

## **Анализ влияния внутренних дефектов на надежность танталовых конденсаторов**

**А. Н. Алыков**, *ncseo@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**И. Ю. Булаев**, *ncseo@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Т. Ю. Корбанкова**, *ncseo@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**А. Я. Кулибаба**, *ncseo@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** Входной контроль танталовых чип-конденсаторов у изготовителя радиоэлектронной аппаратуры затруднителен по причине того, что они поставляются в пластиковых транспортировочных лентах. Для обеспечения возможности обнаружения внутренних дефектов конденсаторов предлагается использовать рентгеноскопию. Данный метод позволяет провести внутренний визуальный контроль всех элементов в ленте, не нарушая целостность упаковки. В ходе исследовательской работы были установлены основные типы внутренних дефектов танталовых чип-конденсаторов. Для выявления связи между надежностью элементов и наличием дефектов были проведены дополнительные испытания, результаты которых подтвердили эффективность рентгеноскопии. Кроме того, некоторые типы дефектов невозможно выявить по отличающимся электрическим параметрам в данный момент, но вопрос, связанный с надежностью конденсаторов с такими дефектами и возможностью их применения в бортовой аппаратуре, остается открытым.

**Ключевые слова:** танталовые чип-конденсаторы, рентгеноскопия, внутренние дефекты, надежность, испытания

## **Impact Analysis of Internal Defects of Tantalum Capacitors on their Reliability**

**A. N. Alykov**, *contact@spacecorp.ru*

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

**I. Yu. Bulaev**, *contact@spacecorp.ru*

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

**T. Yu. Korbankova**, *contact@spacecorp.ru*

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

**A. Ya. Koulibaba**, *contact@spacecorp.ru*

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

**Abstract.** Input control of tantalum chip capacitors is difficult for the electronic equipment manufacturer due to the fact that they are supplied in plastic transporting tapes. To detect internal defects of capacitors it is proposed to use X-ray radiography. This method allows performing an internal visual control of all elements in the tape without disturbing the integrity of the package. During the research, the main types of internal defects of tantalum chip capacitors were found. Additional tests were carried out to identify the link between the reliability of the elements and the presence of defects, the results of which confirmed the effectiveness of X-ray radiography. In addition, some types of defects cannot be detected by different electrical parameters at the present moment, but the issue of the reliability of capacitors with such defects and the possibility of their application in on-board equipment remains open.

**Keywords:** tantalum chip capacitors, X-ray radiography, internal defects, reliability, testing

## Введение

В современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) широко применяются танталовые чип-конденсаторы. Учитывая высокие требования к надежности бортовой аппаратуры (БА) ракетно-космической техники, большое количество применяемых конденсаторов в составе приборов, а также риск поставки контрафактной продукции, до этапа монтажа следует проводить входной контроль данных изделий. Однако проведение сплошного (для 100% изделий) входного контроля танталовых чип-конденсаторов затруднено, так как данные элементы поставляются в пластиковых транспортировочных лентах для автоматизированного монтажа. Испытания в таком случае могут проводиться на выборке, что снижает достоверность результатов, так как отдельные конденсаторы могут содержать внутренние дефекты. Более того, основываясь на результатах проведенных исследований, можно сделать вывод, что не все внутренние дефекты, влияющие на надежность элемента, можно обнаружить путем контроля электрических параметров.

Для решения этой проблемы предлагается использовать рентгеноскопию. Данный метод позволяет провести внутренний визуальный контроль всех элементов в ленте, не нарушая целостности упаковки.

Главная цель данной работы — повышение качества отбраковки танталовых чип-конденсаторов, используемых в БА. Для достижения поставленной цели были сформулированы основные задачи по исследованию танталовых чип-конденсаторов:

формирование выборки конденсаторов с различными дефектами, разработка программы и проведение испытаний, обработка результатов. Практической ценностью проведенных исследований является подтверждение возможности использования рентгеноскопии при испытаниях конденсаторов на надежность.

В НЦ СЭО АО «Российские космические системы» было проведено экспериментальное исследование танталовых конденсаторов с использованием рентгеноскопии.

Все обнаруженные внутренние особенности танталовых чип-конденсаторов были разделены на группы:

- повреждения анодного тела (сколы, трещины);
- неоднородности в материалах внешних выводов;
- брызги сварки;
- деформация внутренних элементов;
- некачественная сварка анода с внешним выводом (утонение, разрыв);
- посторонние частицы вблизи анодного тела.

