

## Метод выявления внутренних дефектов танталовых конденсаторов для снижения количества отказов аппаратуры

**И. П. Горбачев**, аспирант, *gorbachyov.ip@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. А. Сашов**, к. т. н., *sashov.aa@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Отказы танталовых чип-конденсаторов в составе аппаратуры — достаточно распространенное явление. Многие из исследованных случаев отказа обусловлены наличием внутренних дефектов, не выявленных стандартными методами отбраковки. В ходе исследовательской работы были рассмотрены конструкция, технология изготовления танталовых чип-конденсаторов и установлены основные дефекты, приводящие к анализируемым случаям отказов. На основе анализа дефектов выделен один из способов их выявления на этапе входного контроля и дополнительных испытаний. Для оценки эффективности применения выделенного способа проведены испытания на ряде партий танталовых чип-конденсаторов. По результатам испытаний установлено, что рассмотренный способ отбраковки позволяет выделить из общего количества потенциально ненадежную партию, а также выявить конденсаторы, имеющие скрытые дефекты.

**Ключевые слова:** танталовые чип-конденсаторы, отказ, внутренние дефекты, импульсный ток, испытания

## Method to Detect Internal Defects of Tantalum Capacitors to Decrease Failures of the Equipment

**I.P. Gorbachev**, postgraduate student, *gorbachyov.ip@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**A. A. Sashov**, Cand. Sci. (Engineering), *sashov.aa@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Failures of tantalum chip capacitors as a part of the equipment is a rather widespread phenomenon. Many of the failures studied are caused by internal defects, which are not revealed by standard methods of rejection. During research work, design and manufacturing techniques of tantalum chip capacitors were considered, and the main defects leading to the analyzed cases of refusals were established. Based on the analysis of the defects, one of the methods of their identification at the stage of incoming inspection and additional tests was allocated. To assess operational effectiveness of the presented method, tests on a number of lots of tantalum chip capacitors were carried out. By the results of testing, it was established that the considered way of rejection allows allocating potentially unreliable lot from total quantity, and revealing capacitors having the latent defects as well.

**Keywords:** tantalum chip capacitors, failure, internal defects, pulse current, tests

Широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре танталовых чип-конденсаторов обусловлено рядом их преимуществ по сравнению с другими типами конденсаторов — это высокая удельная емкость ( $CV/cc$ ), низкие значения эквивалентного последовательного сопротивления ( $ESR$ ) и индуктивности ( $ESL$ ). Также они обладают высокой стабильностью характеристик при изменении температуры и напряжения.

Однако, несмотря на указанные преимущества этих конденсаторов, в последнее время наблюдаются частые случаи их отказов в составе радиоэлектронной аппаратуры. Анализ условий и времени отказа показывает, что в большинстве случаев отказ происходит во время включения аппаратуры и проявляется в виде пониженного значения сопротивления между электродами конденсатора вплоть до короткого замыкания (КЗ). При этом нет явной зависимости по времени наработки до отказа — зафиксированы случаи отказов как при первом включении аппаратуры, так и на этапе электротермотренировки (ЭТТ) моноблока (наработка более 300 часов), и несколько случаев на этапе эксплуатации аппаратуры (наработка свыше 1100 часов). Отказы с образованием КЗ, учитывая особенности структуры танталовых чип-конденсаторов, могут приводить к катастрофическим последствиям для приборов, таким как выгорание части платы и необходимость полной замены ее и соседних плат в приборе.

К подобным отказам танталовых чип-конденсаторов могут приводить и нарушения требований к условиям эксплуатации на них, например перегрев при монтаже конденсаторов на плату и превышение допустимых режимов эксплуатации. Однако в процессе анализа установлено, что в рассматриваемых случаях нарушений технических требований по применению конденсаторов не было.

