
КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 681.5

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ УСТАНОВКИ ПО ИСПЫТАНИЮ СИЛОВЫХ ДИОДОВ УДАРНЫМ ТОКОМ БОЛЬШОЙ ВЕЛИЧИНЫ

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

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

Хабаров Алексей Николаевич, кандидат технических наук, Ставропольский технологический институт сервиса (филиал) Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса, 355000 Россия, г. Ставрополь, Кулакова, 41/1, e-mail: habrw@yandex.ru.

В статье рассмотрены новый принцип формирования одиночных импульсов ударного тока величиной от 0,1 до 2 кА и его применение в разработанной опытной установке для испытания силовых полупроводниковых диодов УИУПТ-2000 по параметру: ударный неповторяющийся прямой ток. Изложены основы техники формирования импульса ударного тока большой величины, базирующейся на использовании принципа дискретной суперпозиции зарядов в электрической цепи вторичной обмотки силового импульсного трансформатора. Изложены преимущества данной техники, позволяющие по сравнению с установками, использующими принцип накопления энергии в емкостных накопителях энергии, значительно снизить массогабаритные характеристики испытательного оборудования и создать условия для обеспечения эффективного цифрового управления процессом формирования импульса ударного тока «на лету» ("on-the-fly"). Представлены результаты испытаний силовых полупроводниковых диодов на устойчивость к воздействию импульсов прямого ударного тока. Различие между расчетными значениями и данными экспериментальных исследований обусловлено тем, что при расчете не учитывалась величина энергии, передаваемая от кристалла полупроводника испытываемого прибора на элементы его теплоотвода и токоподвода. Это различие можно учесть путем введения величины постоянной теплоотдачи.

***Ключевые слова:** испытания силовых полупроводниковых приборов, ударный неповторяющийся импульс прямого тока, принцип дискретной суперпозиции зарядов.*

THEORETICAL PRECONDITIONS AND FEATURES OF CONSTRUCTIVE DECISIONS OF INSTALLATION ON TESTING POWER DIODES WITH THE SHOCK CURRENT OF BIG SIZE

Ershov Andrey B., Cand. in Technics, Stavropol State Agrarian University, 355017, Russia, Stavropol, 12 Zootechnicheskyy str., e-mail: erschow157500@yandex.ru.

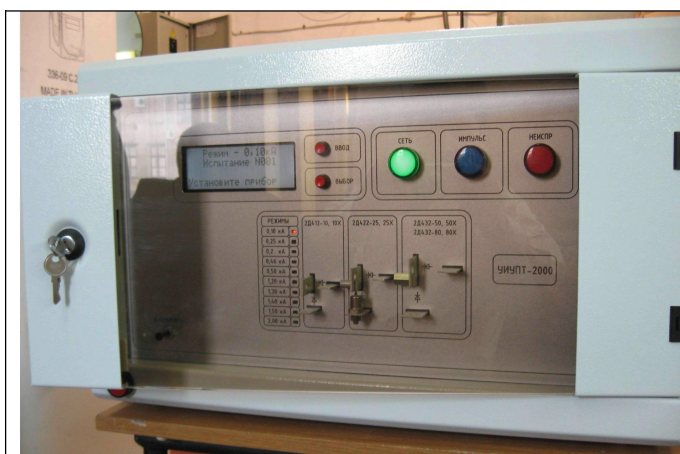
Khorolsky Vladimir Ya., Dr.Sc. in Technology, Stavropol State Agrarian University, 12 Zootehnicheskaya str., Stavropol, 355017, Russia, e-mail: erschow157500@yandex.ru.

Khabarov Alexey N., Cand. in Technology, Stavropol Institute of Technology of Service (branch) of South Russian State University of Economy and Service, 41/1 Kulakov str., Stavropol, 355000, Russia, e-mail: habrw@yandex.ru.

