

10. NEW IEEE 802.11ac™ SPECIFICATION DRIVEN BY EVOLVING MARKET NEED FOR HIGHER, MULTI-USER THROUGHPUT IN WIRELESS LANS. IEEE-STANDARDS ASSOCIATION. Available at: http://standards.ieee.org/news/2014/ieee_802_11ac_ballot.html (accessed 09.02.2014).

11. Static-3d-survey. Optech. Available at: <http://www.optech.com/index.php/products/static-3d-survey/> (accessed 05.07.2014).

УДК 681.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕХОД-КОРПУС СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ ПО ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

Статья поступила в редакцию 05.04.2014, в окончательном варианте 05.09.2014.

Ершов Андрей Борисович, кандидат технических наук, Ставропольский государственный аграрный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12, e-mail: erschow157500@yandex.ru

Хорольский Владимир Яковлевич, доктор технических наук, Ставропольский государственный аграрный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12.

Хабаров Алексей Николаевич, кандидат технических наук, Технологический институт сервиса (филиал) Донского государственного технического университета, 355035, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Кулакова, 41/1, e-mail: habrw@yandex.ru

Ефанов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, Ставропольский государственный аграрный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12, e-mail: yefanov@mail.ru

В статье рассмотрены современные тенденции, определяющие рост требований к надёжности систем электротехнического и электронного оборудования, основные подходы к определению количественных параметров и характеристик функциональной надёжности данных систем и их элементов. Проанализированы проблемы в определении нормативных требований, определяющих методы измерения величины статического теплового сопротивления (СТС) «переход-корпус» силовых полупроводниковых диодов (СПД) с целью их дополнения и последующего внесения в технические условия на производство приборов. Предложен новый метод измерения величины СТС «переход-корпус» СПД по переходной функции термочувствительного параметра. Этот метод позволяет определять СТС без непосредственного измерения температуры корпуса прибора и обеспечивает тем самым возможность сквозного контроля данного параметра при производстве СПД. Авторами рассмотрены принципы аналитического описания переходной функции термочувствительного параметра как решения: обыкновенного дифференциального уравнения показательного роста; жёсткой системы линейных дифференциальных уравнений. Обоснованы принципы обеспечения неразрушающего контроля СПД по параметру греющего тока. В статье описаны основные проблемы в технике измерения величины теплового сопротивления «р-п-переход-корпус» по переходной функции термочувствительного параметра и предложены пути их решения. Авторами представлены также результаты измерений при сквозном контроле величины СТС «переход-корпус» для опытных образцов СПД штыревой конструкции, рассчитанных на токи до 25 А.

Ключевые слова: силовые диоды, тепловое сопротивление, методы измерения, температура р-п перехода, греющий ток, температура корпуса, переходная функция, термочувствительный параметр, точность определения переходной функции, сквозной контроль параметров

**DETERMINATION OF THERMAL RESISTANCE
TRANSITION-THE CASE OF THE POWER SEMICONDUCTOR DIODES
ON THE TRANSITION FUNCTIONS TEMPERATURE-SENSITIVE PARAMETER**

Yershov Andrey B., Ph.D. (Engineering), Stavropol State Agrarian University, 12 Zootekhnikheskiy pereulok, Stavropol, 355017, Russian Federation, e-mail: erschow157500@yandex.ru

Khorolskiy Vladimir Ya., D.Sc. (Engineering), Stavropol State Agrarian University, 12 Zootekhnikheskiy pereulok, Stavropol, 355017, Russian Federation

Khabarov Aleksey N., Ph.D. (Engineering), Technological Service Institute (branch) of Don State Technical University, 41/1 Kulakov St., Stavropol, 355035, Russian Federation, e-mail: habrw@yandex.ru

Yefanov Aleksey V., Ph.D. (Engineering), Stavropol State Agrarian University, 12 Zootekhnikheskiy pereulok, Stavropol, 355017, Russian Federation, e-mail: yefanov@mail.ru

The paper considers the current trends, determining the growth requirements for system reliability electrical and electronic equipment, the main approaches to the determination of quantitative parameters and characteristics of the functional reliability of these systems and their elements. In article are analyzed problems in defining regulatory requirements, defining methods for measurement of static thermal resistance (STR) "transition -case" power semiconductor diodes (PSD) with the purpose of the amendments and subsequent inclusion in the technical specifications for the manufacturing of devices. Proposed new method of measurement for STR "transition-case" PSD for the transition function of temperature-sensitive parameter. This method allows to determine the STR without direct measurement temperatures of the casing and thereby provides the possibility of end-to-end control of this parameter in the production of the SPD. The authors considered the principles of analytical description of the transition function for temperature-sensitive parameter, as the decision of: a ordinary differential equations exponential growth; a rigid system of linear differential equations. Cycles provide non-destructive testing PSD for setting the heating current. The article describes fixed issues in the technique of measurement of the thermal resistance of the «p-n junction-case» transition function of temperature-sensitive parameter and are proposed ways for their solutions. The authors also presented the results of measurements when the through-rate control STR "transition-case" for prototypes PSD with probe design for currents up to 25 A.

Keywords: power diodes, thermal resistance, methods of measurement, the temperature of the p-n junction, the heating current, the temperature of the enclosure, the transfer function of the sensing parameter, the accuracy of determination of the transition functions, skvoznoi control parameters

Силовые полупроводниковые диоды (СПД) играют важную роль в современной электротехнике и электронике. Их надежность во многом определяет надёжность технических систем, электронного и электротехнического оборудования в целом.

В простейшем случае электронную (электротехническую) систему можно рассматривать как систему, которая может находиться в двух возможных состояниях – работоспособном, либо неработоспособном. Если переход из работоспособного состояния в неработоспособное характеризовать интенсивностью отказов λ , а переход из неработоспособного в работоспособное состояние – интенсивностью восстановления μ , то дифференциальные уравнения относительно вероятностей вышеуказанных переходов имеют вид

$$P'(t) = -\mu Q(t) + \lambda P(t), \quad (1)$$

$$Q'(t) = \mu Q(t) - \lambda P(t), \quad (2)$$

где $Q(t)$ – вероятность нахождения системы в неработоспособном состоянии, а $P(t)$ – в работоспособном состоянии.

