

# Методика обучающего эксперимента биполярных микросхем

С.В. Тюлевин<sup>а</sup>, М.Н. Пиганов<sup>б</sup>, Е.С. Еранцева<sup>б</sup>

<sup>а</sup> АО «РКЦ «Прогресс», 443009, ул. Земеца, 18, Самара, Россия

<sup>б</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

## Аннотация

Проведен анализ методик обучающего эксперимента полупроводниковых микросхем для индивидуального прогнозирования показателей их качества. Сделан выбор информативных параметров и средств их контроля. Обоснованы схемы включения микросхем в процессе исследовательских испытаний и режимы их контроля. Выполнен анализ конструктивно-технологических вариантов микросхем. Разработана программа исследовательских испытаний. Приведены результаты обучающего эксперимента для микросхем серии 522. Проведен анализ экспериментальных данных. Рекомендовано использовать результаты обучающего эксперимента для построения математических прогнозных моделей качества микросхем.

*Ключевые слова:* обучающий эксперимент; биполярная микросхема; методика; исследовательские испытания контроль; прогнозная модель

## 1. Введение

Выход промышленности из кризиса при открытой рыночной экономике практически невозможен без решения проблемы повышения качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Проблема повышения качества остро стоит прежде всего перед наукоемкими отраслями техники, к которым относится и микроэлектроника. Основными изделиями микроэлектроники является интегральные микросхемы (ИМС). Принято считать, что качество ИМС определяется их конструкцией, исходными материалами, сложностью и стабильностью технологических процессов. Главным звеном при этом является технология изготовления [1].

Одним из концептуальных принципов управления качеством микросхем может стать принцип сквозного управления качеством. При этом целесообразно выделить следующие контуры формирования качества: установление качества; обеспечение качества; поддержание качества; прогнозирование качества; гарантирование качества; повышение качества [2].

Таким образом, одним из основных этапов формирования качества микросхем является прогнозирование показателей их качества. Для ИМС, используемых в ответственной аппаратуре, наиболее эффективным является индивидуальное прогнозирование [3,4]. Важнейшим этапом индивидуального прогнозирования (ИП) является обучающий эксперимент.

Обучающий эксперимент – это испытание в заданном режиме определенного количества исследуемых изделий в течение требуемого времени, обычно равного времени последующего прогнозирования  $t_{пр}$ , и определение фактического состояния каждого экземпляра выборки к моменту окончания испытания. Цель обучающего эксперимента состоит в получении необходимого массива исходных данных, т.е. такого массива, который требуется для последующего обучения. Содержание массива исходных данных определяется видом ИП. Например, значений информативных параметров  $x_i$  (признаков) и прогнозируемого параметра  $y_0$  для всех экземпляров в начальный момент времени, значений прогнозируемого параметра в конечный момент времени  $y_k$ , т.е. при  $t=t_{пр}$ , промежуточных значений прогнозируемого параметра. Иногда требуется знать промежуточные и конечные значения информативных параметров.

Основой обучающего эксперимента являются исследовательские испытания. Они позволяют, кроме получения вышеуказанной информации, выявить процессы и схемы деградации элементов, установить виды и механизмы отказов, типы дефектов, диапазоны нагрузок, ускоряющих отказы. Это позволяет установить степень информативности признаков, критерии отбраковки и классификации для каждого конструктивно-технологического варианта (КТВ), выбрать наиболее информативные параметры, а также определить режимы технологических испытаний, оптимизировать исследуемый КТВ, усовершенствовать методики проведения исследовательских испытаний, обучающего эксперимента и отбраковки [5].

Наиболее сложным вопросом является определение видов и режимов испытательных воздействий. Они зависят от степени риска или меры ущерба, наносимого при эксплуатации аппаратуры. Большие проблемы возникают при выборе информативных параметров, методов и средств контроля.

Несовершенство этапа обучающего эксперимента ведет к снижению точности прогнозных моделей, увеличению условных рисков поставщика и потребителя. Цель работы – выбор информативных параметров и схем включения микросхем серии 522 при проведении обучающего эксперимента.