In the article a new principle of formation of single impulses of a shock current in size from 0,1 to 2 кА and its application in the developed skilled installation for test of power semiconductor diodes UIUPT-2000 on parameter is considered: a shock non-repeated direct current. Technics bases formiro-vanija an impulse of a shock current of the big size which are based on use of a principle of discrete superposition of charges in an electric chain of a secondary winding of the power pulse transformer are stated. The advantages of the given technics allowing in comparison with installations are stated, using an accumulation principle energii in capacitor stores of energy considerably to lower массогабаритные характеристики the test equipment and to create conditions for maintenance effektivnogo a digital control process of formation of an impulse of a shock current "hurriedly" ("on-the-fly"). Results of tests power of semiconductor diodes on stability to influence of impulses of a direct shock current are presented. Distinction between settlement values and the data of experimental researches is caused by the fact that during calculation the energy size transferred from crystal of the semiconductor of the tested device to the elements of its heat-sink and shunt wasn't considered. This distinction can be considered by introduction of size of a constant heat-irradiation.

Key words: tests of power semi-conductor devices, shock non-repeated impulse of a direct current, principle of discrete superposition of charges.

Начавшееся в ОАО «Опэрон-Ставрополь» серийное производство силовых диодов 2Д432-80;-80Х предопределило необходимость разработки специализированного испытательного оборудования для проверки диодов на соответствие требованиям ГОСТ 24461 [1] и ТУ 16-02 ИДЖК.432312.011 ТУ [2] по параметру «Ударный неповторяющийся прямой ток». Работы по разработке данной установки выполнялись в рамках ОКР, при этом использовалась нетрадиционная техника формирования и управления параметрами импульса ударного тока. Внешний вид разработанной установки УИУПТ-2000 и основные параметры генерируемых импульсов ударного тока представлены на рисунке 1.



Основные параметры импульсов ударного тока
Форма импульса – однопериодная синусоидальная (обеспечены условия минимальных искажений формы генерируемого импульса)
Дискретная шкала амплитуд, кА – 0,1; 0,25; 0,27; 0,46; 0,5; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 2,0.
Длительность импульса, мс – 10±1

Рис. 1. Установка УИУПТ-2000

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Раскрывая принципы создания установки УИУПТ-2000, целесообразно отметить, что, следуя классическим подходам в теории электротехники, ударный ток импульса можно рассматривать как с позиций анализа последствий его воздействия, так и с позиций синтеза данного воздействия. С практической точки зрения представляются достаточно интересными оба подхода. Однако в данном случае вышеуказанные подходы настолько взаимосвязаны, что рассмотрение проблемы в соответствии с темой рассматриваемого вопроса только с позиций синтеза было бы не достаточно обоснованным. Дело в том что, с одной стороны, формирование импульса ударного тока производится с целью определения стойкости испытуемого прибора к данным воздействиям, с другой, воздействие генерируемого импульса ударного тока на испытуемый прибор приводит к тому, что изменяющееся в процессе воздействия падение напряжения на приборе, находящемся в электрической цепи испытательной установки, оказывает самое непосредственное влияние на процесс формирования испытательного воздействия. Ситуация осложняется еще и тем, что указанное влияние носит сложный, многофакторный характер, и если при относительно невысоких (до 100–300 А) амплитудах импульса ударного тока данным влиянием еще можно пренебречь, то с их увеличением пренебречь данным влиянием становится невозможным в силу сложности обеспечения точности параметров испытательного воздействия.

На практике величина прямого ударного тока I_V , при протекании которого превышает максимально допустимая эффективная температура перехода, может превышать нормированную величину среднего значения прямого тока диода $I_{0н}$ в десятки раз. При этом ситуация может либо сопровождаться деградацией параметров качества приборов, либо приводить к необратимому отказу прибора. И если условия и параметры испытательного воздействия определены в нормативных документах, то процесс увеличения прямого сопротивления кристалла при его разогреве свыше температуры собственной проводимости, происходящий при воздействии импульса ударного тока, оказывает непосредственное влияние на процесс, а следовательно, и на технику формирования испытательного импульса.

Указанные выше обстоятельства предопределили необходимость создания системы автоматического регулирования параметров генерируемого импульса, причем, учитывая, что форма и параметры данного импульса являются заданными, такая система по сути является системой слежения.