Следовательно, основной предполагаемой причиной отказа можно считать наличие в конденсаторах скрытых дефектов. Учитывая, что отказавшие конденсаторы успешно прошли входной контроль, дополнительные и сертификационные испытания, не имея при этом каких-либо замечаний, можно сделать вывод, что стандартных способов отбраковки недостаточно для выявления скрытых дефектов, приводящих впоследствии к отказам в составе аппаратуры.

Таким образом, возникает потребность в разработке и внедрении новых способов отбраковки танталовых чип-конденсаторов, имеющих скрытые дефекты.

Для дальнейшего рассмотрения проблемы необходимо иметь представление о конструкции и технологии изготовления танталовых чип-конденсаторов.

Конструкция танталового чип-конденсатора представлена в виде продольного шлифа на рис. 1 и состоит из следующих элементов: гранулированного танталового анода, покрытого диэлектриком — оксидом тантала ( $Ta_2O_5$ ); твердого электролита ( $MnO_2$ ); покрытия графит/серебро; серебряного адгезива; выводной рамки и компаунда.

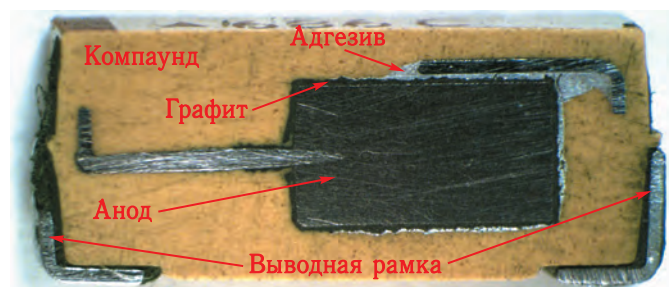


Рис. 1. Продольный шлиф танталового чип-конденсатора фирмы-изготовителя AVX

Процесс изготовления танталового конденсатора состоит из следующих этапов:

- спекания танталового порошка высокой степени очистки вокруг танталового стержня — вывода анода для получения пористой гранулированной структуры, похожей на губку;
- электрохимического окисления тантала для формирования пленки диэлектрика на поверхности анода;
- пропитки пористого анода солями марганца с последующим нагревом для получения диоксида марганца на всей поверхности анода;
- нанесения графита по всей поверхности анода для улучшения контакта и последующее нанесение металлического покрытия (обычно серебро) поверх графита;
- соединения с выводной рамкой и запрессовка в корпус.

Получившаяся пористая гранулированная структура в общем виде представлена на рис. 2.

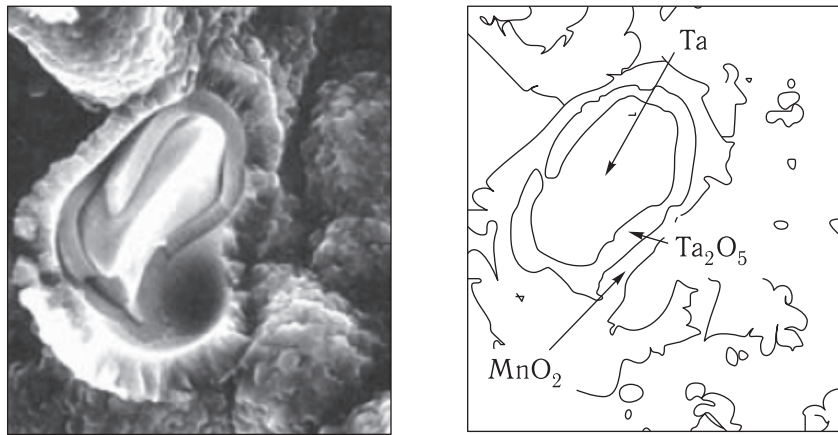


Рис. 2. Изображение элемента объемно-пористого танталового тела (слева) и его схематичное представление (справа) [1]

