

УДК 621.385.2

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЕРИЙНЫХ ДИОДОВ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СРЕДНЕГО ТОКА

Беспалов Н. Н., Ильин М. В.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск,
Научно-производственное предприятие «Электронная техника – МГУ»
Тел. +7(8342) 24-37-05. E-mail: bnn48@mail.ru, imike@rambler.ru

Аннотация. Рассматриваются результаты экспериментального исследования тепловых и электрических параметров и характеристик серийных диодов для оценки вариации их величин и возможности оценки качества изготовления диодов по величине предельного среднего тока.

Summary. The results of an experimental research of thermal and electrical parameters and characteristics of serial diodes for an estimation of a variation of their values and opportunity of an estimation of quality of manufacturing of diodes on value of a limiting average current are considered.

Ключевые слова: диод, параметр диода, характеристика, измерение, качество изготовления, предельный средний ток.

Постановка задачи

При серийном изготовлении диодов абсолютной идентичности приборов по различным величинам параметров в пределах одного типа достичь невозможно из-за технологической нестабильности процесса производства. В связи с этим на предприятиях изготовителях разработаны и применяются методы и аппаратура для измерения, определения и контроля электрических и тепловых параметров этих широко применяемых приборов.

Важнейшим предельным электрическим параметром диодов является предельный ток I_{FAVm} , величина которого для каждого типа приборов устанавливается на основе величины другого важного теплового параметра – теплового сопротивления переход-корпус в состоянии теплового равновесия R_{thjc} . Установление паспортного значения параметра I_{FAVm} для каждого типа приборов ведется на этапах конструирования и предварительных испытаний. В дальнейшем при серийном производстве этот параметр для каждого прибора не определяется, а осуществляется только выборочный контроль по информативным косвенным параметрам, например, по импульсному напряжению в открытом состоянии U_{FM} или по косвенному параметру — индексу R_{th} . Связано это прежде всего с тем, что при серийном производстве возможно осуществлять измерение, определение и контроль только тех параметров и теми методами, которые не требуют больших затрат времени и энергии. В связи с этим, учитывая естественную технологическую нестабильность производства, и устанавливается в соответствии с заданным риском производителя пониженные предельные значения I_{FAVm} и, соответственно, повышенные предельные значения R_{thjc} и U_{FM} . Это существенно снижает предельные возможности типа приборов, хотя дает определённый запас надёжности генеральной совокупности приборов, однако при этом нет гарантии, что величина I_{FAVm} изначально определена объективно, а также то, в эксплуатацию не попадут потенциально ненадёжные приборы. В связи с этим актуальным является задача объективного определения качества диодов по предельной величине I_{FAVm} .

Экспериментальные исследования

Существующие методы определения теплового сопротивления R_{thjc} имеют низкую производительность и при серийном производстве не применимы. Для сокращения временных затрат процесса измерения и контроля тепловых параметров каждой единицы

выпускаемой продукции, разработаны косвенные методы оценки. Например, для серийно выпускаемых диодов типа КД2969, рассчитанных на $I_{FAVm} = 45$ А, определение теплового сопротивления R_{thjc} каждого прибора не производится ввиду сложности процесса его определения, однако в технологическом процессе изготовления на основе стандартного метода [1] осуществляется проверка по косвенному параметру – индексу R_{th} . Индекс R_{th} представляет собой изменение прямого напряжения ΔU_F при нагреве полупроводниковой структуры (ПС) в результате протекания определенного постоянного тока за определённый промежуток времени. Экспериментально для приборов данного типа установлена предельная максимальная величина ΔU_{Fmax} , которая является контрольной мерой для отбраковки приборов по косвенному параметру — индексу R_{th} .