Примеры обнаруженных внутренних особенностей представлены на рис. 1, *а* — конденсатор со сколом на анодном теле, на рис. 1, *б* — конденсатор с деформированными внутренними элементами (изгиб внутреннего вывода анода).

Однако по причине отсутствия актуальной нормативно-технической базы по данному направлению сложно судить о том, являются ли выявленные особенности дефектами, и об их количественном влиянии на надежность конденсаторов.

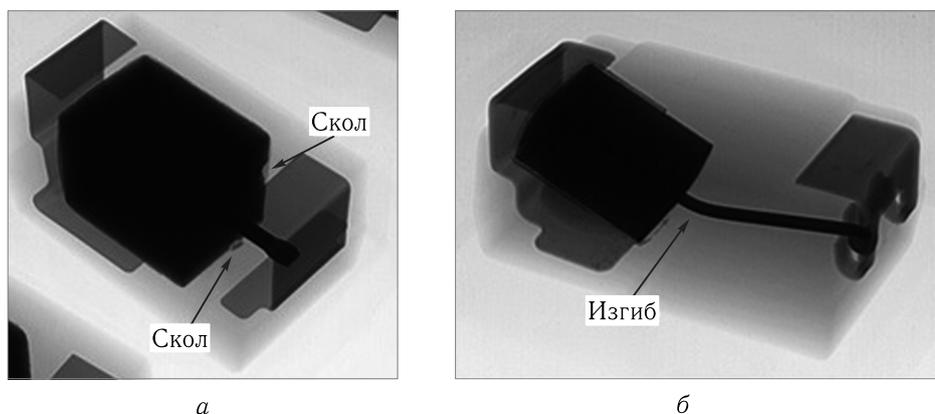


Рис. 1. Примеры обнаруженных внутренних особенностей танталовых чип-конденсаторов

Поэтому в НЦ СЭО были инициативно проведены дополнительные испытания танталовых чип-конденсаторов с внутренними особенностями (потенциальными дефектами), обнаруженными при помощи рентгеноскопии.

## Программа дополнительных испытаний

В большинстве случаев причиной забракования конденсаторов является отклонение информативных параметров (ток утечки, эквивалентное последовательное сопротивление, емкость) от номинальных значений в результате воздействия влажности, напряжения, температуры и т. п. Поэтому для выявления зависимости дрейфа электрических параметров (по которой можно косвенно судить о показателях надежности) от типов обнаруженных дефектов были проведены испытания, типичные для зарубежных и отечественных испытательных центров. Основываясь на научно-техническом задании и статистике результатов отбраковки, в НЦ СЭО была сформирована программа испытаний (табл. 1).

После каждого вида воздействия проводился контроль внешнего вида и дрейфа электрических параметров, таких как ток утечки, емкость, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), тангенс угла диэлектрических потерь.

Одним из эффективных испытаний конденсаторов являются испытания на воздействие импульсным током. Импульсный заряд-разряд позво-

ляет выявить дефекты, проявляющиеся при переходных процессах (включение/выключение цепей питания). Протекание импульсного тока может активировать дефекты в приграничных слоях диэлектрика, а также при достаточно большом токе препятствовать процессу самовосстановления [1]. Кроме того, условия применения танталовых конденсаторов в РЭА могут быть более жесткими, чем при проведении испытаний на производстве с учетом наличия в испытательных стендах токоограничивающих резисторов и индуктивности проводов [2]. Например, конденсатор с емкостью 15 мкФ, номинальным напряжением  $U_{ном} = 10$  В и эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR)  $R = 0,5$  Ом для обеспечения двойного запаса по напряжению применяют в цепи с напряжением  $U_{реал} = 5$  В. Соответственно ток заряда конденсатора может достигать  $I_{реал} = U_{реал}/R = 5/0,5 = 10$  А. При тестировании конденсаторов на производстве при номинальном напряжении используется, как правило, токоограничивающее сопротивление  $R_{огр} = 1$  Ом и максимальный ток заряда конденсатора в таком случае не превышает  $I_{тест} = U_{ном}/(R_{огр} + R) = 10/(1 + 0,5) = 6,7$  А [3]. Кроме того, согласно документации на отечественные конденсаторы необходимо ограничивать ток заряда до 1 А для любых конденсаторов вне зависимости от его характеристик и условий применения. Таким образом, ток заряда в реальном устройстве может в разы превышать значение тока при тестировании. В этом случае дефекты,