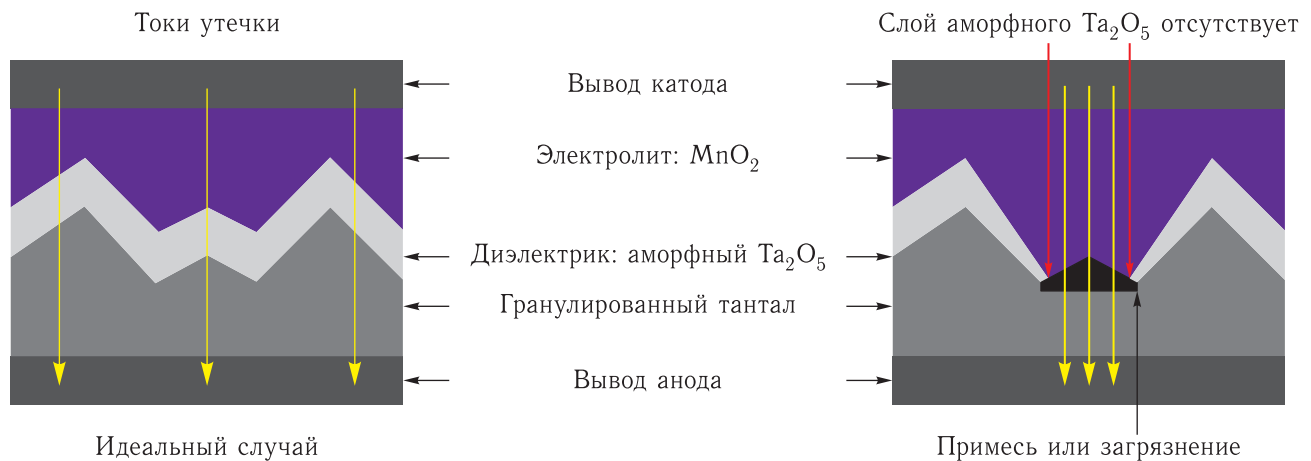


Рис. 3. Дефекты в слое диэлектрика [2]

Исходя из строения и процесса изготовления танталовых чип-конденсаторов выделяют три основных типа дефекта, связанных с производством [2]:

- механические дефекты диэлектрика;
- включения и примеси в диэлектрике;
- участки кристаллического диэлектрика, возникшие в процессе производства.

Механические дефекты появляются после формирования диэлектрика в результате удара о твердую поверхность либо в процессе формирования электролита  $MnO_2$  (бурная реакция с образованием газов и выделением тепла в процессе восстановления  $MnO_2$  из солей марганца). Наличие всякого рода примесей на поверхности тантала в процессе

формирования диэлектрика приводит к уменьшенной толщине слоя  $TaO_2$  в области включений. Кристаллические включения могут быть обусловлены целым рядом технологических факторов, начиная от качества исходных материалов и заканчивая параметрами технологических процессов. Изготовители танталового порошка и производители конденсаторов каждый со своей стороны прикладывают большие усилия для минимизации вероятности появления такого рода дефектов, однако, как показывает практика применения танталовых конденсаторов, окончательное решение проблемы еще далеко.

Вышеперечисленные дефекты схематично представлены на рис. 3 и приводят к увеличению токов утечки конденсатора. Здесь необходимо отметить, что объемно-пористые танталовые чип-конденсаторы

представляют из себя огромное количество «отдельных конденсаторов», соединенных между собой.

Поэтому дефект, обусловленный несовершенством производства или исходных материалов, и имеющийся только в некоторых «отдельных конденсаторах», в общем случае к существенному изменению параметров готового конденсатора не приведет. Здесь также надо учитывать эффект самовосстановления, присущий танталовым объемно-пористым конденсаторам. Данный эффект заключается в преобразовании электролита  $MnO_2$  в непроводящий слой над поверхностью кристаллического  $Ta_2O_5$  за счет выделения достаточного количества тепла в процессе протекания тока через дефект (если площадь данного образования достаточна мала). Таким образом происходит изоляция проводящего кристаллического участка. Однако свойства изоляции преобразованного  $MnO_2$  несопоставимы с исходным диэлектриком и его образование только откладывает отказ конденсатора.