Однако, на основе результатов измерения индекса R_{th} по методу [1] однозначно нельзя сказать о качестве теплового контакта поверхностей полупроводникового кристалла и корпуса, что не позволяет оценить конкретные значения R_{thjc} и, соответственно, I_{FAVm} . Это обусловлено тем, что при определении величины R_{thjc} необходимо знать разность температур полупроводниковой структуры T_j и корпуса диода T_C , и мощность потерь в структуре P_{totAV} . При условии, что за время протекания импульса тока при испытании, перегрев корпуса равен нулю, разность температур T_j и T_C пропорциональна ΔU_F , а коэффициентом пропорциональности является температурный коэффициент напряжения (ТКН). Значения ТКН каждого прибора при прочих равных условиях измерения различны [2]. Однако, в известном методе [1] это обстоятельство не учитывается. Величина мощности потерь P_{totAV} также не определяется. В результате использования косвенного параметра — индекса R_{th} возможно проводить только отбраковку приборов с повышенными значениями этого параметра.

Этот подход к оценке качества приборов правомерен в условиях серийного производства, так как при решении поставленной задачи отбраковки приборов с относительно пониженной теплопередачей этот метод является относительно высокопроизводительным. Однако для подбора приборов для особых применений в преобразователях, к которым следует отнести, например, групповое соединение, необходима более объективная оценка качества приборов. В связи с этим, предлагается производить оценку качества изготовления приборов для таких применений по величине предельного параметра I_{FAVm} .

Для сравнения оценки качества отбраковки приборов по известному методу [1] и разработанному нами методу оценки качества, описание которого приведены в [3, 4], проведены экспериментальные исследования тепловых и электрических параметров и характеристик диодов. В качестве исследуемых приборов были выбраны широко применяемые серийные диоды типа КД2969 с паспортными значениями $I_{FAVm} = 45$ А и $R_{thjc} = 1$ °С/Вт. Диоды этого типа выпускаются в двух конструктивных исполнениях и отличаются по конструкции соединения ПС к основанию корпуса. Диоды первого вида имеют спай катода ПС с основанием корпуса (ОК) (рис. 1а), второго вид — анода и основания корпуса (ОА) (рис. 1б).

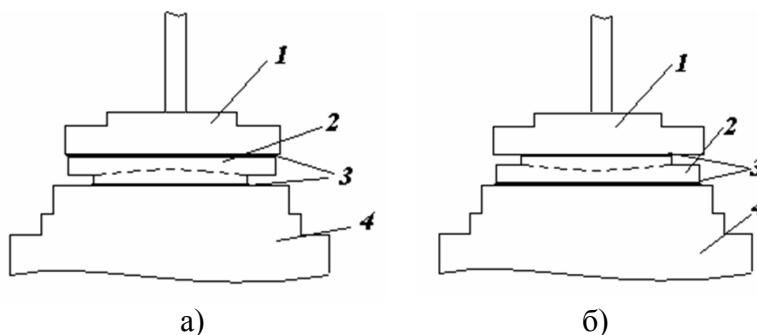


Рис. 1. Конструкции диодов КД2969: а) спай катода с основанием корпуса; б) спай анода с основанием корпуса, где 1 – верхний вывод конструкции; 2 – полупроводниковая структура; 3 – припой; 4 – основание корпуса.

Для исследования была произведена выборка приборов в количестве 43 штук. Количество диодов первого вида в выборке составляло 21 шт., а второго вида – 22 шт.

Исследования осуществлялись при помощи разработанного аппаратно-программного комплекса АД ИП-6 [5]. В результате исследования были определены следующие параметры и характеристики этих приборов: $T_{KH}(I_F)$, $U_{F0}(T_j)$, $r_T(T_j)$, R_{thjc} , I_{FAVm} . Данные по значениям индекса R_{th} испытуемой выборки приборов представлены предприятием изготовителем.

На рис. 2 — 4 представлены экспериментальные зависимости $T_{KH}(I_F)$, $U_{(T0)}(T_j)$, $r_T(T_j)$ для некоторых диодов испытуемой партии приборов.