Из теории автоматического регулирования известно, что обеспечить данный процесс использованием средств аналогового регулирования крайне затруднительно, и тогда речь должна идти о создании системы программного слежения, причем с возможностью изменять параметры системы без ее остановки, «на лету» (“on-the-fly”). Таким образом, система управления установкой должна выполнять функции системы так называемого «интеллектуального» управления, т.е. подстройки параметров системы в режиме реального времени.

Утверждение в 2005 г. первой версии стандарта PMBus [4] и разработка на его основе специализированных контроллеров, включающих регулирующий и управляющий процессоры, обеспечили возможность практической реализации рассматриваемой системы управления. Рассмотрение ранее принципов практической реализации данной системы управления с учетом рассматриваемого объекта регулирования позволило обоснованно констатировать необходимость использования специальных технических приемов, обеспечивающих предварительное «дозирование» величины управляемой энергии. Данную функцию в установке УИУПТ-2000 выполняет система, выполненная на основе дискретной суперпозиции зарядов в электрической цепи вторичной обмотки силового импульсного трансформатора (рис. 2).

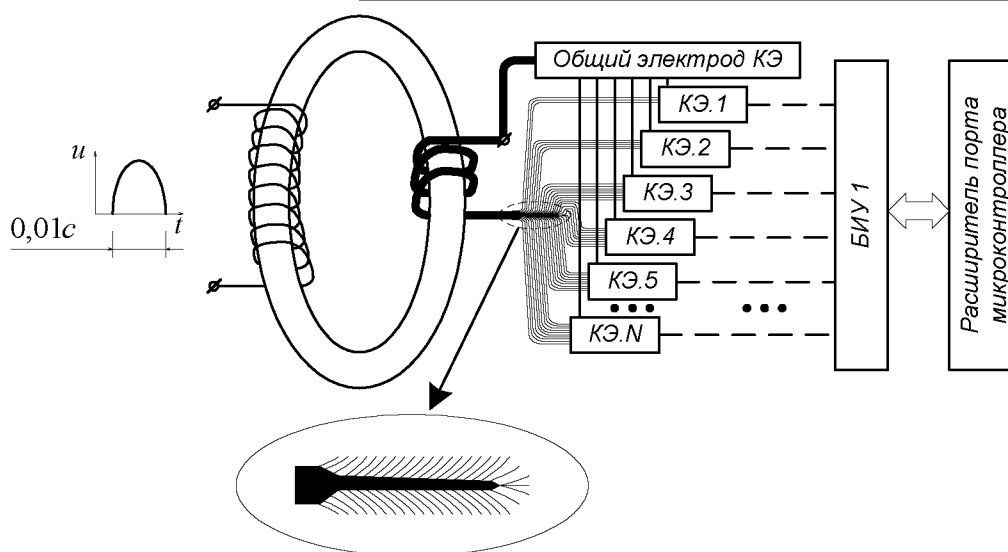


Рис. 2. Система дискретной суперпозиции зарядов

Необходимое преобразование достигается посредством расщепления многопроволочной выходной обмотки трансформатора на отдельные пучки, различающихся по количеству проволок таким образом, что их программная коммутация с помощью силовых ключей (КЭ 1 ÷ КЭ N) позволяет получить дискретную шкалу синусоидальных импульсов тока, точность которой определяется управляемым силовым ключом с минимальным суммарным сечением проволок. Таким образом, силовые ключи (КЭ 1 ÷ КЭ N) в схеме суперпозиции зарядов, управляемые через буферизированное интерфейсное устройство (БИУ1), выполняют функцию дискретного регулирования максимальной величины управляемой энергии импульса, а исходная форма импульса тока определяется формой импульса напряжения, прикладываемого к первичной обмотке импульсного трансформатора.

В соответствии с классической теорией работы линейного трансформатора э.д.с., индуцируемая в каждой из вторичных обмоток, соединенных по схеме, показанной на рисунке 2, в любой момент времени одинакова. Такой же для каждой из обмоток является и величина реактивного импеданса. Следовательно, величина электрического тока как величина, определяемая скоростью движения электрического заряда, $j = \frac{dq}{dt}$, характеризуется величиной

плотности электрического тока. Таким образом, плотность тока, протекающего через общий электрод схемы (см. рис. 2) в каждый момент времени равна сумме плотностей тока, протекающего в обмотках включенных параллельно. Указанные обстоятельства и определяют название схемы как схемы суперпозиции зарядов. Постоянство величины реактивного импеданса каждой из обмоток является одним из определяющих обстоятельств удобства рассматриваемой схемы, так как именно оно обеспечивает постоянство фазового сдвига электрического тока в обмотках и обеспечивает условие линейного сложения (суперпозиции) электрических токов как движущихся зарядов.