## 2. Анализ методик обучающего эксперимента

В работе [6] приведена общая методика обучающего эксперимента при индивидуальном прогнозировании показателей качества космических радиоэлектронных средств (РЭС). Она включает семь основных этапов:

1. Анализ конструктивно-технологических особенностей электрорадиоизделий (ЭРИ) и РЭС.

2. Разработка или выбор схем включения для контроля их работоспособности и измерения основных параметров.
3. Выбор методов и средств контроля и информативных параметров.
4. Определение объема выборки.
5. Разработка программы исследовательских испытаний.
6. Проведение исследовательских испытаний и экспериментов.
7. Анализ результатов испытаний и экспериментов.

Данная методика была апробирована на микросхемах серии 286 и показала хорошие результаты.

Авторами [5] в рамках данного общего подхода была предложена частная методика проведения обучающего эксперимента для микросхем КМОП типа. Эта методика предусматривает контроль длительности импульса рассогласования.

Для контроля информативных параметров предложена установка, содержащая наборное поле, 2 генератора прямоугольных импульсов, адаптеры, компаратор, схему усреднения, устройство индикации. В качестве информативного параметра для отбраковки ИМС использовано время задержки распространения сигнала при включении и выключении. При этом на испытуемую микросхему подают напряжение питания, близкое к критическому.

В ряде работ указываются виды испытательных воздействий при проведении диагностического прогнозирующего контроля.

Много работ посвящено выбору и анализу информативных параметров. Так, в [7] для прогнозирования качества микросхем предложено использовать уровень внутренних напряжений. Показано, что уровень внутренних напряжений зависит от режимов операций диффузии, эпитаксии, окисления и др. В [8] использовали распределения теплофизических параметров мощных транзисторов. Авторы [9] в качестве информативных параметров полупроводниковых изделий на пластине используют вольт-амперные характеристики (ВАХ), вольт-фарадные характеристики (ВФХ) или ампер-шумовые характеристики (АШХ). При этом оценивают зарядовую стабильность при воздействии коронного разряда. Информацию о качестве полупроводниковых приборов несет также  $m$ -параметр, который характеризует степень неидеальности ВАХ. Его использовали при прогнозировании долговечности транзисторов методами распознавания образов [10]. Высокую информативность при электрофизическом диагностировании микросхем КМОП типа показало критическое питающее напряжение [11]. Для контроля качества сборки цифровых интегральных микросхем целесообразно использовать параметры матрицы тепловой связи [12]. Авторы [13] для контроля качества светоизлучающих диодов и полупроводниковых лазеров предлагают использовать термомеханические напряжения. Они возникают как в результате изменения температуры окружающей среды, так и в результате резко неоднородного саморазогрева приборных структур рассеиваемой мощностью. В [14] установлено, что оценить надежность полупроводниковых приборов можно по величине механических напряжений. Они возникают из-за различия коэффициентов теплового расширения применяемых материалов. При этом изменяются концентрация неосновных носителей заряда, их подвижность и время жизни, смещаются энергетические уровни.

Прогнозировать дрейф параметров полупроводниковых приборов во времени и их долговечность позволяет  $m$ -параметр [15].

Для рода транзисторов с малой площадью эмиттера после пропускания нескольких импульсов тока через прямосмещенный эмиттерный переход в активном нормальном режиме могут возникать значительные токи утечки эмиттерного перехода, увеличивающие ток базы в микрорежиме и снижающие коэффициент усиления по току [16]. По величине тока утечки оценивают качество изделия.

Авторы [17] предлагают оценивать качество микросхем КМОП типа по величине критического питающего напряжения после воздействия электрического разряда. Достаточно информативным параметром качества многих типов полупроводниковых приборов являются низкокачественный шум.