Учитывая, что события работоспособного состояния и отказа образуют в данном случае полную статистическую совокупность, то $P(t) + Q(t) = 1$ и начальными условиями при решении уравнений (1), (2) являются условия:

$$Q(0) = 0, P(0) = 1. \quad (3)$$

При начальных условиях (3) решение дифференциальных уравнений (1), (2) имеет вид [7, с. 160–165; 9, с. 45]:

$$Q(t) = (\mu / (\lambda + \mu))(1 + (\lambda / \mu) \exp[-t(\lambda + \mu)]); \quad (4)$$

$$P(t) = (\mu / (\lambda + \mu))(1 - \exp[-t(\lambda + \mu)]). \quad (5)$$

При отсутствии восстановления $\mu = 0$ из выражения (5) следует:

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (6)$$

т. е. вероятность исправного состояния равна вероятности безотказной работы.

При мгновенном автоматическом восстановлении $\mu = \infty$:

$$P(t) = 1, \quad (7)$$

т. е. система является работоспособной в любой произвольный момент времени.

При $t \rightarrow \infty$ вероятность безотказной работы $P(t)$ перестает зависеть от времени:

$$P(\infty) = \mu / (\lambda + \mu) = k_{\bar{a}}. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что величина $P(\infty)$ – это стационарное значение функции $P(t)$, которое принято называть коэффициентом готовности. Повышение эффективности восстановления приводит к повышению надежности только в отношении готовности, вероятность безотказной работы при этом не увеличивается.

Требования к надёжности сложных технических систем в последние годы быстро возрастают. Например, если до недавнего времени классификация систем электропитания по уровню надёжности производилась в пределах от $k_{\Gamma} = 0,99$ – обычная (conventional) до $k_{\Gamma} = 0,99999$ – безотказная (fault tolerant) с соответствующими максимальными временами простоя в году от 3,5 суток до 5 мин [2, с. 649], то в настоящее время этого совершенно недостаточно. О.П. Чекстер, начальник лаборатории электропитания ЛОНИИС, в своей статье в журнале «Технологии и средства связи» [10] констатирует, что уже сегодня до 25 % особо критичных нагрузок требуют надежности системы «девять девяток»: 99,9999999 %.

Всё возрастающие требования к надёжности систем электронного и электротехнического оборудования предъявляют ещё более жёсткие требования к надёжности её структурных элементов, какими являются СПД. Так, на участке длительной эксплуатации при неизменяющейся интенсивности отказов $\lambda = const$ из основного закона надёжности [7, с. 56] имеем:

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] = \exp(-\lambda t). \quad (9)$$

Для оценки требований к надёжности элементов в системе условно примем, что система состоит из N равнонадёжных элементов. Тогда, раскладывая экспоненциальную функцию (9) в ряд и ограничиваясь членами высшего порядка малости [1]:

$$P(t) = \exp(-N\lambda t) \approx 1 - N\lambda t. \quad (10)$$

При $N = 100$ и $P(t) = 0,999999999$ получим требуемую интенсивность отказов элемента:

$$\lambda \approx \frac{1 - 0,999999999}{87600} \approx 1,141 \cdot 10^{-14} \text{ ч}^{-1}.$$

Обеспечить такую надёжность СПД достаточно проблематично.

Современная система обеспечения надёжности СПД, базирующаяся на использовании информационных материалов на этапах проектирования и производства, сталкивается с определёнными трудностями. Создание информационных материалов требует проведения большого числа вычислений, что не позволяет использовать сложные численные модели. Поэтому в реальной практике за основу берутся более простые численно-аналитические модели, позволяющие правильно описать основные физические процессы в приборе. Требуемая точность вычислений обеспечивается с помощью расчётных коэффициентов, значения которых определяются с использованием моделей более высокого уровня. При разработке информационных материалов, сопровождаемых процесс проектирования и производства СПД в качестве такой модели, как правило, используется универсальная численная модель «Альфа-19», основанная на решении фундаментальной системы уравнений полупроводника во всём объёме кремниевой структуры. В последние годы всё более часто практикуется способ определения коэффициентов модели с помощью экспериментальных данных о параметрах и характеристиках приборов, полученных на основе анализа осциллограмм тока и напряжения.

Обращать всё более пристальное внимание на систему поддержания качества производства силовых полупроводниковых приборов заставляет в последние годы и старение технологического оборудования. Поэтому всё более важным направлением научно-производственной деятельности, работы технологов в организациях-производителях является «управление качеством» выпускаемых СПД за счет улучшения методов их контроля.

Учитывая, что наиболее распространённым на практике событием отказа СПД является тепловой пробой их р-п перехода, исключительно важным параметром данных приборов является величина их теплового сопротивления «переход-корпус $R_{\Theta \text{ пер-кор}}$ » (R_{thc}).

Распространение тепла в пространстве, мощность потока которого равна P , вызывает по пути своего следования изменение температуры $\Delta\Theta$. Путем (траекторией) распространения тепловой волны в данном случае является путь от р-п перехода, где происходит выделение тепла, до зоны выхода этого тепла из прибора в окружающее пространство. Величина изменения температуры СПД зависит от геометрических параметров диодов, свойств материалов и воздушных потоков на пути следования тепловой волны.

Тепловое сопротивление (ТС) определяется по аналогии с электрическим сопротивлением. Для этого используется закон Ома $I = U / R$, в котором электрическое сопротивление R заменяется ТС $R_{\Theta \text{ iad-oid}}$ (R_{thc}), электрический ток I – тепловой мощностью P , а падение напряжения U – разностью температур $\Delta\Theta$. Таким образом, получается закон Ома для тепловых полей:

$$R_{th} = \Delta\Theta / P, \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что тепловое сопротивление имеет размерность «градус/ватт».

Процесс контроля параметров СПД на предприятиях, производящих данную продукцию, в настоящее время организуется в соответствии с требованиями ГОСТ 24461-80 [2] и «Технических условий» на производство конкретных типов приборов. Технические условия, с одной стороны, неукоснительно выполняют требования указанного стандарта, а с другой – максимально конкретизируют данные требования (на это в стандарте имеются специальные разрешающие конкретные оговорки).

В соответствии с требованиями ГОСТ 24461-80 измерение и контроль величины ТС «переход-корпус» разрешается проводить двумя методами. Первый метод базируется на использовании в целях определения температуры кристалла полупроводника зависимости термочувствительного параметра (ЗТП). В качестве ЗТП, в соответствии с ГОСТ 24461-80 (п. 2.8.1 Условия измерения 3), рекомендуется использовать зависимость прямого падения напряжения на р-п переходе кристалла, обусловленную прямым постоянным током, от величины этого тока.

По второму методу температура кристалла полупроводника определяется посредством нагрева диода внешним источником тепла до ранее определённой величины прямого падения напряжения на нём в момент измерения температуры корпуса прибора, который разогревается прямым током, равным половине номинального тока прибора. Момент измерения температуры корпуса прибора и величины прямого напряжения на нём определяется требованием наступления установившегося теплового состояния между температурой кристалла полупроводника и температурой корпуса прибора.