Таблица 1. Программа испытаний

Порядок проведения	Тип испытания	Условия проведения
1	Термоциклирование	100 термоциклов от минимальной до максимальной температуры хранения
2	Испытания на воздействие повышенной влажности	1 сутки при относительной влажности 85%, температуре 85 °С
3	Испытания на вибропрочность	С ускорением до 20 g на частотах 20–2000 Гц по 4 часа в двух плоскостях
4	Заряд–разряд импульсным током	5 циклов с номинальным напряжением
5	Термоциклирование	250 термоциклов от минимальной до максимальной температуры хранения
6	Испытания на безотказность	14 суток при номинальном напряжении и максимальной рабочей температуре

проявляющиеся при больших токах, не будут выявлены при тестировании, но могут привести к выходу конденсатора из строя в приборе. Таким образом, для более детального исследования необходима коррекция общепринятых методик тестирования в части приближения токоограничивающего резистора к реальным значениям в аппаратуре.

Более того, дефекты, влияющие на ESR и импульсный заряд конденсатора, могут остаться незамеченными при испытаниях на частоте, приведенной в спецификации. Для решения данной проблемы и приближения условий тестирования к эксплуатационным предлагается отслеживать динамический ток заряда [4]. Данный метод позволяет отбраковать конденсаторы, максимальный ток заряда которых не достигает необходимого значения, а также конденсаторы, сохраняющие большой ток утечки после заряда (рис. 2).

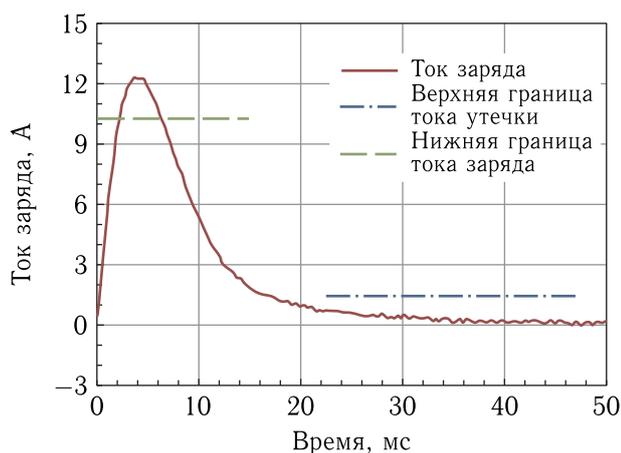


Рис. 2. Оциллограмма тока импульсного заряда конденсатора

В ходе испытаний в качестве возможного информативного параметра также рассматривались обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) (рис. 3). При прикладывании обратного напряжения на ВАХ можно заметить форму нелинейности и напряжение, при котором ток утечки резко увеличивается. Например, при испытаниях партии конденсаторов напряжение пробоя одного конденсатора значительно ниже, чем у остальных (для численного определения можно использовать правило «3δ»); основываясь на том, что партия должна быть однородной, такой конденсатор можно отнести к потенциально ненадежным. Кроме этого, по разбросу

ВАХ конденсаторов из одной выборки можно судить о качестве изготовления всей партии. Большой разброс может свидетельствовать о низкой технологичности процесса, о плохом качестве используемого сырья, о низкой культуре производства. На представленном на рис. 3 семействе обратных ВАХ для группы конденсаторов из одной партии отсутствуют кривые, значительно отличающиеся от других, разброс незначителен, из чего можно сделать вывод об однородности партии.

## Результаты испытаний

По итогам проведенных испытаний были получены следующие результаты.

1. Конденсатор с некачественной сваркой вывода анода с внешним выводом (разрыв с правой стороны и сильное утонение с левой стороны (рис. 4, а)) отказал из-за увеличения эквивалентного последовательного сопротивления.

На рис. 5 представлена диаграмма дрейфа ESR: из каждой группы конденсаторов с определенным типом дефекта был выбран элемент с наибольшим ESR в выборке. В ходе испытаний конденсатор с разрывом сварки внешнего вывода отказал с превышением границы по ESR (0,9 Ом). Необходимо отметить, что до испытаний значение ESR было в пределах границ отбраковки.