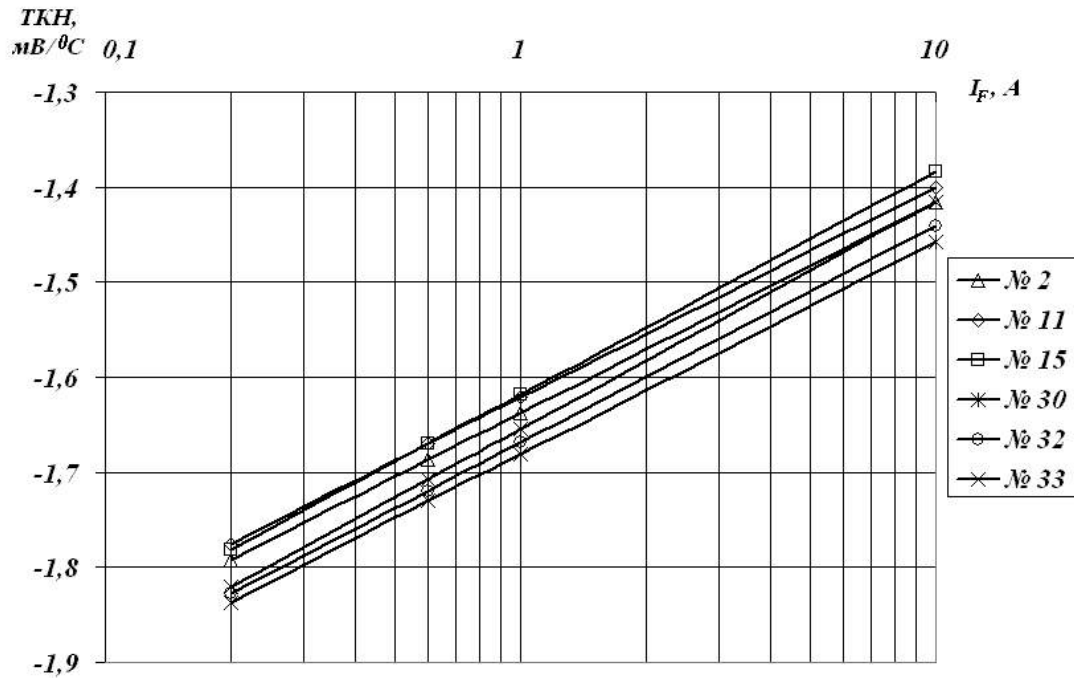


Рис. 2. Зависимости ТКН некоторых диодов от величины прямого постоянного тока I_F .