Таким образом, в соответствии с ГОСТ 24461-80 определение величины ТС СПД сопряжено с необходимостью контроля величины температуры корпуса прибора. Расположение контрольной точки измерения температуры корпуса диода, в соответствии с ГОСТ 24461-80, определяется требованиями «Технических условий». Так, например, в «Технических условиях» ТУ 16-02 ИДЖК.432312.011 ТУ [7] фиксированная контрольная точка измерения температуры корпуса диода определена в графическом приложении № 6. При этом для размещения датчика температуры в корпусе диода высверливается отверстие, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид силового диода 2Д432-80 с отверстием для размещения термодатчика

В более сложных случаях требования по размещению термодатчиков в корпусах силовых приборов труднее реализовать. Например, размещение термодатчика в корпусе роторного силового диода таблеточной конструкции, рассчитанного на ток 25 А, требует изготовления и последующей запрессовки специальной конструкции в виде медного кольца с отверстием для размещения в нём термодатчика (рис. 2).

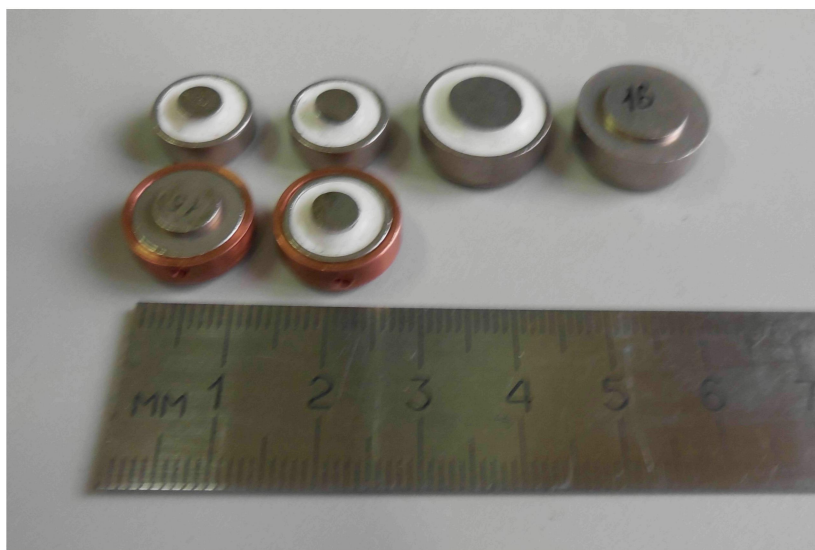


Рис. 2. Опытные образцы силовых диодов таблеточной конструкции, рассчитанные на токи 25 и 50А и конструктивные элементы для размещения на них термодатчиков

Существующая в настоящее время технология пайки электродов приборов к кристаллу полупроводника в водородной печи объективно предполагает различие качества контактного соединения электродов с корпусом даже в масштабе одной производимой партии приборов, и, следовательно, априорно отсутствует гарантия качества производимых приборов по данному параметру.

Контроль качества продукции СПД с использованием «разрушающих» методов позволяет организовать его только в «выборочной форме». Однако для повышения надежности выпускаемых СПД целесообразен сквозной контроль, т.е. всех произведенных объектов.

В этой связи встаёт вопрос, существует ли возможность применения такой технологии измерения величины ТС «переход-корпус СД», которая обеспечивала бы возможность сквозного контроля данного параметра. Известны, например, методы измерения ТС переход-корпус и импульсного теплового сопротивления СВЧ полупроводниковых диодов [3], позволяющие определять величину ТС «переход-корпус» без измерения температуры корпуса СВЧ диода. Однако большие номинальные токи, плоскостной, а не точечный характер р-п перехода СД и их ярко выраженные инерционные свойства обуславливают множество вопросов в отношении возможности применения указанных методов для измерения величины ТС силовых приборов.

Рассмотрим возможность применения метода измерения ТС «переход-корпус», изложенного в ГОСТ 19656.15-84 (метод II) для измерения величины ТС СД.

В соответствии с ГОСТ 19656.15-84 (п. 2.1.1) измерение ТС заключается в определении приращения температуры перехода в результате рассеивания в диоде определённой мощности импульса прямого тока. В этой связи следует чётко определить, что понимается в данном случае под мощностью импульса и привести известное из теоретической электротехники [6, с. 171] выражение Джона Уильяма Стретта для энергии любого аperiодического сигнала, получившее известность как формула Релея:

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)i(t)dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_u(j\omega)F_i(j\omega)d\omega, \quad (12)$$

где $F_u(\omega)$ и $F_i(\omega)$ – спектральные плотности напряжения и тока.

С помощью формулы (12) можно определить энергию импульсного воздействия, но не его мощность, так как для этого потребовалось бы усреднить энергию воздействия за время $T \rightarrow \infty$. Иначе говоря, средняя мощность импульсных неперiodических воздействий в бесконечных пределах равна нулю.

При оценке мощности неперiodических воздействий на практике пользуются понятием импульсной мощности, для которой усреднение энергии производится только за время действия импульса:

$$P_u = W / \tau_u. \quad (13)$$

Изменение прямого напряжения диода под действием импульса прямого тока показано на рис. 3.

Из него следует, что величина прямого падения напряжения на диоде в момент протекания по нему импульсов греющего тока определяется амплитудой импульса греющего тока, а в момент отсутствия импульса – величиной измерительного тока. Однако, учитывая, что в соответствии с требованиями стандарта величина измерительного тока выбирается такой, которая бы не вносила существенных погрешностей в процесс измерения, данные обстоятельства далее учитывать не будем.

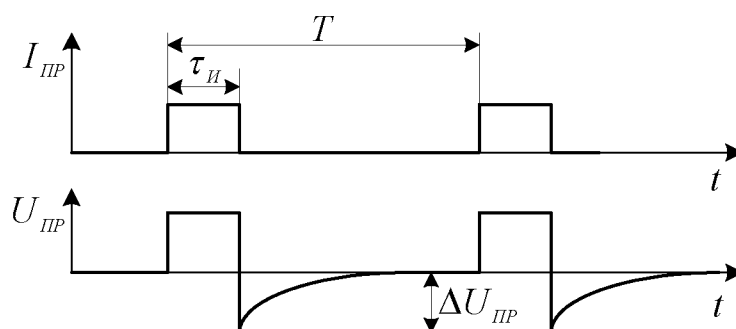


Рис. 3. Изменение прямого напряжения диода под действием периодической последовательности импульсов прямого тока (соответствует черт. 3 по ГОСТ 19656.15-84)

Из рис. 3 видно, что самое существенное значение в обеспечении корректности процедуры измерения имеет выбор величин частоты следования, скважности импульсов и стабильности величины греющего тока.