### 3. Анализ КТВ исследуемых микросхем

Для исследования и анализа процессов контроля и испытания были выбраны микросхемы серии 522, т.к. у них ранее наблюдались отказы. Ниже приведены основные параметры микросхем 522КН.

|  |      |
|--|------|
| Остаточное напряжение на выходе микросхемы при $I=I_{\text{вых.мах.}}$ , $U_{\text{ост.}}$ , В | 0,8  |
| Напряжение несрабатывания, $U_{\text{неср}}$ , В:  |      |
| вход №4 - №3   | 0,35 |
| вход №4 - №2   | 0,7  |
| Пробивное напряжение по цепям питания, $U_{\text{прб}}$ , В                                    | 47   |
| Ток потребления в закрытом состоянии, $I_{\text{пот.}}$ , мкА                                  | 75   |
| Коэффициент возврата, К:   |      |
| не менее   | 0,35 |
| не более   | 0,85 |
| Напряжение питания, $U_{\text{пит}}$ , В   | 36   |

|  |      |
|--|------|
| Выходной ток ( $-60\dots+85^{\circ}\text{C}$ ), $I_{\text{вых}}$ , мА  | 120  |
| Мощность, рассеиваемая на корпусе микросхемы ( $-60^{\circ}\text{C}\dots+25^{\circ}\text{C}$ ), $P_{\text{расс.}}$ , Вт                                  | 0,4  |
| Величина активной нагрузки, $P_{\text{н}}$ , Ом, не менее  | 280  |
| Величина индуктивной нагрузки, $L_{\text{н}}$ , Гн, не более   | 0,22 |
| Предельно допустимое напряжение между выводами $U_{\text{пред.}}$ , В  |      |
| 1-3, 14-3, 1-2, 14-2   | 4    |
| 4-3, 2-3, 2-1, 2-14  | 36   |
| Остаточное напряжение на выходе микросхемы при отсутствии нагрузки, $U$ , В  | 0,3  |
| Максимальное значение времени переключения, мкс  | 100  |
| Максимальная рабочая частота, Гц   | 100  |
| Сопротивление схемы в открытом состоянии (при $I=I_{\text{вых. макс}}$ ), Ом   | 10   |
| Амплитуда выброса на вершине выходного импульса  | 3    |
| Проведенные авторами исследования показали целесообразность использования в качестве информативного параметра величины остаточного напряжения микросхем. |      |

#### 4. Схемы включения

Для измерения электрических параметров были предложены схемы включения, приведенные на рис. 1-5. При измерении параметров  $U_{\text{срб}}$  и  $K$  напряжение питания подается на микросхему до подачи сигналов на входы микросхемы, отключение производится в обратном порядке. В остальных случаях на микросхему подаются вначале сигналы на входы, затем напряжения питания в порядке их возрастания, отключение производится в обратном порядке.

Допускается при измерении электрических параметров и испытаниях микросхем одновременная подача и отключение напряжения питания и сигналов на входы и выходы микросхем. Погрешность установки тестовых напряжений и напряжений питания не должны превышать  $\pm 2\%$ , тестовых токов –  $\pm 4\%$ .

Измерители постоянного тока и напряжения должны иметь класс точности не хуже 1,0. Класс точности вольтметров – индикаторов уровня напряжения не регламентируется. Проверка значений напряжения питания производится вольтметром класса точности не хуже 1,0 с входным сопротивлением не менее 10кОм/В.

Метрологические аспекты контроля приведены в [18].

Измерение остаточного напряжения на выходе интегральной микросхемы при  $I=I_{\text{вых. макс}}$  проводят по схеме измерения, приведенной на рис. 1.

Величина выходного тока  $I=I_{\text{вых. макс}}$  задается (резистором  $R_3$ ) активной составляющей эквивалентна нагрузки и источником питания  $E_2$ . При соединении вывода 13 через резистор  $R_2$  с минусом  $E_2$ , микросхема подключает нагрузку к источнику питания, через  $R_3$  протекает ток  $I_{\text{вых.}}=I_{\text{вых. макс}}$ , вызывающий наличие остаточного напряжения  $U_{\text{ост.}}$ .