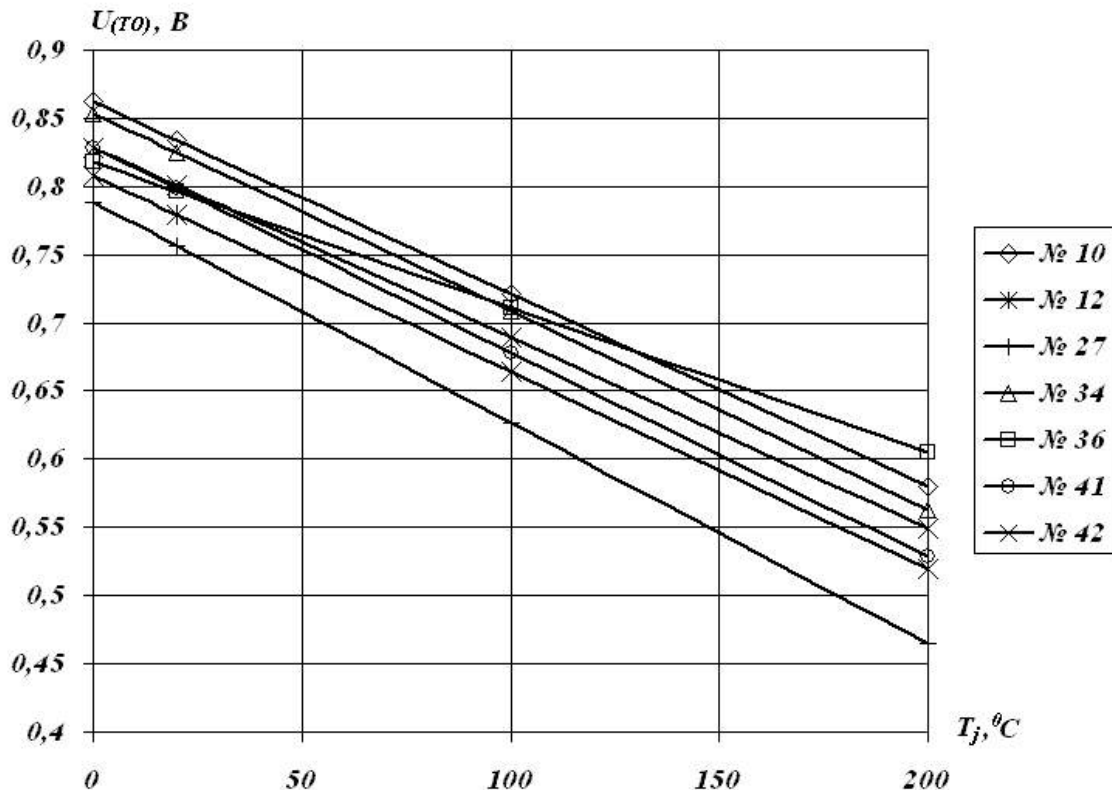


Рис. 3. Зависимости порогового напряжения $U_{(T0)}$ некоторых диодов от T_j

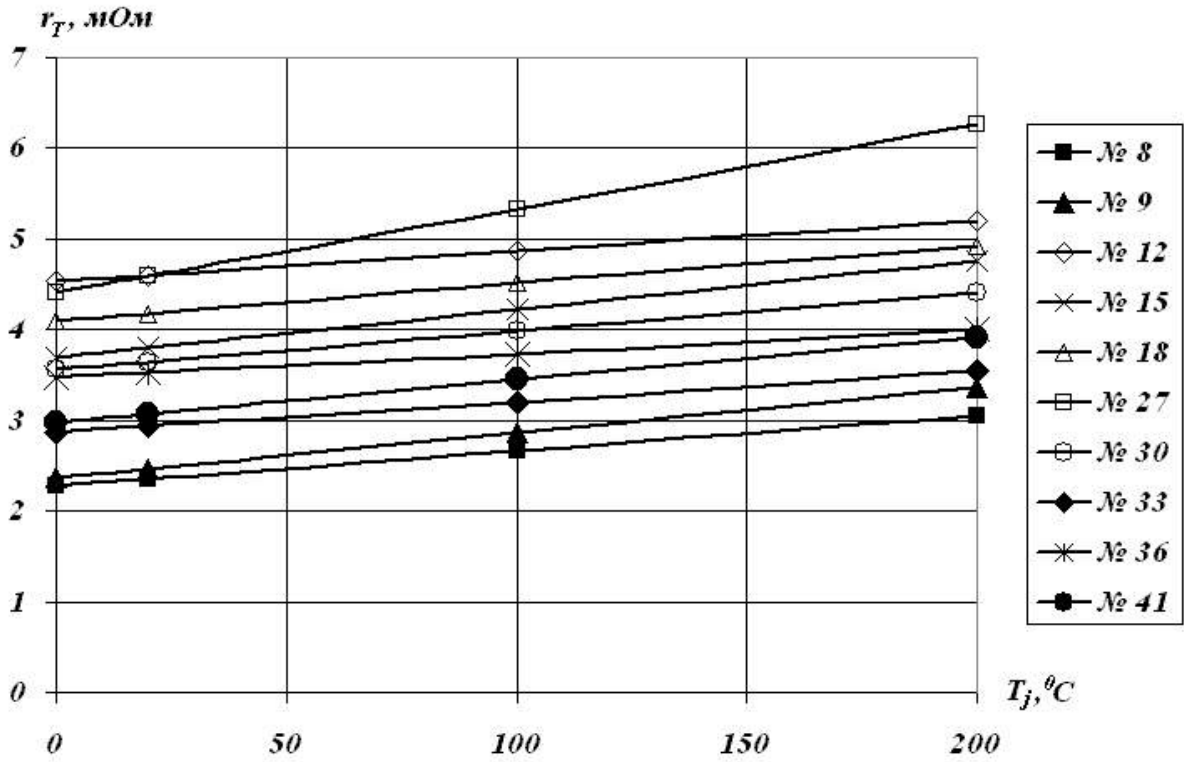


Рис. 4. Зависимости дифференциального сопротивления r_T некоторых диодов от T_j

На графиках (рис. 2 — рис. 4) представлены несколько зависимостей, которые отображают диапазон разброса характеристик в партии приборов. Из графиков видно, что представленные характеристики каждого диода имеют отличные друг от друга параметры наклона и смещения. Данные исследования доказывают, что каждый прибор имеет характерный только для него набор величин параметров и характеристик.