Рассмотрим данные утверждения более подробно.

На рис. 4 показано, к чему может привести некорректный выбор величины скважности импульсов греющего тока.

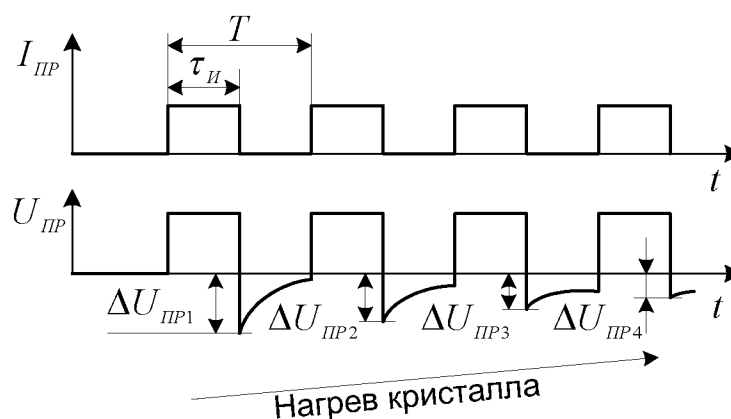


Рис. 4. Изменение прямого напряжения диода под действием периодической последовательности импульсов прямого тока при некорректном выборе скважности импульсов греющего тока

С приходом каждого последующего импульса греющего тока вследствие недостаточного остывания кристалла и отрицательного ТКН падение напряжения на р-п переходе увеличивается, соответственно его температура уменьшается, но не достигает температуры корпуса прибора. Следовательно, уменьшается и градиент температур между температурой кристалла полупроводника и корпусом прибора, уменьшение которого, в свою очередь, ухудшает условия отвода тепла от кристалла к корпусу прибора, что приводит к ещё более значительному уменьшению градиента температур. Данный процесс при достижении критического значения скважности импульсов греющего тока носит лавинообразный характер, который приводит к быстрому перегреву прибора и выходу его из строя.

В соответствии с требованиями ГОСТ 19656.15-84 период следования импульсов T выбирают из условия:

$$T - \tau_u \geq 3\tau_T, \quad (14)$$

где τ_T – время тепловой релаксации диода.

Невыполнение требований к стабильности греющего тока приводит к изменениям величины импульсной мощности и, как следствие, к нарушению требований к точности измерения величины ТС.

Наиболее существенное значение имеет обеспечение требований к длительности импульса греющего тока. При неизменных величинах греющего тока $i_{gp}(t) = const$ и прямого падения напряжения на нём $u_{np}(t) = const$ остаётся неизменной величина мгновенной мощности:

$$p(t) = i_{gp}(t) \cdot u_{np}(t) = p = const. \quad (15)$$

Учитывая, что мощность – это энергия в единицу времени, при выполнении условий (15) величина тепловой энергии, выделяющейся на р-п переходе определяется произведением:

$$W = p \cdot \tau_u. \quad (16)$$

В соответствии с выражением (16) при неизменной мгновенной мощности величина нагрева кристалла полупроводника, а следовательно, и прямое падение напряжения на нём пропорциональны длительности импульса греющего тока. Для обеспечения точности измерений необходимо, чтобы прямое падение напряжения на р-п переходе при отключении греющего тока было максимально большим или, что то же самое, должна быть максимально большая разность между температурой кристалла и корпусом диода. Обеспечить данные требования для диодов с точечным р-п переходом достаточно просто. Однако для СД с плоскостным р-п переходом их обеспечение представляет определённые трудности. Достаточно сказать, что состояние теплового равновесия между температурой кристалла полупроводника и корпусом диода, собранного с использованием стандартного радиатора с естественным охлаждением, при протекании по нему номинального прямого тока наступает за время более одного часа. Уменьшить время наступления теплового равновесия возможно посредством увеличения амплитуды греющего тока. Однако вследствие конструктивных особенностей плоскостных р-п переходов импульсные прямые токи, многократно превышающие номинальный ток, могут приводить к локальному перегреву р-п перехода, деградации его параметров и тепловому пробую [5, с. 33–39].

Таким образом, непосредственное применение рассматриваемого метода измерения ТС для СД крайне затруднено. Однако, учитывая, что мощность – это энергия в единицу времени, обеспечить неразрушающий контроль по данному параметру возможно путём уменьшения мощности испытательного воздействия, т.е. максимальным распределением энергии испытательного воздействия во времени или использованием для нагрева кристалла полупроводника постоянного тока. Кроме того, учитывая, что данное требование должно быть совмещено с противоречивым требованием обеспечения точности измерений, величина греющего тока должна быть близкой к нормированной величине номинального тока прибора, но не быть больше её.

Если нагреть СД постоянным током до момента установившегося теплового состояния и произвести отключение греющего тока, то изменение прямого напряжения диода будет иметь вид, показанный на рис. 5.

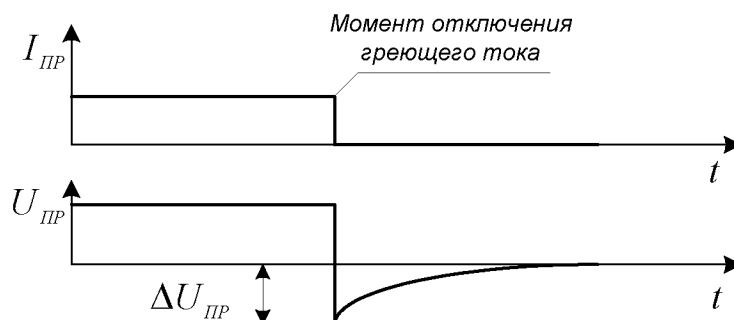


Рис. 5. Изменение прямого напряжения диода, нагретого действием постоянного прямого тока

Как следует из рис. 5, функция $U_{np}(t)$, так же как и на рис. 3, является переходной функцией (реакцией системы на скачкообразное изменение параметра возмущающего воздействия). Однако условия образования данной функции принципиально различны по сравнению с условиями образования при нагреве кристалла полупроводника током импульса. В методе измерения величины ТС «переход-корпус» с использованием зависимости прямого напряжения диода от температуры и разогревом импульсами прямого тока (метод II по ГОСТ 19656.15-84) переходная функция есть реакция системы на величину полученной извне энергии (мощность, умноженная на время, рис. 3). Во втором методе переходная функция является реакцией системы на величину воздействующей постоянной мощности (рис. 5), которая, по существу, не несёт никакой информации о величине полученной системой энергии.