2. Конденсаторы с посторонними частицами в компаунде вблизи танталового тела в среднем отказывали раньше остальных при испытаниях на безотказность (табл. 2).

3. Дефекты, связанные с некачественной сваркой (разрыв или утонение только с одной стороны (рис. 4, б)), брызгами сварки и неоднородностями, на внешних выводах не показали влияния на деградацию электрических параметров конденсатора.

4. Одна из партий конденсаторов отличалась большим количеством элементов с дефектами. В ходе испытаний на безотказность почти все конденсаторы данной партии, в отличие от других, отказали с образованием «короткого замыкания». Можно предположить, что данная партия не соответствовала характеристикам, указанным в документации на данный тип ЭРИ, а наличие большого количества внутренних дефектов свидетельствует о нарушении технологий производства.

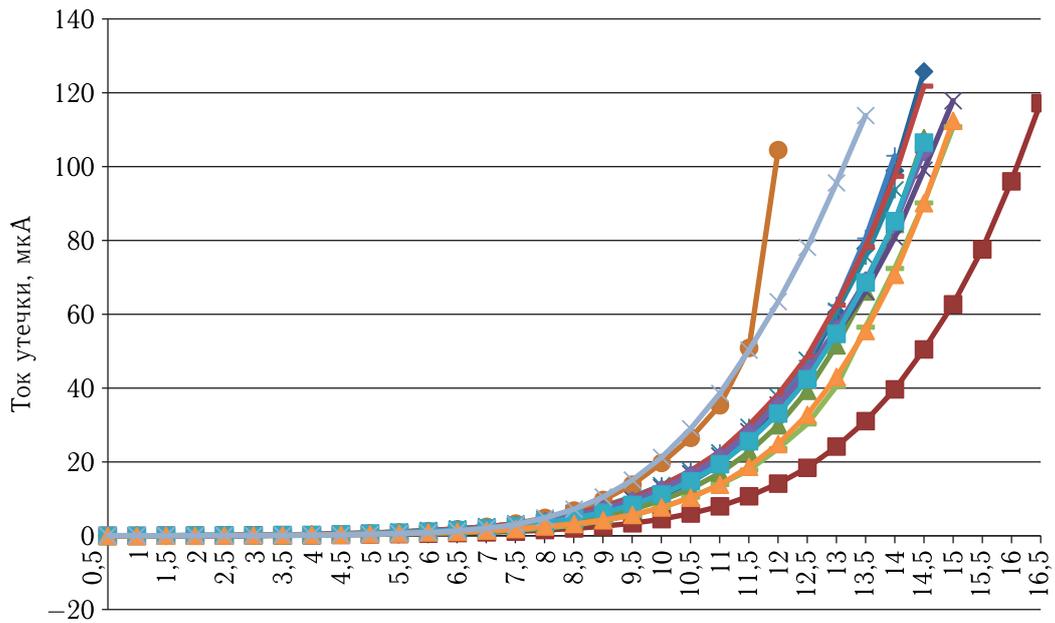
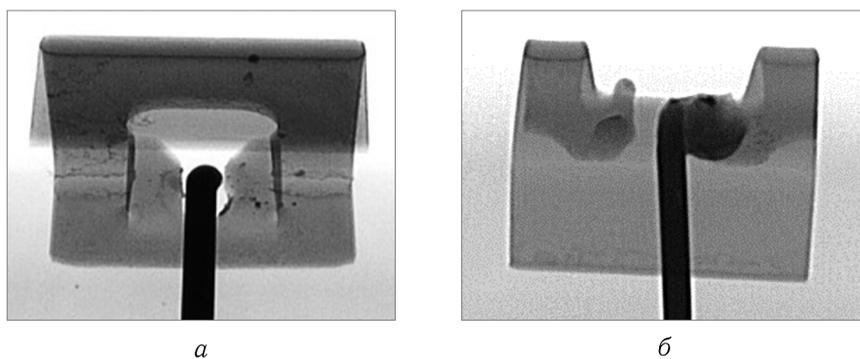


Рис. 3. Обратный ток утечки конденсатора



а

б

Рис. 4. Конденсатор с некачественной сваркой вывода анода с внешним выводом: а) разрыв с правой стороны и сильное утонение с левой стороны; б) разрыв с левой стороны