На рис. 5 — 6 представлены распределения по величинам R_{thjc} внутри подгрупп приборов с ОК и с ОА.

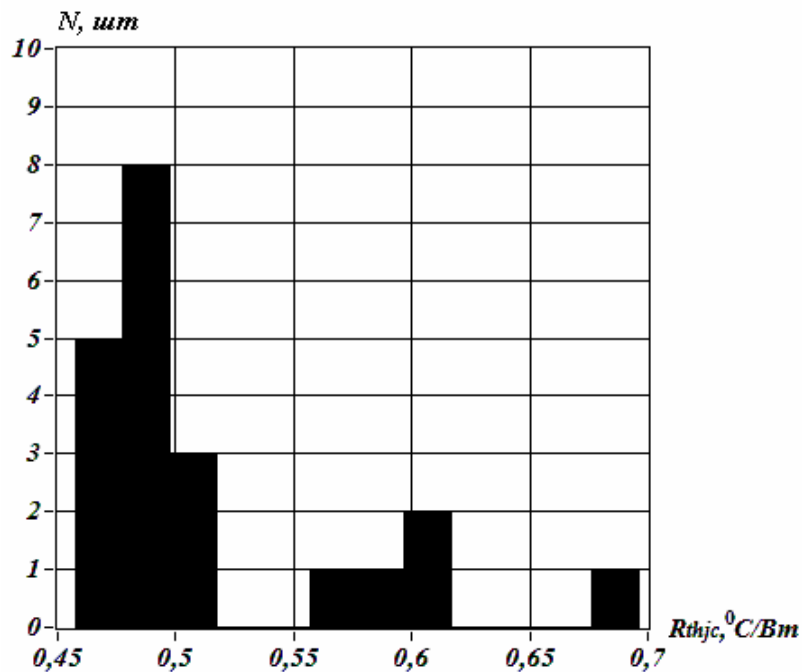


Рис. 5. Распределение величин R_{thjc} диодов с ОК.

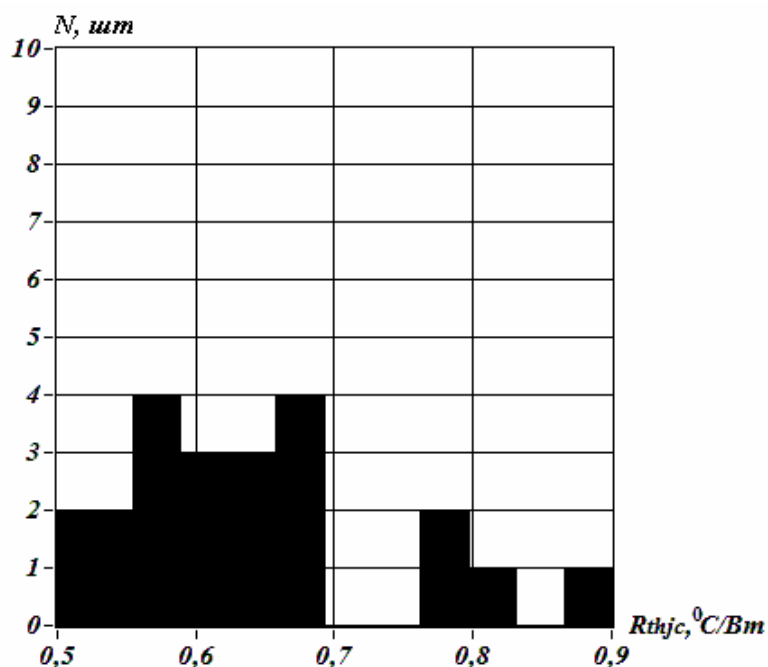


Рис. 6. Распределение величин R_{thjc} диодов с ОА.