Анализируя материалы проведенных исследований [3, 4], можно сделать вывод, что дефекты изготовления, такие как дефекты кристаллизации, представленные на рис. 4 и имеющиеся в «отдельных конденсаторах» при достаточно облегченных электрических режимах, в процессе проведения прове-

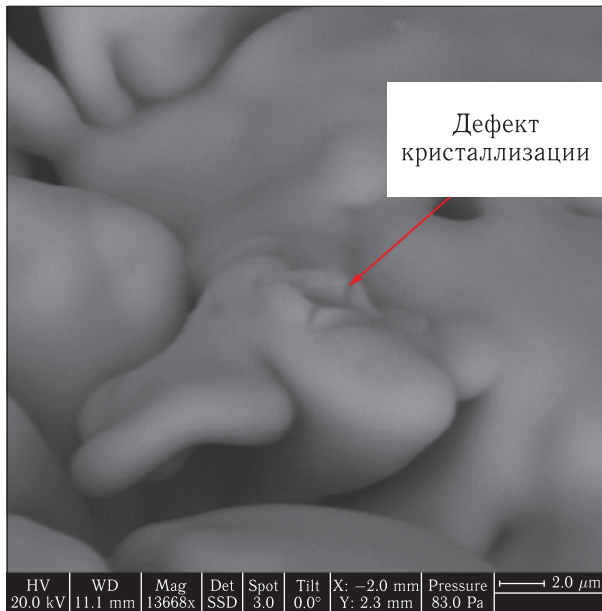


Рис. 4. Дефект кристаллизации в танталовом конденсаторе [3]

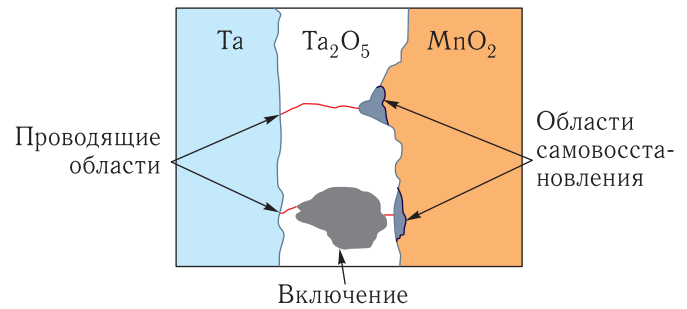


Рис. 5. Эффект самовосстановления на поверхности диэлектрика [3]

рок на этапе изготовления конденсаторов могут частично восстанавливаться. Схематическое изображение эффекта самовосстановления представлено на рис. 5.

Конденсаторы, содержащие подобные дефекты, способны успешно пройти все тесты на соответствие документации изготовителя и иметь соответствующие значения электрических параметров. Однако при переходных процессах в процессе применения в местах восстановления дефектных областей под воздействием тока и образовавшегося тепла происходит ряд химических преобразований, представленных на рис. 6, приводящих к воспламенению тантала и катастрофическому отказу конденсатора. Последствия такого механизма отказа приведены на рис. 7.

Обобщая вышеизложенное, можно предположить, что для предотвращения рассмотренных отказов танталовых чип-конденсаторов в процессе изготовления и эксплуатации аппаратуры необходимо применение методов отбраковки конденсаторов, которые способны вызвать лавинообразный эффект в случае наличия внутренних дефектов конденсатора, при этом исключая «маскирование» дефекта посредством эффекта самовосстановления.

Отечественная нормативная база предусматривает контроль ряда электрических параметров конденсаторов в определенных режимах. При этом максимальный ток заряда конденсаторов по ГОСТ [5] при проведении испытаний необходимо ограничивать 1 А вне зависимости от типа конденсатора и его эксплуатационных характеристик. Дополнительно следует отметить, что оборудование, предназначенное для контроля электрических параметров, такое как измеритель иммитанса E7-20