Для определения условий корректности измерения величины ТС «переход-корпус» с использованием переходной функции и нагревом диода прямым постоянным током рассмотрим аналитические выражения, определяющие переходную функцию термочувствительного параметра.

В первом приближении будем считать, что скорость охлаждения перехода $T_j'(t)$ пропорциональна разности между его температурой T_j и температурой корпуса диода T_c .

$$T_j'(t) = -k(T_j - T_c). \quad (17)$$

Переходя к дифференциалу, получим

$$\frac{dT_j}{dt} = -k(T_j - T_c). \quad (18)$$

Выражение (18) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение, описывающее убывание по «показательному» закону. Чтобы найти его решение, введём вспомогательную функцию

$$\gamma(t) = T_j(t) + T_c. \quad (19)$$

Из выражения (17) следует:

$$\frac{d\gamma}{dt} = -k\gamma(t). \quad (20)$$

Общее решение уравнения (20) имеет вид:

$$\gamma(t) = C \exp(-kt). \quad (21)$$

Следовательно,

$$T_j(t) = C \exp(-kt) + T_c. \quad (22)$$

При $t = 0$ имеем:

$$T(0) = T_{j0} = C \exp(-kt) + T_c = C + T_c, \quad (23)$$

откуда $C = T_{j0} - T_c$.

Окончательно получаем, что решение уравнения (18), удовлетворяющее начальному условию

$$T_j(0) = T_{j0}, \quad (24)$$

имеет вид:

$$T_j(t) = T_c + (T_{j0} - T_c) \exp(-kt). \quad (25)$$

При постоянном значении температуры корпуса диода вид функции $T_j(t)$ зависит от тепловой постоянной времени k и начального значения температуры перехода $T_j(0) = T_{j0}$.

На рис. 6 показана расчётная функция $T_j(t)$ при температуре корпуса диода $T_c = 160^\circ C$, начальной температуре перехода $T_{j0} = 175^\circ C$ и тепловой постоянной времени $k = 0,3 \text{ сек}$.

При указанных значениях параметров функция (25) запишется в явном виде

$$T_j(t) = 160 + (175 - 160) \exp(-0,3t) = 160 + 15 \exp(-0,3t). \quad (26)$$

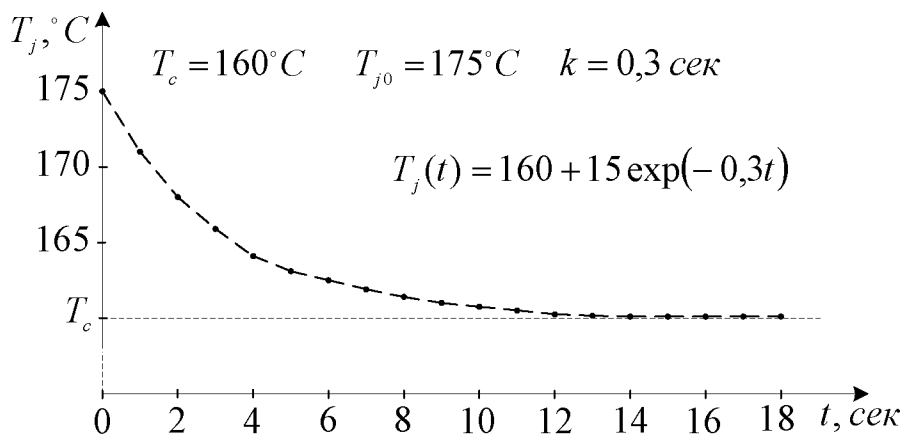


Рис. 6. График зависимости $T_j(t)$

Как видно из графика на рис. 6, при принятых значениях параметров приблизительно через 12 секунд температура перехода становится практически равной температуре корпуса диода.

Для построения аналогичной зависимости прямого падения напряжения на диоде $U_{FM}(t)$, рассматриваемой в качестве переходной функции термочувствительного парамет-

ра, рассмотрим график зависимости U_{FM} от температуры перехода T_j . Данный график показан на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что с увеличением температуры перехода падение напряжения на нём пропорционально уменьшается. Нетрудно посчитать, что коэффициент пропорциональности (ТКН) равен минус 0,002 В/градус, т.е. с увеличением температуры на один градус падение напряжения на переходе уменьшается на 0,002 В.

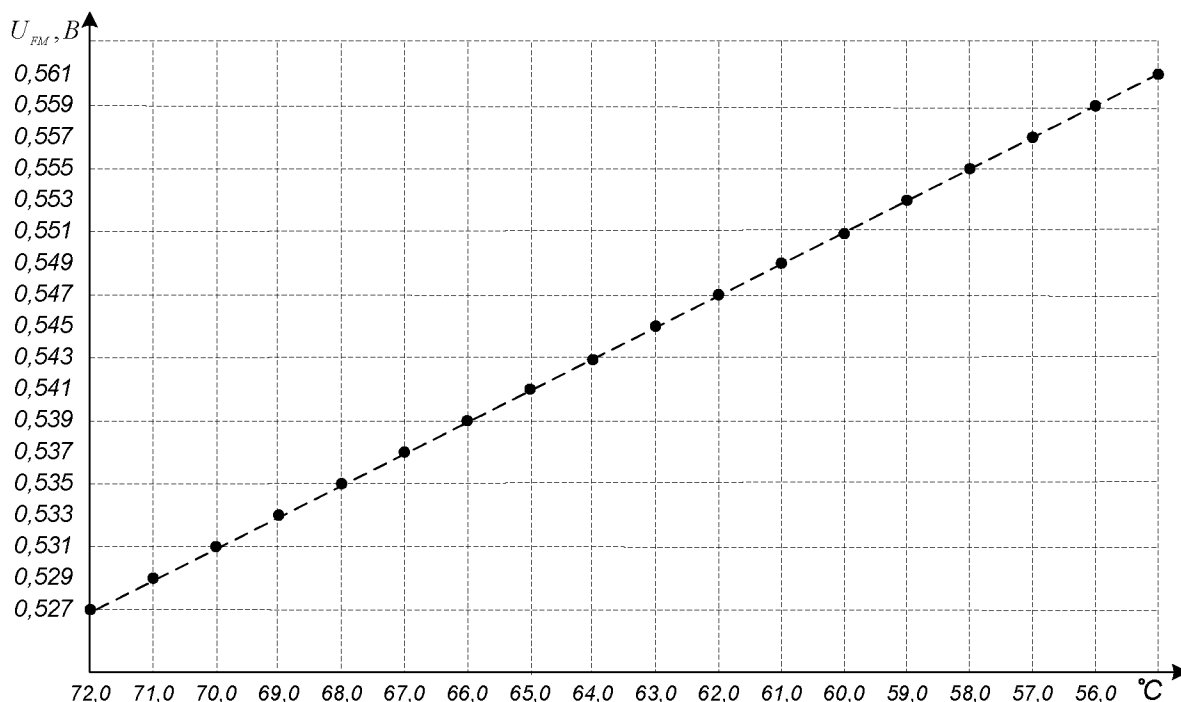


Рис. 7. График зависимости термочувствительного параметра от температуры перехода

Из графика зависимости, показанного на рис. 7, видно, что температурным параметрам функции (25) соответствуют прямые падения напряжения на р-п переходе:

- температуре перехода $T_{j0} = 175^\circ C$ соответствует прямое падение напряжения $U_{FM}(175^\circ \tilde{N}) = 0,321 \hat{A}$;
- градиенту температур $\Delta T_{j0} = 15^\circ \tilde{N}$ соответствует градиент термочувствительного параметра $\Delta U_{FM}(15^\circ \tilde{N}) = 0,03 \hat{A}$.