Оценивая параметры распределения значений R_{thjc} приборов с ОА и с ОК, были получены следующие значения медиан и дисперсий. Для группы с ОК медиана равна $0,489 ^\circ\text{C/Wt}$ и дисперсия — $0,00395$; для группы с ОА медиана — $0,621 ^\circ\text{C/Wt}$, а дисперсия $0,0108$.

Сравнивая медианные значения распределения значений R_{thjc} можно сделать вывод, что значения R_{thjc} приборов с ОА больше чем с ОК на $0,132 ^\circ\text{C/Wt}$. Различие значений R_{thjc} приборов с ОК и с ОА объясняется тем, что толщина подложки ПС, которая является анодом, имеет большую толщину (230 мкм), чем область катода (40 мкм). В зависимости от того, какой стороной ПС спаяна с основанием корпуса, определяется путь теплового потока от $p-n$ -перехода к основанию корпуса. Тепловой поток проходит путь либо через значительную по толщине подложку к аноду, либо через более тонкую область катода. Толщина полупроводниковых слоёв отличается почти в шесть раз, поэтому наблюдается разница тепловых сопротивлений R_{thjc} у приборов с ОА и с ОК.

Также видно, что в партии имеются приборы с повышенными значениями R_{thjc} . Основная причина повышенных значений R_{thjc} паяных приборов является некачественный спай ПС с другими элементами конструкции корпуса. Величина R_{thjc} повышается за счёт газовых промежутков, которые образуются в слое припоя в процессе пайки ПС к элементам конструкции корпуса прибора. Фотография диода из испытываемой партии с некачественным спаем приведена на рис. 7.



Рис. 7. Диод КД2969 с дефектом спая ПС и корпуса прибора.

На фотографии диода на рис. 7 виден перекус ПС относительно основания корпуса. В результате этого часть ПС не контактирует с основанием корпуса. Под ПС образовалась воздушная прослойка, которая препятствует распространения теплового потока к основанию корпуса прибора. Величина R_{thjc} значительно повышена и составляет $0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Это обстоятельство доказывает появление в генеральной совокупности потенциально ненадёжных приборов.

В результате эксперимента и обработки данных для всех типов исследуемых приборов получена следующая линейная регрессионная зависимость между величинами индекса R_{th} — ΔU_F и R_{thjc} . На рис.8 представлены поле корреляции и линейная регрессионная зависимость между величинами ΔU_F и R_{thjc} .