Величина  $U_{\text{ост.}}$  контролируется вольтметром PV.

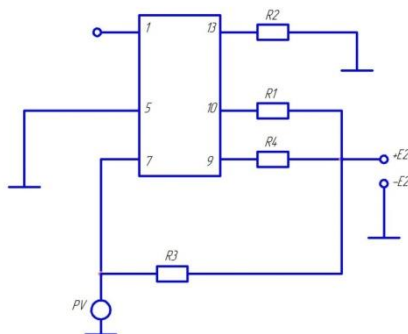


Рис.1. Схема измерения остаточного напряжения.

Измерение напряжения срабатывания  $U_{\text{срб}}$  проводят по схеме, приведенной на рис. 2.

Напряжением срабатывания  $U_{\text{срб}}$  называется минимальное напряжение, поданное на вход микросхемы, которое вызывает подключение нагрузки к источнику питания.

У микросхемы имеются два управляющих входа: вход №4 - №3 и вход №4 - №2.

Величина напряжения  $U_{\text{срб}}$  задается дискретно источниками питания  $E_4 - E_8$ . Наличие или отсутствие подключения нагрузки к источнику питания регистрирует вольтметр PV – индикатор уровня напряжения.

Измерение напряжения несрабатывания  $U_{\text{нсрб}}$  проводят по той же схеме измерения (рис. 2).

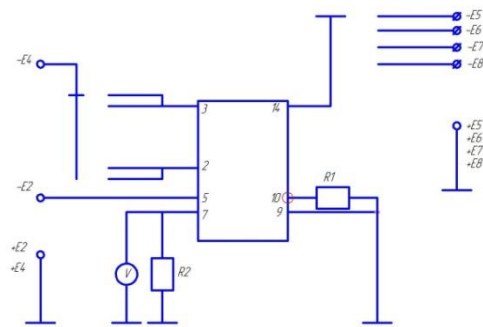


Рис.2. Схема измерения напряжения срабатывания.

Напряжением несрабатывания  $U_{нсрб.}$  называется максимальное напряжение, поданное на вход микросхемы, которое еще не вызывает подключение нагрузки к источнику питания.

Величина напряжения  $U_{нсрб.}$  задается дискретно источниками питания  $E_4 - E_8$ .

В интервале напряжений между напряжениями  $U_{нсрб.}$  и  $U_{срб.}$  для одного и того же управляющего входа микросхема может как подключать нагрузку к источнику питания, так и не подключать ее.

Измерение тока потребления в закрытом состоянии  $I_{пот.}$  микросхемы и пробивного напряжения по цепям питания проводят одновременно по схеме измерения, приведенной на рис. 3.

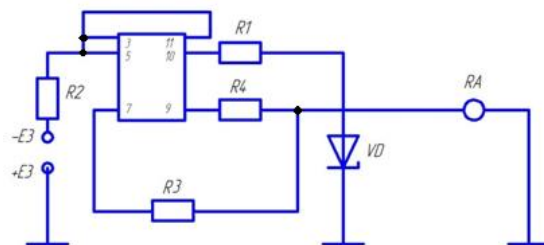


Рис.3. Схема измерения тока потребления и пробивного напряжения.

Ток потребления в закрытом состоянии – это ток, протекающий по цепям питания микросхемы, когда микросхемой на нагрузку не подано напряжение питания.

Пробивное напряжение по цепям питания – это максимальное напряжение, подаваемое на микросхему по цепям питания, которое еще не вызывает подключение нагрузки к источнику питания без подачи входного сигнала.

Ток потребления  $I_{пот.}$  контролируется микроамперметром RA, напряжение пробоя  $U_{пр.}$  задается источником питания  $E_3$ . При несоответствии микросхемы требованиям ТУ по пробивному напряжению  $U_{пр.}$ , ток потребления  $I_{пот.}$  будет больше значений, указанных в ТУ.

Контроль функционирования на максимальной рабочей частоте 100 Гц проводят по схеме контроля, приведенной на рис. 4.