С учётом знака ТКН, вышеуказанных параметров и той же тепловой постоянной времени, уравнению (25) соответствует уравнение функции термочувствительного параметра

$$U_{FM}(t) = 0,351 - 0,03 \exp(-0,3t). \quad (27)$$

Расчётный график данной функции показан на рис. 8.

Первичный анализ полученных аналитических соотношений позволяет говорить о том, что для определения величины ТС по переходной функции термочувствительного параметра как реакции системы на величину воздействующей постоянной мощности необходимо зафиксировать значение данной функции в два момента времени: максимально приближенный к моменту отключения греющего тока; при наступлении установившегося теплового состояния между температурой перехода и температурой корпуса прибора. Однако практика говорит о недостаточном учёте существующих обстоятельств в смысле обеспечения максимальной точности предлагаемого метода. Абсолютная погрешность измерения величины ТС при указанном подходе может достигать 10 % и более.

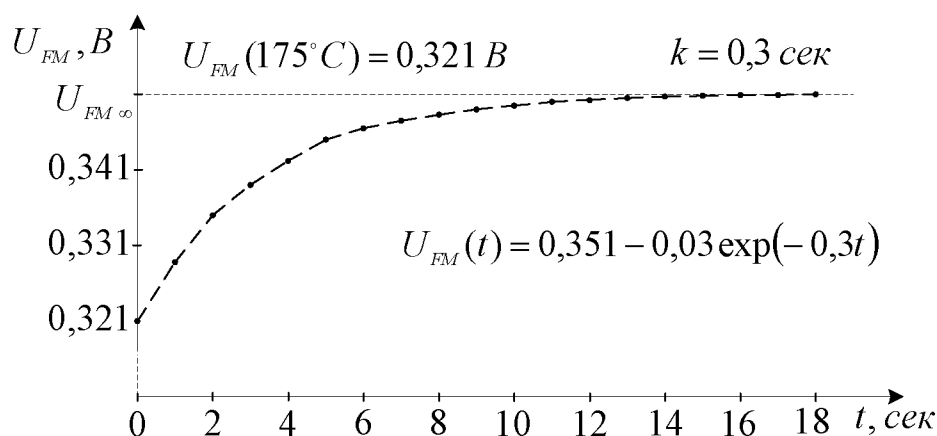


Рис. 8. График зависимости $U_{FM}(t)$

Исходными предпосылками при определении аналитического выражения, описывающего переходную функцию термочувствительного параметра, явились условия пропорциональности скорости изменения данной функции величине разности между температурой перехода и температурой корпуса диода. Однако данное утверждение справедливо, лишь когда температура корпуса диода не изменяется при передаче ему тепла от кристалла полупроводника во время охлаждения последнего – а это с формальной точки зрения противоречит закону сохранения энергии. Кроме этого, такой подход не учитывает отвод тепла от корпуса прибора в окружающее пространство в промежуток времени, соответствующий передаче тепла от кристалла полупроводника к корпусу прибора.

Аналитически учесть данные изменения позволяет рассмотрение не одного, а системы дифференциальных уравнений, в которой первое (вышерассмотренное) уравнение определяет условия передачи тепла от кристалла полупроводника к корпусу прибора, а второе – от корпуса прибора в окружающее пространство

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_j}{dt} &= -k_1(T_j - T_c) \\ \frac{dT_c}{dt} &= -k_2(T_c - T_a) \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

где \dot{O}_a – температура окружающей среды.

Учитывая, что теплопроводность воздуха в сотни раз ниже теплопроводности металла, тепловые постоянные времени в уравнениях также могут различаться на два и даже на три порядка. Поэтому рассматриваемая система дифференциальных уравнений является жёсткой и для ее решения должны применяться специальные математические методы (например метод «матричной экспоненты при использовании численных методов»).

Решение данной задачи целесообразно разбить на две части. Решение для первой части позволяет определить точку определения стационарного значения переходной функции $U_{FM}(t)$. Это, в свою очередь, позволит корректно определять температуру корпуса прибора. Решение же второй части задачи направлено на корректное определение температуры перехода после отключения греющего тока.

Суть решения второй части задачи состоит в определении оптимальной частоты сэмплирования специализированного цифрового средства измерения переходной функции термочувствительного параметра, которая, с одной стороны, давала бы необходимую точность определения максимальной величины нагрева кристалла полупроводника, а с другой – обеспечивала бы минимальный объём необходимой буферной памяти системы.

На рис. 9 показан скриншот переходной функции термочувствительного параметра, снятой с помощью специализированного программного обеспечения WinDMM, эмулирующего работу виртуального средства измерения совместно с цифровым многофункциональным прибором APPA-109N. Вследствие своей многофункциональности в этом средстве измерения частота сэмплирования многократно превышает частоту выборок регистрации сигнала. Достаточно сказать, что минимальный интервал регистрации составляет всего 0,5 секунд при записи сигнала в 40 К ячеек памяти. При таком интервале регистрации образующаяся зона нечувствительности, как показано на рис. 10, может обуславливать неприемлемые погрешности в определении температуры кристалла полупроводника. Об этом же свидетельствуют требования ГОСТ 24461-80, в котором указано (п. 2.8.1 3), что измерение температуры перехода должно производиться не позднее чем через 1,5 мс после прекращения подачи греющего тока.

Представить решение второй части задачи, вследствие её большого объёма и специфики, предполагается в отдельной статье.