Указанную схему достаточно просто рассчитать, так как в данном случае суммарная мощность подключенных к нагрузке выходных обмоток трансформатора определяется выражением

$$P_{\Pi} = \sum_{i=1}^n I_i^2 r_i, \quad (1)$$

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

где I_j, r_j – соответственно ток и сопротивление подключенных к нагрузке выходных обмоток; n – количество подключенных к нагрузке выходных обмоток.

В соответствии с рекомендациями ТУ [2], испытание диодов 2Д432-80;-80Х на стойкость к воздействию прямого ударного тока должно производиться одиночным однопериодным синусоидальным импульсом тока амплитудой 1500 А, длительностью 10 мс. При этом условием обеспечения режима максимальной жесткости испытания является условие поддержания на момент начала испытания максимально допустимой температуры перехода.

В результате среднее значение синусоидального тока для однополупериодного импульса ударного тока амплитудой 1500 А получаем в следующем виде

$$\begin{aligned} I_{0Y} &= \frac{Q}{T/2} = \frac{2^{T/2}}{T} \int_0^{\pi} i dt = \frac{I_m}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \omega t dt = \\ &= -\frac{I_m}{\pi} (\cos \pi - \cos 0) = \frac{2 \cdot 1500}{\pi} \approx 954,96 \text{ А}. \end{aligned} \quad (2)$$

Соответственно, среднеквадратическое значение ударного тока импульса определится как

$$I_Y = \sqrt{\frac{I_m^2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin^2 \omega t dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\int_0^{\pi} \frac{dt}{2} - \int_0^{\pi} \frac{\cos 2\omega t}{2} dt \right)} = \frac{1500}{\sqrt{2}} \approx 1060,67 \text{ А}. \quad (3)$$

Проведенные расчеты показывают, что средняя величина испытательного импульса ударного тока согласно нормированным в [1] и [2] условиям испытаний должна превышать в 11,94 раза номинальную величину прямого тока диодов 2Д432-80;-80Х, а действующее значение – в 13,26 раза.

Для априорной оценки условий испытательного воздействия использовались результаты экспериментальных исследований, проведенных в Киевском национальном университете им. Тараса Шевченко и опубликованных в [3 с. 33–35], согласно которым резко возникающий при воздействии ударного тока неоднородный градиент температур приводит к возникновению сильных механических напряжений и, как следствие, к появлению дополнительных дефектов (рекомбинационных уровней), приводящих к уменьшению эффективного времени жизни носителей заряда в полупроводнике. Это увеличивает эффективное прямое сопротивление диода, что, в свою очередь, увеличивает выделенную диодом мощность, при этом неоднородно растет температура, и кристалл полупроводникового диода разрушается либо локально, либо полностью. Естественно, что с увеличением амплитуды ударного тока либо с повторным его воздействием температура кристалла может достичь температуры его собственной проводимости, при этом происходит необратимое увеличение прямого сопротивления кристалла, обуславливающее выход диода из строя.

Численно увеличение температуры кристалла ΔT_K полупроводника испытуемого прибора от воздействия импульса прямого ударного тока определяется уравнением теплового баланса (4). Так, при воздействии на диод 2Д432-80 нормированного импульса ударного тока, с учетом выражения (3) и размерностей входящих в уравнение физических величин получаем

$$\Delta T_K = \frac{W}{cm} = \frac{5,7 \cdot 1060,67 \cdot 0,01}{0,678 \cdot 2,3} \approx 38,77 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

где $W = Ut$ – величина энергии импульсного воздействия; t – длительность воздействия импульса ударного тока; $c = 0,678 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ – теплоемкость кремниевой пластины; m – масса кристалла кремния в испытуемом приборе.