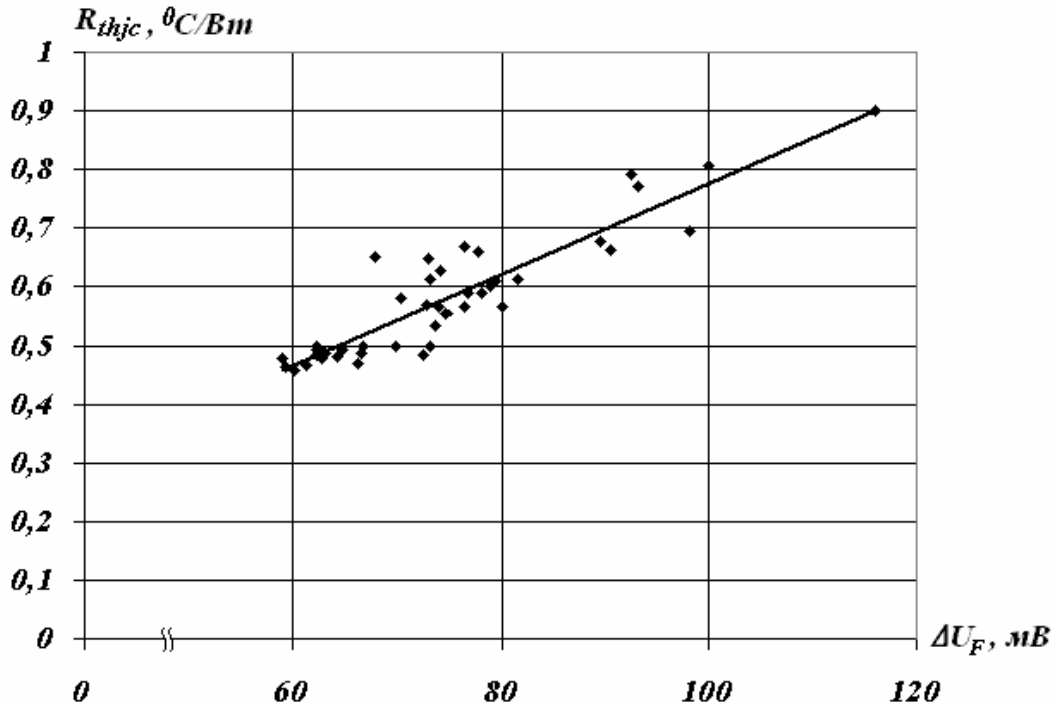


Рис. 8. Поле корреляции индекса ΔU_F и R_{thjc} партии диодов.

Коэффициент линейной корреляции между величинами ΔU_F и R_{thjc} при этом составил величину $r = 0,837$. Линейная регрессионная зависимость описывается выражением:

$$R_{thjc} = -0,0043 + 0,0078\Delta U_F . \quad (1)$$

Полученные результаты указывают на относительно высокую статистическую корреляцию между рассматриваемыми параметрами. Однако наблюдаемая статистическая связь не позволяет однозначно установить величину теплового сопротивления R_{thjc} прибора по изменению прямого напряжения ΔU_F в результате нагрева, так как в этой статистической связи косвенно наблюдается влияние других дополнительных факторов к которым, прежде всего, необходимо отнести разброс величин ТКН приборов.

Определённые выше тепловые и электрические параметры и характеристики отражают собой качество изготовления каждого прибора. Как видно из исследований представленных выше каждый прибор имеет свои собственные значения параметров. Однако оценка качества приборов только по электрическим параметрам или только по тепловым параметрам не является достаточной. Интегральной оценкой прибора, которая учитывает взаимосвязь электрических и тепловых параметров прибора, является предельный параметр I_{FAVm} , который отображает реальную картину о качестве изготовления прибора в целом.

Нами предлагается определять I_{FAVm} на основе измеренных и определённых путем

вычислений с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса АДПП-6 [5] величин электрических и тепловых параметров и характеристик диодов по формуле:

$$I_{FAVm} = \frac{\sqrt{U_{(TO)}^2(T_{jm}) + 4k_{\phi}^2 r_T(T_{jm}) \frac{T_{jm} - T_a}{R_{thja}} - U_{(TO)}(T_{jm})}}{2k_{\phi}^2 r_T(T_{jm})}, \quad (2)$$

где $U_{(TO)}(T_{jm})$ — пороговое напряжение, определяемое по прямой ветви ВАХ диода, при максимально допустимой температуре ПС T_{jm} , $r_T(T_{jm})$ — дифференциальное сопротивление диода при T_{jm} , R_{thja} — тепловое сопротивление охладитель-охлаждающая среда в состоянии теплового равновесия, T_a — температура окружающей среды, k_{ϕ} — коэффициент формы тока.

Определение I_{FAVm} для конкретного прибора и для конкретных условий охлаждения по измеряемым и определяемым электротепловым параметрам позволяет более точно оценить этот важнейший предельный параметр и коэффициент запаса по току для каждого прибора силового блока преобразователя. Определение этого параметра предлагаемым способом позволяет также объективно определять статистическое распределение его величины в генеральной совокупности приборов, что важно при их производстве.

Определение I_{FAVm} испытуемой выборки приборов проводилось специальной программой измерительно-испытательного комплекса по разработанной методике для следующих паспортных величин предельных параметров диодов КД2969 и условий охлаждения, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Паспортные величин предельных параметров диодов КД2969 и условия охлаждения

I_{FAVm} (по ТУ), А	T_{jm} , °С	R_{thca} , °С/Вт	T_a , °С
45	200	3,8	60

Условия охлаждения диодов, то есть значение теплового сопротивления R_{thca} выбрано равным 3,8 °С/Вт, что соответствует охлаждению диодов при их установке внутри выпрямительного блока генератора двигателя внутреннего сгорания, где находят применение эти приборы.