Решение первой части задачи может быть найдено за счет использования большого различия в величинах тепловых постоянных времени в уравнениях (28). Такие различия определяют их дифференцированное влияние на вид переходной функции термочувствительного параметра. Если постоянная времени в первом уравнении (28), как показано выше, определяет вид функции термочувствительного параметра на отрезке времени, непосредственно прилегающему к моменту отключения греющего тока, то постоянная времени во втором уравнении (28) определяет изменение стационарного значения переходной функции $U_{FM}(t)$. Данные выводы подтверждает и поясняет практически снятая переходная функция термочувствительного параметра для диода 2Д422-25, показанная на рис. 9. От момента минимального значения термочувствительного параметра (максимальной температуры перехода после отключения греющего тока) до момента достижения функцией стационарного значения функция изменяется относительно быстро. Из него также видно, что значения переходной функции $U_{FM}(t)$ после достижения ей установившегося состояния хоть и очень медленно, но изменяются (возрастают).

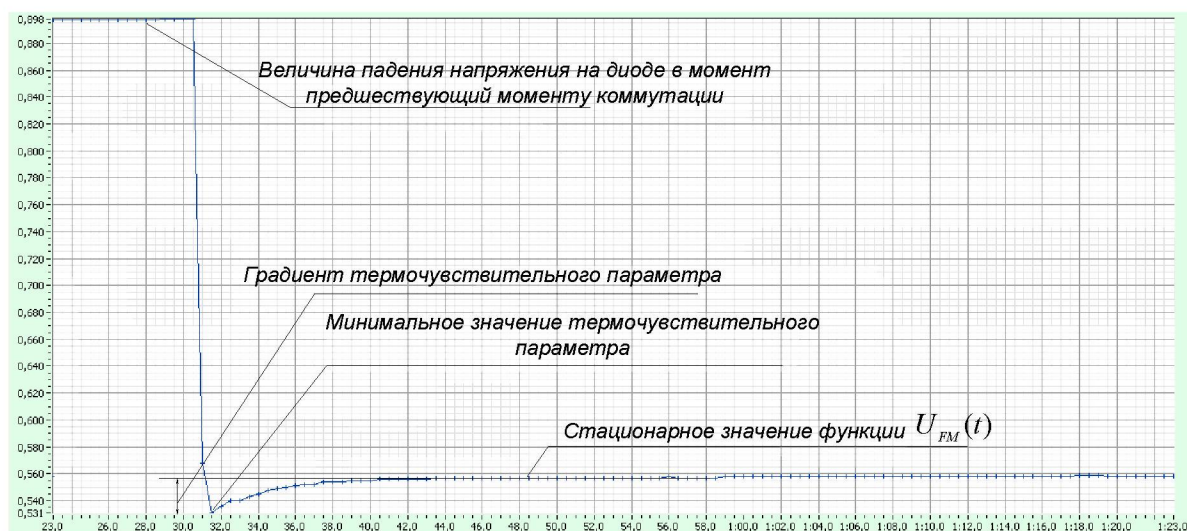


Рис. 9. Переходная функция термочувствительного параметра для диода 2Д422-25, собранного со штатным радиатором с применением термопасты типа КПК без токосъёма в месте соединения прибора с радиатором

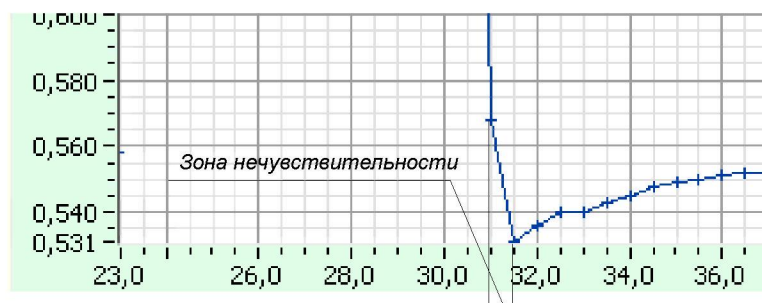


Рис. 10. Зона нечувствительности на элементе графика $U_{FM}(t)$

Увидеть данные изменения более точно позволяют аппаратные возможности специализированного программного обеспечения WinDMM посредством продолжения снятия зависимости $U_{FM}(t)$, однако данный участок зависимости не представляет интереса для практики. Достаточно сказать, что практически процесс остывания корпуса диода продолжается не секунды, а десятки минут.

Для практики важно определить точку на графике функции (27), в которой следует производить измерение стационарного значения данной функции. В [4] данная точка определена посредством нормирования периода следования T в выражении (14) и длительности импульсов греющего тока $\tau_{\dot{E}}$

$$\tau_{\dot{E}} = (3 - 5)\tau_{\dot{o}}, \quad (29)$$

где τ_T — время тепловой релаксации диода.

В данном случае указанная точка определяется моментом наступления установившегося теплового состояния между температурой кристалла полупроводника и корпусом диода. Кроме этого, следует учитывать влияние на переходную функцию второго уравнения в выражении (28). С физической точки зрения данное влияние проявляется в процессе повышения падения напряжения на р-п переходе кристалла полупроводника вследствие его остывания совместно с остыванием корпуса прибора.

Минимизация погрешности в определении стационарного значения переходной функции $U_{FM}(t)$ позволяет увеличить отношение массы корпуса прибора к массе кристалла полупроводника. Естественно, что чем больше масса корпуса диода по отношению к массе кристалла полупроводника, тем менее значительными являются данные погрешности. Из этого следует, что для повышения точности измерений необходимо максимально увеличить массу корпуса диода. Данное увеличение может быть произведено присоединением к корпусу прибора дополнительной массы, например посредством использования при измерениях массивного охлаждающего радиатора. При этом должны быть обеспечены условия максимальной эффективности отвода тепла от корпуса диода к радиатору, например нанесением термопасты на контактную поверхность радиатора. Кроме этого, данные обстоятельства не допускают применения токоёмов, размещаемых между корпусом прибора и радиатором.

Учитывая, что при постоянном значении температуры корпуса диода вид функции $T_j(t)$ зависит от тепловой постоянной времени k и начального значения температуры перехода $T_j(0) = T_{j0}$, момент определения стационарного значения функции $U_{FM}(t)$ в каждом случае должен рассчитываться отдельно. При этом должна быть определена для каждого конкретного типа диода величина греющего постоянного тока. Из рис. 9, например, следует, что для диода 2Д422-25 при его нагреве номинальным током функция $U_{FM}(t)$ приобретает стационарное значение приблизительно через 12 секунд. Нетрудно видеть, что указанная величина превышает величину тепловой постоянной времени прибора не в 3–5 раз, а в $12 / 0,3 = 40$ раз. Как показано выше, данное различие обусловлено условиями формирования переходной функции термочувствительного параметра.

В заключение покажем методику определения величины статического теплового сопротивления для одного из опытных образцов силовых кремниевых диодов штыревого исполнения 2Д422-25 по переходной функции термочувствительного параметра.