Расчетные значения подвергались экспериментальной проверке с использованием специализированных испытательных установок проверки величины теплового сопротивления силовых полупроводниковых приборов, установки контроля отсутствия посторонних свободно перемещающихся частиц, постоянных и временных коротких замыканий и обрывов токоведущих частей и установки контроля нормированной величины падения напряжения на силовых диодах. В таблице представлены данные по результатам соответствующих испытаний, выполненных для силовых диодов, производимых в ОАО «Оptron-Ставрополь».

Таблица

Результаты испытаний силовых полупроводниковых диодов на устойчивость к воздействию импульсов прямого ударного тока

Типы испытуемых приборов	Параметры					
	Амплитуда импульса, кА	Длительность импульса, мс	Интервал следования импульсов, мс	Исходная температура кристалла, °С	Расчетное значение количества импульсов до отказа прибора	Фактическое значение количества импульсов до отказа прибора
2Д412-10	0,1	10	10	25	17	21
2Д412-10Х	0,25				19	22
2Д422-25	0,27				14	17
2Д422-25Х	0,46				15	19
2Д432-50	0,5				15	19
2Д432-50Х	1,2				14	17
2Д432-80	1,3				12	15
2Д432-80Х	1,4				14	16
2Д432-80Х	1,5				14	17
2Д432-80Х	2,0				7	11

Явное различие между расчетными значениями и данными экспериментальных исследований обусловлено тем, что при расчете не учитывалась величина энергии передаваемая от кристалла полупроводника испытуемого прибора на элементы его теплоотвода и токоподвода, которую можно учесть введением величины постоянной теплотдачи. Однако введение данной постоянной на практике уменьшает точность соотношения между расчетной и экспериментальной величиной и поэтому не использовалось. В то же время поддерживаемое аппаратными методами постоянство интервала следования испытательных импульсов ударного тока и наблюдаемое в таблице постоянство различий расчетных и экспериментальных значений позволяют судить о достаточной чистоте проведенного эксперимента. Помимо указанных в таблице значений в ходе эксперимента фиксировалось состояние начала деградации параметров испытуемых приборов. В целом зарегистрированные значения соответствуют достижению в ходе эксперимента максимально допустимой температуры приборов, нормативно установленному значению [2].

В силу своих технических характеристик, обеспечивающих задание и программное регулирование формы импульса ударного тока, установка УИУПТ-2000 может использоваться в исследовательских целях.

Список литературы

1. ГОСТ 24461 «Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний». – 2-е изд., испр. – М. : Изд-во стандартов, 1990.

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

2. Диоды кремниевые выпрямительные на токи 10, 25, 50 и 80 А. Технические условия ТУ 16-02 ИДЖК.432312.011 ТУ.

3. Павлюк С. П. Изменение сопротивления силовых диодов под воздействием импульса ударного тока / С. П. Павлюк, С. М. Савицкий, Р. Б. Солтис, И. Ю. Тищенко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). – 2007. – № 6. – С. 33–35.

4. PMBus™ Power System Management Protocol Specification. Part 1 – General Requirements, Transport and Electrical Interface. Rev.1.0/System Management Interface Forum, Inc., 2005 (www.pmbus.com).

References

1. GOST 24461 «Pribory poluprovodnikovyye silovyye. Metody izmereniy i ispytaniy». – 2 izd., ispr. – М. : Izd-vo standartov, 1990.

2. Diody kremniyevyye vypryamitelnyye na toki 10, 25, 50 i 80 A. Tekhnicheskiye usloviya TU 16-02 IDZhK.432312.011 TU.

3. Pavlyuk S. P. Izmeneniye soprotivleniya silovykh diodov pod vozdeystviyem impulsa udarnogo toka / S. P. Pavlyuk, S. M. Savitskiy, R. B. Soltis, I. Yu. Tishchenko // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature (TKEA). – 2007. – № 6. – S. 33–35.

4. PMBus™ Power System Management Protocol Specification. Part 1 – General Requirements, Transport and Electrical Interface. Rev.1.0 / System Management Interface Forum, Inc., 2005 (www.pmbus.com).