающей выборки | *m*0, мВ | σ0, мВ | Временная точка *ti*, ч | μ(*y*|*t*), мВ | с(*y*|*t*), мВ | *m*(*y*|*t*), мВ | σ(*y*|*t*), мВ |
| 1 | 1…30 | 608,46 | 174,25 | 0 | 156,46 | 452 | 608,46 | 174,25 |
| 2 | 31…60 | 627,79 | 194,26 | 0 | 186,79 | 441 | 627,79 | 194,26 |
| 3 | 61…90 | 567,33 | 187,7 | 0 | 171,83 | 396 | 567,33 | 187,7 |
| 1 | 1…30 | 608,46 | 174,25 | 8320 | 268,96 | 477 | 745,96 | 320,6 |
| 2 | 31…60 | 627,79 | 194,26 | 8320 | 371 | 466 | 837,0 | 455,69 |
| 3 | 61…90 | 567,33 | 187,7 | 8320 | 337,92 | 466 | 803,92 | 413,71 |
| 1 | 1…30 | 608,46 | 174,25 | 12800 | 293,75 | 473 | 766,75 | 352,54 |
| 2 | 31…60 | 627,79 | 194,26 | 12800 | 396,79 | 466 | 862,79 | 496,66 |
| 3 | 61…90 | 567,33 | 187,7 | 12800 | 544,8 | 466 | 841,75 | 458,48 |
| 1 | 1…30 | 608,46 | 174,25 | 17280 | 326 | 478 | 804 | 381,98 |
| 2 | 31…60 | 627,79 | 194,26 | 17280 | 439,13 | 467 | 906,13 | 530,42 |
| 3 | 61…90 | 567,33 | 187,7 | 17280 | 427,38 | 484 | 911,38 | 529,09 |

Данные таблицы 10 использованы для получения операторов φ3, φ4 выражений вида (8) и (9), показывающих, как коэффициенты μ(*y*|*t*) и *с*(*y*|*t*) деградационной модели будут зависеть от наработки *t* и числовых характеристик *m*0 и σ0, соответствующих начальному моменту времени *t* = 0.

10.10 Операторы φ3, φ4 получены с помощью библиотеки sklearn.

Выражения (8) и (9) приняли следующий вид (ФП UКЭнас обозначен как *y*):

μ(y|t) = 0,9167m0 – 35,81(m0 / σ0)2+1,679(t)0,5, (36)

c(y|t) = 17,57(m0)0,5 + 0,3596(t)0,5, (37)

где m0, σ0 – среднее значение и стандартное отклонение ФП UКЭнас рассматриваемой выборки БТ.

**Примечание***.* Класс LinearRegression библиотеки sklearn позволяет строить уравнение множественной линейной регрессии. В построенные уравнения (36) и (37) в качестве величин, вносящих линейный вклад в значения коэффициентов, включены (m0)0,5, (t)0,5 и (m0 /σ0)2. Это позволило получить уравнения регрессии, обладающие более высокой степенью адекватности экспериментальным данным. Так, коэффициенты детерминации R2 для уравнений (36) и (37) приняли соответственно значения 0,9974 и 0,9991.

Величины μ(*y*|*t*) и *с*(*y*|*t*), определяемые по выражениям (36) и (37), являются коэффициентами математической модели деградации ФП UКЭнас.

10.11 Уточняем объём контрольной выборки. Для участия в ускоренных испытаниях (физическом моделировании наработки) было поставлено 100 экземпляров. В процессе этих испытаний у семи экземпляров возник «внезапный отказ». Используемый объём контрольной выборки составил r = 100 – 7 = 93 экземпляра.

10.12 Выбираем условие параметрической надёжности рассматриваемого типа БТ. Условие, указанное в фигурных скобках выражения (1), для рассматриваемых временны́х точек (наработок) ti = 8320, 12800 и 17280 ч выбираем в виде UКЭнас ≤ Uпотр, где Uпотр – норма на параметр UКЭнас, записанная в ТУ или указанная потребителем БТ.

10.13 Для контрольной выборки объёмом r = 93 экземпляра по формуле (33) получены прогнозные [Р(ti)]пр значения параметрической надёжности БТ для наработок ti. При использовании формулы (33) принято: *а = c*(*y*|*ti*), *b* = Uпотр.