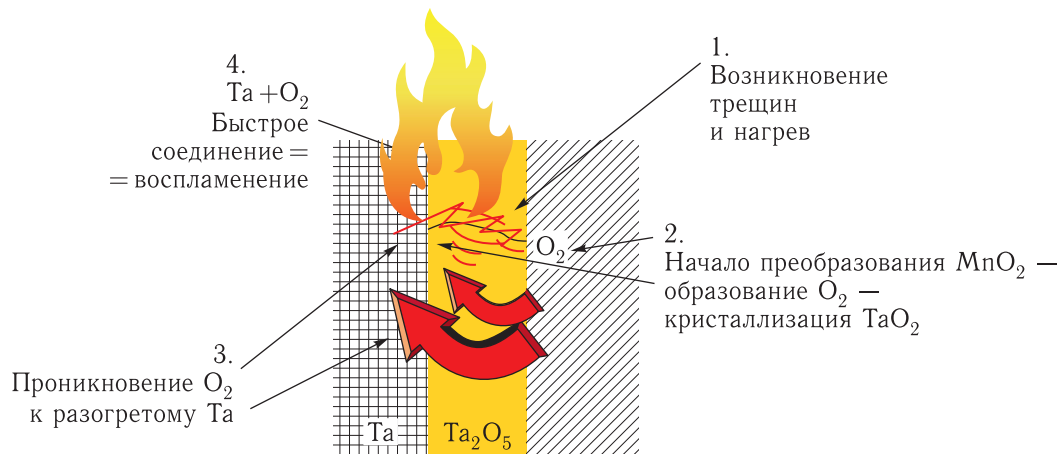


Рис. 6. Схематичное изображение процесса лавинообразного эффекта повреждения танталового конденсатора [4]

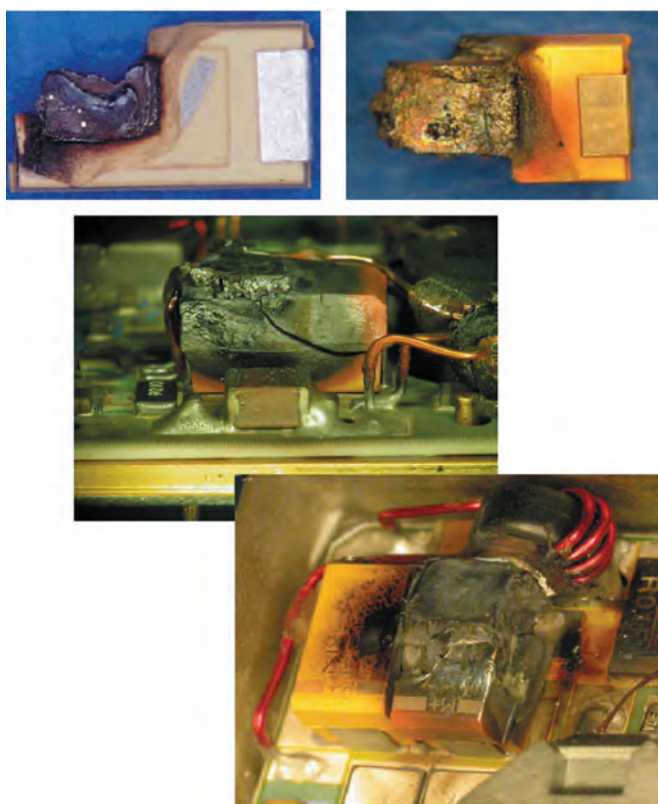


Рис. 7. Результаты катастрофического отказа танталового конденсатора [4]

и аналогичное (используемое во многих испытательных центрах и на заводах-изготовителях отечественных танталовых конденсаторов) имеют токоограничительный резистор порядка 11 кОм. Наличие данного резистора не позволяет в рамках

входного контроля и испытаний, в том числе и в процессе производства на отечественных заводах-изготовителях, при переходных процессах пропускать через конденсаторы ток, близкий по своему значению току, с которым приходится работать конденсатору в полевых условиях (при эксплуатации в реальной аппаратуре). Обобщая изложенное, можно констатировать, что стандартные методы и средства контроля танталовых чип-конденсаторов не являются эффективными для выявления описанных дефектов диэлектрика, влияющих на надежность.