Результаты обработки измерений в виде распределения величин I_{FAVm} в испытуемой партии приборов представлены на рис. 9.

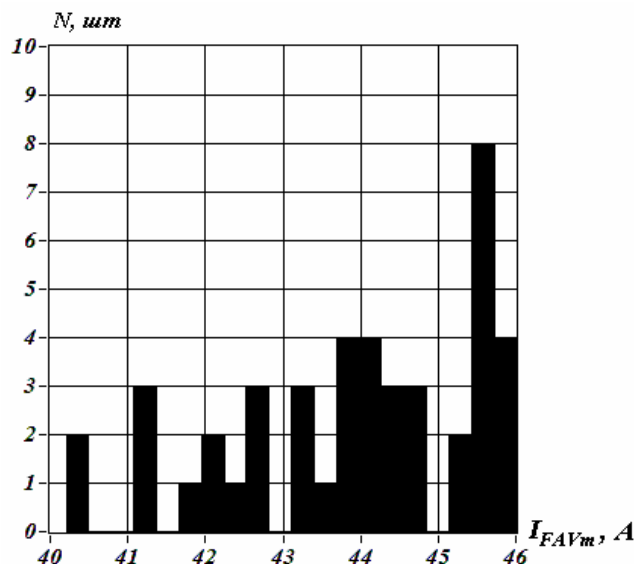


Рис. 9. Распределение по значениям I_{FAVm} в партии диодов КД2969.

Как видно из рис. 9 значения I_{FAVm} только 14 диодов из 43 находятся выше установленной предельной величины равной 45 А, установленного в паспорте прибора, что составляет всего 32,5 % приборов из рассматриваемой выборки. Остальные 29 диодов (67,5 %) имеют значения I_{FAVm} меньше 45 А. Минимальное значение I_{FAVm} в партии составило 40,2 А. При этом все приборы из выборки имеют значения R_{thjc} меньше паспортного значения, установленного для этого типа приборов, однако в исследуемой выборке обнаружены потенциально ненадежные приборы, что свидетельствует о неэффективности оценки качества приборов только по тепловым параметрам или электрическим параметрам.

Вывод

Проведённые исследования показывают, что интегральная оценка качества приборов по предельному параметру I_{FAVm} , определяемому на основе измеряемых и определяемых совместно величин электрических и тепловых параметров в ходе единого испытания позволяет более объективно оценить качество изготовления приборов и оценить предельные возможности каждого прибора. Также знание величин этого параметра каждого прибора позволяет по установленной мере выявлять и отбраковывать потенциально ненадежные приборы, что особо важно при создании преобразователей на основе группового соединения силовых полупроводниковых диодов.

Литература

1. ОСТ 11 0944 – 96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчёта, измерения и контроля теплового сопротивления.
2. Беспалов, Н. Н. Исследование термочувствительного параметра полупроводниковых диодов / Н. Н. Беспалов, М. В. Ильин // Технические и естественные науки: проблемы, теория, эксперимент (Межвузовский сборник научных трудов). – Саранск, 2005. – Вып. V.– С. 29 – 30.
3. Беспалов, Н. Н. Метод определения тепловых характеристик силовых полупроводниковых приборов // Н. Н. Беспалов, Ю. М. Голембиовский, М. В. Ильин // Вестник СГТУ, 2007. – № 2 (24) Выпуск 1. – С. 88 – 94.
4. ПАТЕНТ 2300115 РФ, МПК7 G 01 R 31/26. Способ определения теплового сопротивления переход-корпус силовых полупроводниковых приборов в корпусном исполнении / Н. Н. Беспалов (RU), М. В. Ильин (RU). – № 200610336; заявлено 02.02.2006; опубл. 27.05.2007, Бюл. № 15. – 642 с.
5. Беспалов, Н. Н. Диагностика и контроль параметров силовых полупроводниковых приборов / Н. Н. Беспалов, А. В. Мускатиньев, М. В. Ильин // Методы и средства управления технологическими процессами: МСУТП – 2007: материалы IV Междунар. Конф., Саранск, 24 – 26 окт. 2007 г. / редкол.: И. В. Гуляев (отв. ред.) [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – С. 88 – 91.