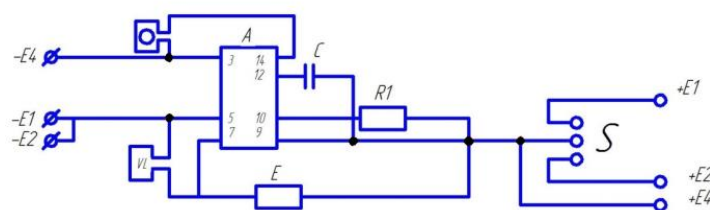


Рис.4. Схема контроля функционирования микросхем.

Испытание на безотказность проводят по методу 700-1 ОСТ 11 073.013-83 при температуре  $+85^{\circ}\text{C}$ . Схема включения при испытаниях приведена на рис. 5.

Время выдержки в нормальных условиях перед измерением параметров – 2ч.

Некоторые вопросы повышения эффективности контроля ЭРИ приведены в [19-24].

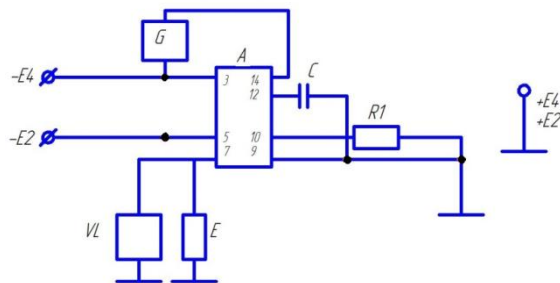


Рис.5. Схема испытаний микросхем на безотказность и долговечность.

## 5. Заключение

Проведенный анализ выявил ряд проблем при проведении обучающего эксперимента с биполярными микросхемами: отсутствие апробированных схем включения при проведении исследовательских испытаний и низкая информативность параметров при разработке прогнозных моделей. Для микросхем серии 522 в качестве информативного параметра рекомендовано использовать величину остаточного напряжения. Предложены схемы измерения остаточного напряжения, напряжения срабатывания, тока потребления, контроля функционирования, испытания на безотказность.