Анализ и сопоставление различных зарубежных источников, специализирующихся на тестировании и (или) изготовлении танталовых конденсаторов [4, 6–8], показывает, что для выявления дефектов изготовления конденсаторов применяется целый набор методов и испытаний, часть из которых не имеют аналогов в отечественной нормативной документации. Одним из таких видов контроля для выявления дефектов изготовления конденсаторов является так называемый Surge Current Test, или испытание импульсным зарядным током [1].

За основу в данной работе было взято решение, применяемое одной из ведущих фирм-изготовителей конденсаторов AVX [1]. Данное решение реализовано в виде схемы, представленной на рис. 8.

Испытание конденсаторов на воздействие импульсного тока заключается в следующем: от источника постоянного напряжения с установленным значением напряжения, равным номинальному напря-

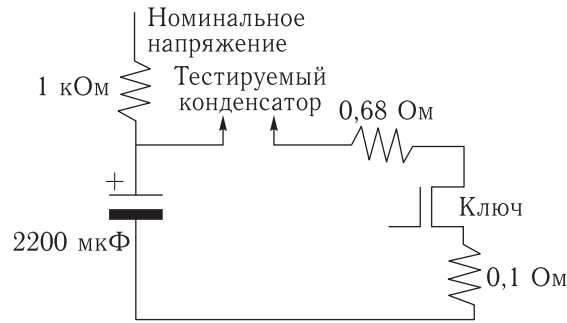


Рис. 8. Схема испытания конденсаторов на воздействие импульсного тока [1]

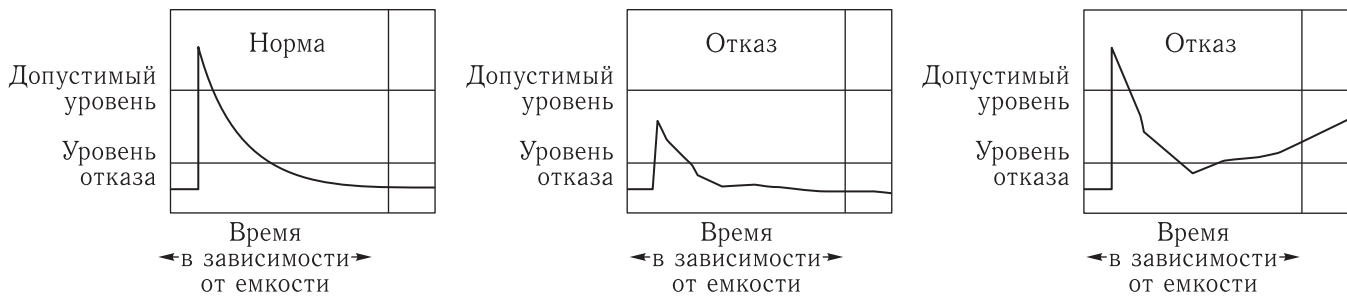


Рис. 9. Критерии забракования конденсаторов по эпюре тока заряда [1]

Таблица. Результаты испытаний на выборках от 5 партий конденсаторов

Партия, усл. №	Количество	Дата изготовления	Разброс зарядных токов, А	$\Delta (I_{MAX}-I_{MIN}), А$	Время разряда, мкс	Примечание
1	19	2015	29–32	3	~60	
2	64	2015	29–32	3		
3	20	2014	24–36	12		Отказ (КЗ) одного конденсатора при испытании
4	5	2011	29–32	3		
5	10	2011	29–32	3		

жению тестируемого конденсатора, заряжается вторичный источник — конденсатор с минимальным значением ESR, емкость которого как минимум в 20 раз больше емкости тестируемого конденсатора, после чего через ограничительные резисторы 0,68 Ом и 0,1 Ом посредством включения полевого транзистора производится заряд тестируемого конденсатора. При этом следует контролировать эпюру напряжения на резисторе 0,1 Ом. Конденсатор считается выдержавшим испытание, если величина

зарядного тока не ниже допустимой, а ток утечки спустя некоторое время не превышает определенный уровень — рис. 9.