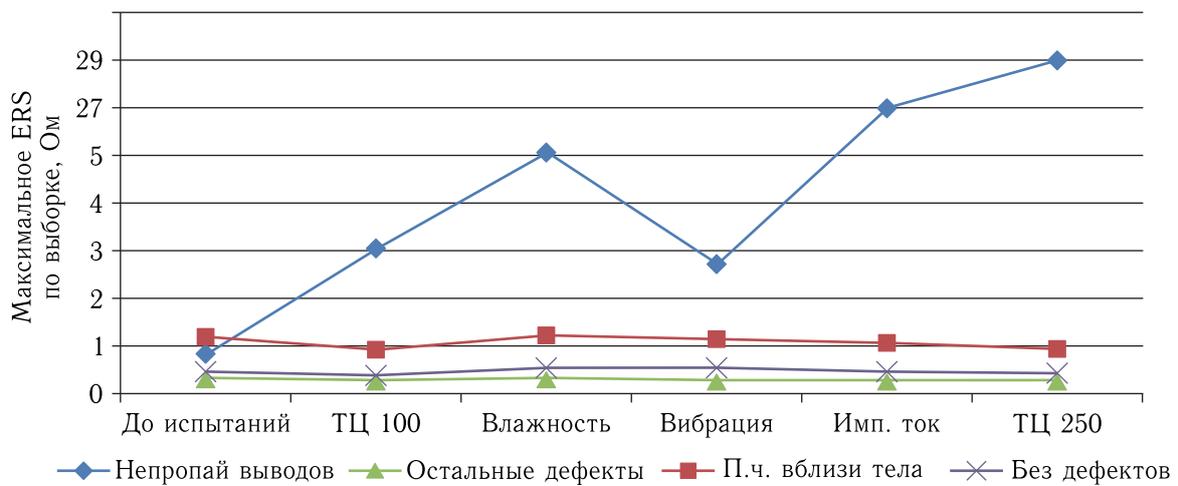


Рис. 5. Дрейф ESR

Таблица 2. Выборки конденсаторов по типам дефектов для испытаний на безотказность

Тип выборки	Кол-во конденсаторов в выборке, шт.	Кол-во отказавших конденсаторов, шт.
Повреждение анодного тела (сколы, трещины)	6	1
Деформация внутренних элементов (изгибы выводов, искаженная ориентация)	6	1
Посторонние частицы вблизи анодного тела	11	5
Неоднородности в материалах внешних выводов	2	0
Брызги сварки	12	1
Некачественная сварка анода к внешнему выводу (утонение)	7	0
Отсутствие сварки анода к внешнему выводу (разрыв)	1	1
Без дефектов	17	1

Дефекты типа «повреждения анодного тела» и «деформация внутренних элементов» требуют более детального исследования. В дальнейшем планируется провести второй этап и добавить в программу испытания на удар и безотказность в динамическом режиме.

По полученным результатам дрейфа электрических параметров (ток утечки) был проведен дисперсионный анализ [5]. Гипотеза о равенстве средних значений токов утечки групп конденсаторов с различными дефектами была отклонена, т. е. влияние исследуемых дефектов конденсаторов на информативный параметр (ток утечки) статистически различно. Был использован метод линейных контрастов, который позволяет сравнить влияние каждого типа дефекта на информативный параметр. Для всех партий проверялись гипотезы равенства математического ожидания значений токов утечки конденсаторов без дефектов и конденсаторов с каждым видом дефекта. Результаты рассчитанных и критических (табличных) выборочных значений статистики представлены в табл. 3.

По полученным данным можно сделать вывод, что статистически различны средние значения токов утечки конденсаторов с дефектом «посторонние частицы» и бездефектных конденсаторов. Иначе говоря, конденсаторы с дефектом «посторонние частицы» значительно отличаются по информативному параметру «ток утечки» от бездефектных. Учитывая количество отказавших конденсаторов с данным типом дефекта при испытаниях на безотказность, а также повышенные токи утечки,

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа

№ партии	Проверяемый дефект	Выборочное значение статистики	
		рассчитанное	критическое
1	Посторонние частицы вблизи анодного тела	2,1645	1,356
	Некачественная сварка	0,0246	
2	Брызги сварки	0,5220	1,415
	Отсутствие сварки к внешним выводам	0,0426	
	Неоднородности в материалах	0,5822	
	Посторонние частицы вблизи анодного тела	1,9578	
3	Посторонние частицы вблизи анодного тела	1,5191	1,440
4	Повреждение анодного тела	0,9627	1,372
	Деформация внутренних элементов	0,1494	
	Посторонние частицы вблизи анодного тела	1,3820	

можно резюмировать, что дефект «посторонние частицы» значительно влияет на надежность танталовых конденсаторов.