Из графика на рис. 9 следует, что градиент термочувствительного параметра ΔU_{FM} составляет:

$$\Delta U_{FM} = 0,558 - 0,531 = 0,027 \text{ \AA}.$$

Из графика зависимости термочувствительного параметра от температуры перехода (рис. 7) следует, что при уменьшении температуры перехода на один градус Цельсия падение напряжения на нём увеличивается на 0,002 В.

В соответствии с данными зависимости термочувствительного параметра от температуры градиенту термочувствительного параметра ΔU_{FM} соответствует градиент температур $\Delta T^\circ \text{C}$:

$$\Delta T = \frac{0,027}{0,002} = 13,5 \text{ }^\circ \text{C}.$$

Нагрев испытуемого диода с охладителем производится постоянным током с величиной, соответствующей номинальному значению тока прибора $I_F = 25 \text{ A}$. В установившемся тепловом состоянии падение напряжения на диоде составляло $U_a = 0,918 \text{ A}$.

В момент коммутации на p - n переходе диода выделялась мощность:

$$P_{FAV} = I_F \cdot U_a = 25 \cdot 0,918 = 22,95 \text{ A} \cdot \text{A} .$$

При вышеопределённой мощности, выделяемой на p - n переходе диода, величина статического теплового сопротивления диода равна:

$$R_{thjc} = \frac{T_j - T_c}{P_{FAV}} = \frac{13,5}{23} = 0,58 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Wm} .$$

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие **выводы**.

1. Имеющиеся методы измерения величины ТС «переход-корпус», позволяющие определить данный параметр без непосредственного измерения температуры корпуса прибора по переходной функции термочувствительного параметра, напрямую неприменимы к силовым полупроводниковым приборам вследствие плоскостного характера их p - n перехода, больших значений номинальных токов и существенных инерционных свойств данных приборов.

2. Предлагаемый метод измерения величины ТС по переходной функции термочувствительного параметра и нагрева СПД постоянным током обеспечивает неразрушающий контроль по параметру возмущающего воздействия. При этом появляется потенциальная возможность сквозного контроля величины ТС при производстве приборов.

3. Моменты измерения значений функции термочувствительного параметра, соответствующие максимальной температуре p - n перехода (температуре в момент отключения греющего тока) и в момент её равенства с температурой корпуса прибора определяются для конкретного прибора и условий измерения вышеприведённым аналитическим расчётом.

4. Для повышения точности измерения ТС «переход-корпус СПД» предлагаемым методом следует проводить с использованием сборки диода с охладителем (радиатором).

Список литературы

1. Брумштейн Ю. М. Одно- и многомерные временные ряды: анализ возможных методов оптимизации отсчётов и оценки характеристик / Ю. М. Брумштейн, М. В. Иванова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 4 (20). – С. 34–43.

2. Бройдо В. Л. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации : учеб. для вузов / В. Л. Бройдо. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2006 – С. 649.

3. ГОСТ 24461-80. Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний. – Москва : Издательство стандартов, 1990.

4. ГОСТ 19656.15-84. Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход-корпус и импульсного теплового сопротивления. – Москва : Издательство стандартов, 1984.

5. Ершов А. Б. Теоретические предпосылки и особенности конструктивных решений установки по испытанию силовых диодов ударным током большой величины / А. Б. Ершов, В. Я. Хорольский, А. Н. Хабаров // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 4 (16). – С. 33–39.

6. Прянишников В. А. Теоретические основы электротехники: Курс лекций / В. А. Прянишников. – Санкт-Петербург : КОРОНА принт, 2007. – С. 171.

7. Теоретические основы эксплуатации вооружения / под общ. ред. В. М. Эйбшица. – Москва : Издательство Министерства обороны СССР, 1977. – С. 160–165.
8. Технические условия ТУ 16-02 ИДЖК.432312.011 ТУ. Диоды кремниевые выпрямительные на токи 10 и 25 А.
9. Шеметов А. Н. Надежность электроснабжения : учеб. пос. / А. Н. Шеметов. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. –С. 45.
10. Чекстер О. П. Системы электропитания для инфокоммуникаций. Этапы развития и перспективы / О. П. Чекстер // Технологии и средства связи. – 2007. – № 2. – Режим доступа: <http://www.tssonline.ru> (дата обращения 25.04.2014), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

References

1. Brumsteyn Yu. M., Ivanova M. V. Одно- и многомерные временные ряды: анализ возможных методов оптимизации отсчетов и отсенки характеристик [One- and multidimensional time series: analysis of possible methods of optimization of timing and valuation characteristics]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2012, no. 4 (20), pp. 34–43.
2. Broydo V. L. *Vychislitelnye sistemy, seti i telekommunikatsii* [Computer systems, networks and telecommunications], 2nd ed. Saint Petersburg, 2006, p. 649.
3. GOST 24461-80. Power semiconductor devices. Methods of measurement and IP-test. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1990. (In Russ.)
4. GOST 19656.15-84. Semiconductor diodes microwave. Methods of measuring the thermal resistance of the transfer-case and pulse thermal resistance. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1984. (In Russ.)
5. Yershov A. B., Khorolskiy V. A., Khabarov A. N. Teoreticheskie predposylki i osobennosti konstruktivnykh resheniy ustanovki po ispytaniyu silovykh diodov udarnym tokom bolshoy velichiny [Theoretical background and special feature of the design solutions installation testing of power diodes surge current of large magnitude]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2011, no. 4 (16), pp. 33–39.
6. Pryanishnikov V. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: Kurs lektsiy* [Theoretical foundations of electrical engineering: a Course of lectures]. Saint Petersburg, CROWN print, 2007, p. 171.
7. Eybshits V. M. (ed.) *Teoreticheskie osnovy ekspluatatsii vooruzheniya* [Theoretical basics of use of weapons]. Moscow, Publishing House of the USSR Ministry of Defense, 1977, pp. 160–165.
8. Technical conditions TU 16-02 IJK. Diodes silicon straighten-tion on the currents of 10 and 25 A. (In Russ.)
9. Shemetov A. N. *Nadezhnost elektrosnabzheniya* [The reliability of electricity supply]. Magnitogorsk, GOU VPO “Moscow State Technical University n.a. G.I. Nosov”, 2006, p. 45.
10. Chekster O. P. Sistemy elektropitaniya dlya infokommunikatsiy. Etapy razvitiya i perspektivy [Power systems for telecommunications. Stages of development and prospects]. *Tekhnologii i sredstva svyazi* [Technology and communication], 2007, no. 2. Available at: <http://www.tssonline.ru> (accessed 25.04.2014).