Для оценки возможности применения данного способа отбраковки конденсаторов авторами были проведены испытания на выборках от 5 партий конденсаторов с близкими по измеренному значению ESR. Все конденсаторы проходили входной контроль и дополнительные испытания, а некоторые из них — и сертификационные испытания.

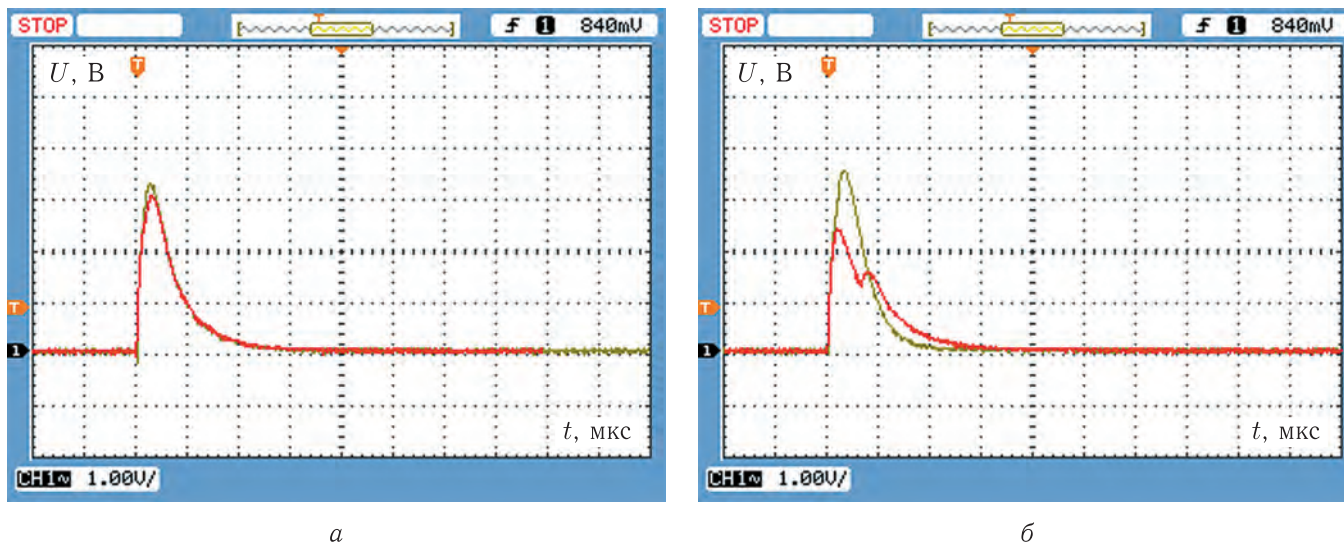


Рис. 10. Типовые эпюры напряжения на резисторе 0,1 Ом при испытании: хороших (а) и потенциально ненадежной (б) партий

У конденсаторов партии усл. № 3, изг. 2014 г. (считаем ее потенциально ненадежной), зафиксированы три случая отказа на этапе эксплуатации. Схема испытания аналогична указанной на рис. 8, однако для уменьшения влияния сопротивления канала полевого транзистора был использован электромеханический переключатель. Результаты испытаний приведены в таблице на стр. 99, типовые эпюры напряжений в процессе испытания показаны на рис. 10, 11.