Экспериментальная оценка уровня параметрической надёжности контрольной выборки БТ получена по отношению (35).

10.14 Значения уровня параметрической надёжности БТ, соответствующие прогнозу и экспериментальным наблюдениям, приводятся в таблице 11.

Таблица 11. – Результаты прогнозирования параметрической надёжности по ФП  
UКЭнас БТ контрольной выборки

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Принятая норма Uпотр, мВ | Вероятность Pп(ti) для времени ti | | | | | |
| 8320 ч | | 12800 ч | | 17280 ч | |
| [Pп(t1)]пр | [Pп(t1)]э | [Pп(t2)]пр | [Pп(t2)]э | [Pп(t3)]пр | [Pп(t3)]э |
| 800 | 0,635 | 0,630 | 0,588 | 0,616 | 0,551 | 0,575 |
| 900 | 0,730 | 0,726 | 0,686 | 0,699 | 0,651 | 0,685 |
| 1000 | 0,800 | 0,795 | 0,761 | 0,808 | 0,728 | 0,740 |
| 1200 | 0,891 | 0,904 | 0,861 | 0,890 | 0,835 | 0,863 |
| 1400 | 0,940 | 0,932 | 0,919 | 0,918 | 0,900 | 0,904 |
| 1600 | 0,967 | 0,959 | 0,953 | 0,945 | 0,939 | 0,932 |

Используя данные таблицы 11, по формуле (34) подсчитана средняя ошибка прогнозирования Δср параметрической надёжности БТ для различных значений норм, задаваемых на параметр UКЭнас (таблица 12).

Таблица 12. – Значения средней ошибки прогнозирования Δср ФП UКЭнас (двухпараметрическая экспоненциальная модель деградации ФП)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Принятая норма Uпотр , мВ | 800 | 900 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
| Средняя ошибка прогнозирования Δср, % | 3,60 | 3,07 | 2,55 | 2,80 | 0,60 | 0,85 |

Из таблицы 12 видно, что ошибки прогнозирования оказались приемлемыми для практики во всех временны́х точках в интервале наработок от t = 0 до t = tk = 17280 ч.

10.15 В таблице 13 для сравнения указана средняя ошибка прогнозирования Δср параметрической надёжности БТ, подсчитанная для модели деградации ФП на основе нормального распределения для тех же норм, задаваемых на ФП UКЭнас.

Таблица 13. – Значения средней ошибки прогнозирования Δср ФП UКЭнас (нормальная модель деградации ФП)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Принятая норма Uпотр , мВ | 800 | 900 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
| Средняя ошибка прогнозирования Δср, % | 22,65 | 20,59 | 17,48 | 10,64 | 3,16 | 1,39 |

Для получения нормальной модели деградации ФП следует в таблице 10 в качестве функций отклика рассматривать два последних столбца со значениями *m*(*y*|*t*) и σ(*y*|*t*), представляющими собой параметры условного нормального закона распределения для временно́й точки *t*.

Выражения (5) и (6) для нормальной модели были получены в виде (функциональный параметр UКЭнас обозначен как *y*):

*m*(y|t) = 3,25177σ0 +2,0361(t)0,5, (38)

σ(y|t) = –14,7787(m0)0,5 + 0,015936(σ0)2 + 2,2394(t)0,5. (39)

## 11 Использование методов машинного обучения для автоматизации получения прогноза и ошибки прогнозирования

11.1 Для автоматизации получения

11.2 В качестве рабочего инструмента для автоматизации использования методики рекомендуется использовать Google Colab, являющейся интерактивной облачной средой для работы с кодом на языке Python с возможностью подключения библиотек машинного обучения.

11.3 В качестве библиотек, используемых для обработки данных рекомендуется использовать библиотеки numpy (для математических операций), pandas (для матричных вычислений), scipy (для подключения законов распределения) и sklearn (для получения коэффициентов моделей методом машинного обучения). Дополнительно можно использовать библиотеки matplotlib и seaborn для визуального отображения результатов.

11.4. Печатная форма проекта в формате \*.ipynb приведена в Приложении А.

11.4 Исходными данными для загрузки