## Литература

- [1] Пиганов, М.Н. Технологические основы обеспечения качества микросборок / М.Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. –231 с.
- [2] Пиганов, М.Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок / М.Н. Пиганов. – М.: Новые технологии, 2002. –267 с.
- [3] Жаднов, В.В. Прогнозирование надёжности электронных средств с механическими элементами / В. В. Жаднов. – Екатеринбург: Издательство ООО “Форт Диалог-Исеть”, 2014.-172с.
- [4] Кейджян, Г.А. Прогнозирование надёжности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС / Г.А. Кейджян. – М.: Радио и связь, 1987. –152 с.
- [5] Тюлевин, С.В. К проблеме прогнозирования показателей качества элементов космической аппаратуры / С.В. Тюлевин, М.Н. Пиганов, Е.С. Еранцева // Надёжность и качество сложных систем. – 2014. - № 1(5). – С. 9-17.
- [6] Тюлевин, С.В. Методика обучающего эксперимента при индивидуальном прогнозировании показателей качества космических РЭС / С.В. Тюлевин, М.Н. Пиганов // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. всеросс. НТК. – Самара: СГАУ, 2008. – С. 239-253.
- [7] Беренштейн, Г.В. Прогнозирование качества ИС на основе анализа внутренних напряжений / Г.В. Беренштейн, А.М. Дьяченко // Физические основы надёжности и деградации полупроводниковых приборов: тоз. докл. всесоюз. конф.- Кишинёв, 1991.- Ч. II.-С.36.
- [8] Сергеев, В.А. Характеристики и особенности выборочных распределений мощных биполярных транзисторов по теплофизическим параметрам / В.А. Сергеев // Известия Самарского научного центра РАН.- 2004. - № 1.- С.154-160.
- [9] Горлов, М.И. Устройство для контроля зарядовой стабильности полупроводниковых изделий с использованием коронного разряда / М.И. Горлов, А.П. Жарких // Патент РФ 2312424. Опубл. 10.12.2007. Бюл. №34.
- [10] Лучино, А.И. Исследование возможности индивидуального прогнозирования долговечности транзисторов методом распознавания образов / А.И. Лучино, А.С. Савина // Электронная техника. Сер.8.- 1976. -Вып.10.- С.3-9.
- [11] Аладинский, В.К. Критическое питающее напряжение как информативный параметр при электрофизическом диагностировании КМОП ИС / В.К. Аладинский, В.Ю. Гаврилов, Е.Н. Горелкина // Электронная техника. Сер.2.- 1990. - Вып.4.- С.87-90.
- [12] Сергеев, В.А. Контроль качества цифровых интегральных микросхем по параметрам матрицы тепловой связи / В.А. Сергеев, В.В. Юдин // Известия ВУЗов. Электроника.- 2009. - № 6.- С.72-78.
- [13] Chang, M.H. Light emitting diodes reliability review / M.H. Chang, D. Das, P.V. Varde, M. Pecht // Microelectronics Reliability. – 2012. - №5.- P. 762-782.
- [14] Kuba, J. Application of low temperature infailure diagnostics of semiconductor devices / J. Kuba // Power Semic. Hybrid Device – th Jnt. Spring Semin. Electrotechnol. Prenet May 1985.- P. 31-34.
- [15] Клешко, В.М. Контроль качества и надёжности полупроводниковых приборов с помощью m- характеристик / В.М. Клешко, А.С. Семёнов // Электронная техника. Сер.8. – 1974. - Вып. 12.- С. 17-21.
- [16] Watchik R., Bucelot T., Li G. // J. Appl. Phys.- 1998. - №9.- P. 4734-4740.
- [17] Горлов, М.И. Воздействие электростатических разрядов на критические напряжения питания ИС типа К561ЛН3 / М.И. Горлов, А.А. Винокуров // Твёрдотельная электроника, микроэлектроника и наноэлектроника: сб. науч. тр.- Воронеж: ВГТУ. - 2011. - Вып.10.- С. 96-98.
- [18] Пиганов, М.Н. Метрологические аспекты обеспечения качества микросборок / М.Н. Пиганов // Современные информационные и электронные технологии: Труды 3-й междуна. НПК.- Украина, Одесса, 2002. – С.140.
- [19] Mishanov, R. Individual forecasting of quality characteristics by an extrapolation method for the stabilitrans and the integrated circuits / R. Mishanov, M. Piganov // The experience of designing and application of CAD systems in Microelectronics (CADSM 2015): Proceeding XIII international conference.- Ukraine, Lviv, 2015.-P. 242- 244. DOI: 10.1109/CADSM.2015.7230846.
- [20] Piganov, M. Individual prognosis of quality indicators of space equipment elements / M. Piganov, S. Tyulevin, E. Erantseva // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM 2015): Proceeding XIII international conference.- Ukraine, Lviv, 2015.-P. 367- 371. DOI: 10.1109/CADSM.2015.7230878.
- [21] Piganov, M.N. Apparatus diagnostic for non-destructive control chip CMOS-Type / M.N. Piganov, S.V. Tyulevin, E.S. Erantseva, R.O. Mishanov // European science and technology: materials of the VIII international research and practice conference. – Germany: Munich, 2014. – P. 398-401.
- [22] Jonson, J.B. The shotiky effect in box frequency circuit / J.B. Jonson // Phys. rev, 1925. v. 26. – P. 71-85.
- [23] Mishanov, R.O. The installation of diagnostic non-destructive control for the bipolar ICs / R.O. Mishanov // Science and education: materials of the VII international research and practice conference . – Germany: Munich, 2014. – P. 227-232.
- [24] Mishanov, R.O. Technology of diagnostic for non-destructive control of the bipolar integrated circuits / R.O. Mishanov, M.N. Piganov // Sense. Enable. Spitse: proceedings 2<sup>nd</sup> international scientific symposium. - Russia, St. Peterburg, 2015.-P. 38-41.