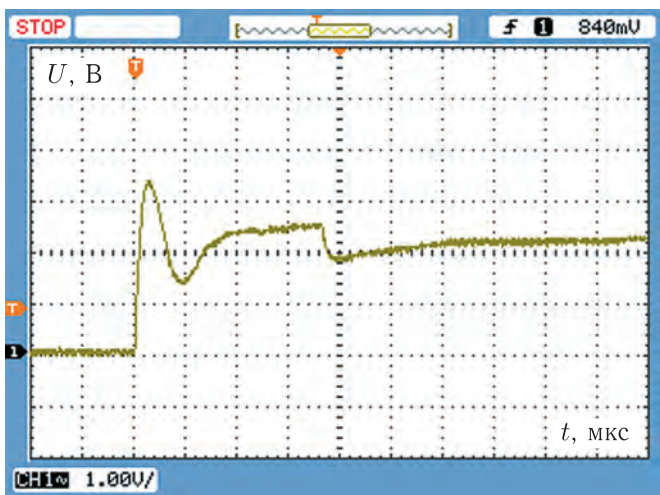


Рис. 11. Эпюра напряжения для отказавшего при испытании конденсатора

Учитывая, что критерии забракования при использовании данного метода не приведены в материалах фирмы-изготовителя [1, 9, 10] и индивидуальны для каждого типонаминала конденсаторов, был использован сравнительный анализ результатов.

Сравнивая полученные значения, можно увидеть, что конденсаторы потенциально ненадежной партии заметно отличаются от остальных как по минимальному значению зарядного тока, так и по разбросу значений зарядного тока в пределах партии.

Отказ конденсатора в процессе испытаний свидетельствует о том, что примененный способ отбраковки конденсаторов позволяет выявлять скрытые дефекты, которые могут проявиться в составе аппаратуры как во время ее испытаний, так и в процессе эксплуатации.

Таким образом, рассмотренный способ отбраковки можно считать одним из возможных инструментов для снижения количества отказов танталовых чип-конденсаторов, имеющих внутренние дефекты, в составе радиоэлектронной аппаратуры. Для полноценного применения испытания на воздействие импульсного тока необходимо выработать численные критерии отбраковки для соответствующих типонаминалов конденсаторов на основании статистических данных испытаний.

## Список литературы

1. *Gill J.* Surge in solid tantalum capacitors, AVX technical paper, AVX ltd, Tantalum divisionpaigton, England, S-HDF10M295-N.
2. Танталовые конденсаторы: особенности применения // Сайт АО «Компэл». 1993–2019. <https://www.compel.ru/lib/articles/tantalovyie-kondensatory-osobennosti-primeneniya> (Дата обращения 20.04.2018).
3. *Fritzler Th.* Scintillation conditioning of tantalum capacitors with manganese dioxide cathodes // Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 2013. P. 53.
4. *Teverovsky A.* Surge Current Testing and Derating for Solid Tantalum Capacitors // Parts, Packaging, and Assembly Technologies Office, Code 562, GSFC/ASRC Federal Space and Defense, ESA Sept. 2013. P. 17.
5. ГОСТ 28885-90. Конденсаторы. Методы измерений и испытаний. М.: ИПК «Издательство стандартов», 1990. 29 с.
6. *Teverovsky A.* Effect of Surge Current Testing on Reliability of Solid Tantalum Capacitors // The 28th Symposium for Passive Components, CARTS'08, Newport Beach, CA, 2008. P. 20.
7. *Teverovsky A.* Screening and Qualification Testing of Chip Tantalum Capacitors for Space Applications // Greenbelt: Dell Perot Systems Code 562, NASA GSFC, MD 20771. P. 19.
8. *Virkki J.* Testing the effects of temperature cycling on tantalum capacitors / S. Tuukkanen. Tampere, Finland: Tampere University of Technology, Department of Electronics, P.O. Box 692, FI-33101. 2010. P. 4.
9. *Tomáš Zedníček.* Voltage Derating Rules for Solid Tantalum and Niobium Capacitors / John Gill. AVX technical paper, AVX ltd, Tantalum divisionpaigton, 2003.
10. Surface Mount Tantalum // Сайт AVX. 2019. [http://www.avx.com/docs/techinfo/Surface\\_Mount\\_Tantalum.pdf](http://www.avx.com/docs/techinfo/Surface_Mount_Tantalum.pdf) стр. 45-56 (Дата обращения 25.01.2019).