В рамках данной работы проводились испытания на безотказность с расчетом среднего срока службы по методике, основанной на прогнозировании отказа по результатам деградации информативных параметров.

Таблица 4. Результаты расчета срока службы

Тип выборки	ESR до БО, Ом	ESR после БО, Ом	Верхняя граница ESR, Ом	Срок службы, ч	Срок службы, лет
Повреждения анодного тела	0,033	0,056	0,4	105 346	12,0
Деформация внутренних элементов	0,046	0,072		89 890	10,3
Посторонние частицы вблизи анодного тела	0,028	0,113		28 894	3,3
Бездефектные конденсаторы	0,039	0,040		2 383 345	272,1

Расчет проводился по формуле  $T = K_y \times \frac{(\Pi_{кр.мах} - \Pi_{до}) \cdot T_{БО}}{\Pi_{после} - \Pi_{до}}$ , где  $K_y = 19,649$  — коэффициент ускорения для конденсаторов данного типа,  $\Pi_{кр.мах}$  — верхняя граница ESR,  $T_{БО}$  — длительность испытаний в часах,  $\Pi_{до}$  и  $\Pi_{после}$  — значения информативного параметра до и после испытаний на безотказность.

В данном случае расчет проводился для одной партии конденсаторов после испытаний на безотказность (2 недели при максимальном напряжении и максимальной температуре) по информативному параметру «ESR» (верхняя граница 0,4 Ом при 100 кГц). Полученные результаты представлены в табл. 4.

Полученные результаты подтверждают критичность обнаруженных на рентгенографии внутренних дефектов танталовых чип-конденсаторов. Однако ввиду малого объема выборки и ограниченного времени испытаний полученные результаты нельзя применять для долгосрочного прогноза. Поэтому для уточнения показателей надежности планируется провести второй этап испытаний с увеличением количества испытуемых элементов и времени испытаний.

## Выводы

Надежность танталовых чип-конденсаторов, используемых в космическом приборостроении, имеет достаточно сильное влияние на надежность бортовой аппаратуры в целом. В данной статье было показано влияние обнаруженных на рентгенографии дефектов на дрейф информативных параметров и, следовательно, на надежность конденсаторов. Были продемонстрированы отказы конденсаторов,

отбракованных на рентгенографии, при различных внешних воздействиях. Кроме того, было доказано, что наличие большого количества внутренних дефектов может быть признаком контрафактной продукции. Следовательно, для повышения достоверности отбраковки потенциально ненадежных элементов предлагается проводить дополнительные испытания, в состав которых, кроме того, будут включены сплошная рентгенография и испытания на импульсный заряд-разряд.

## Список литературы

1. *Fritzler T., Azarian M.H., Pecht M.G.* Scintillation Conditioning of Tantalum Capacitors With Manganese Dioxide Cathodes, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 01/2014; 14(2):630-638. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6782440> (Дата обращения 31.01.2020).
2. *Горбачев И. П., Сашов А. А.* Метод выявления внутренних дефектов танталовых конденсаторов для снижения количества отказов аппаратуры // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 1. С. 94–101.
3. *Teverovsky A.* Degradation of Leakage Currents and Reliability Prediction for Tantalum Capacitors / Annual Reliability and Maintainability Symposium Proceedings, 2016. 6 p. <https://nepp.nasa.gov/files/28093/NEPP-CP-2016-Teverovsky-Paper-RAMS-TN26842.pdf> (Дата обращения 31.01.2020).
4. *Zednicek T.* Voltage Derating Rules for Solid Tantalum and Niobium Capacitors / Gill J. AVX technical paper, AVX Ltd, Tantalum division paigton, 2003. 8 p. <https://www.avx.com/docs/techinfo/Tantalum-NiobiumCapacitors/voltageged.pdf> (Дата обращения 31.01.2020).
5. *Зарубин В. С., Крищенко А. П.* Математическая статистика. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 421 с.