

УДК 620.169.2: 658.562.012.7
DOI: 10.22213/2410-9304-2021-4-49-54

Исследование танталовых объемно-пористых конденсаторов с использованием ускоренной методики оценки качества СТРЕСС-ТЕСТ

П. Л. Кузнецов, АО «Элеконд», Сарапул, Россия

В. А. Кузнецова, кандидат технических наук, СПИ (филиал) ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Сарапул, Россия

В. В. Муравьев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье рассматривается вопрос о возможности проведения ускоренных испытаний по оценке качества танталовых объемно-пористых конденсаторов согласно разработанной методике СТРЕСС-ТЕСТ взамен устаревших методов, требующих затратных ресурсов для проведения испытаний, и не обеспечивающих должную отбраковку конденсаторов (выявление дефектов оксидного слоя).

Известно, что выращенный аморфный пентаоксид способен образовать равномерный слой на поверхности тантала, но вследствие различных факторов (из-за неровности поверхности, пористости, неравномерности распределения электролита во время процесса оксидирования и электрического контакта рейконоситель-анод) создается поверхность с «проблемными участками», «непроформовкой», или «слабым местом», отбраковка которых наиболее важна для современных танталовых конденсаторов. Проведение сравнительного анализа применения стандартного метода и методики СТРЕСС-ТЕСТ для ускоренной оценки качества танталовых объемно-пористых конденсаторов позволит доказать эффективность разработанной методики.

Разработанная методика СТРЕСС-ТЕСТ основана на циклическом (10 циклов) приложении к конденсатору повышенного напряжения (соответствующего напряжению при формировании оксидного слоя на танталовом аноде) при продолжительности каждого цикла в течение 5 минут, что доказывается проведением расчета данного процесса на основе модели ускорения безотказности Журкова. Методика позволяет заблаговременно выявлять некачественные конденсаторы при дефектах в структуре оксидного слоя. Методика позволяет проводить оценку качества конденсаторов в ускоренные сроки, что подтверждается полученной регрессионной моделью эквивалентного последовательного сопротивления в сравнении с регрессионной моделью стандартного вида испытаний на длительную безотказность в течение 24 000 часов. Применение методики СТРЕСС-ТЕСТ для танталовых объемно пористых конденсаторов позволит сократить время проведения испытаний ориентировочно на два с половиной года.

Ключевые слова: танталовые конденсаторы, методика испытаний, эквивалентное последовательное сопротивление, оксидный слой, дефект.

Введение

Известно, что тантал является вентильным металлом [1], и, соответственно, выращенный аморфный пентаоксид способен образовать равномерный слой на поверхности тантала, но вследствие различных факторов (из-за неровности поверхности, пористости, неравномерности распределения электролита во время процесса оксидирования и электрического контакта рейконоситель-анод) создается поверхность с «проблемными участками», «непроформовкой», или, иначе, «слабым местом» (рис. 1). Толщина диэлектрика контролируется напряжением, прикладываемым в течение процесса формирования (как правило, для танталовых объемно-пористых конденсаторов это коэффициент 1,8 от номинального напряжения).

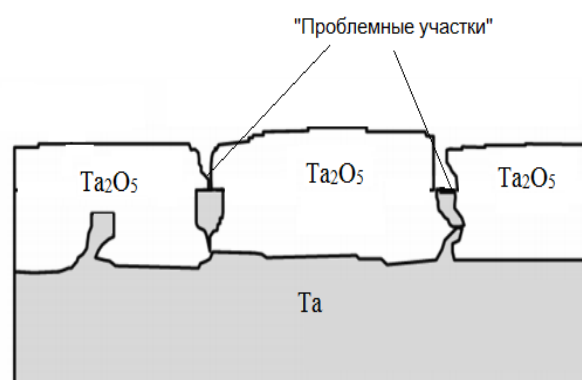


Рис. 1. Проблемные участки в оксидном слое (диэлектрике)

Fig. 1. Problem areas in the oxide layer (dielectric)

Существуют различные типы танталовых конденсаторов:

– объемно-пористые с жидким или гелевым электролитом на основе кислот (серная и т. д.) в зависимости от технологии изготовления;

– оксидно-полупроводниковые с твердым электролитом (марганец, полимер).

Для контроля качества [2–14] оксидного слоя в производстве танталовых объемно-пористых конденсаторов применяется метод 510 по ГОСТ 28885–90, заключающийся в воздействии на конденсаторы перенапряжения, которое составляет $1,15 \cdot U_{\text{ном}}$ для конденсаторов с $U_{\text{ном}} \leq 315$ В. На конденсатор оказывается воздействие 1000 циклов. Каждый цикл состоит из заряда и разряда. Заряд – подключение конденсатора к источнику напряжения на (30 ± 2) с. Разряд – отключение конденсатора от источника напряжения на 5 мин (30 ± 10) с. При испытании объемно-пористых и оксидно-полупроводниковых конденсаторов сопротивление цепей заряда и разряда составляет $(1000+100)$ Ом. Данный метод был разработан в 1990 году и применяется по настоящее время. Однако данный метод устарел (современные конденсаторы оксидируются при большем значении напряжения) и не обеспечивает должную отбраковку конденсато-

ров (выявление дефектов оксидного слоя). Также основным методом оценки качества танталовых объемно-пористых конденсаторов является проведение испытаний на длительную безотказность с приложением номинального напряжения по ГОСТ РВ 20.57.414–97.

Целью данной статьи является оценка целесообразности применения методики СТРЕСС-ТЕСТ для ускоренной оценки качества танталовых объемно-пористых конденсаторов.

Методика эксперимента.

Исходные требования

Методика основана на циклическом (10 циклов) приложении к конденсатору повышенного напряжения с коэффициентом 1,8 от номинального напряжения (соответствующего напряжению при формировании оксидного слоя на танталовом аноде) при продолжительности каждого цикла в течение 5 минут. В ходе проведения методики выявляются конденсаторы с проблемными участками (рис. 2) за счет активации процесса электрохимического старения и ионизационного пробоя. Методика разработана для выборочного контроля.

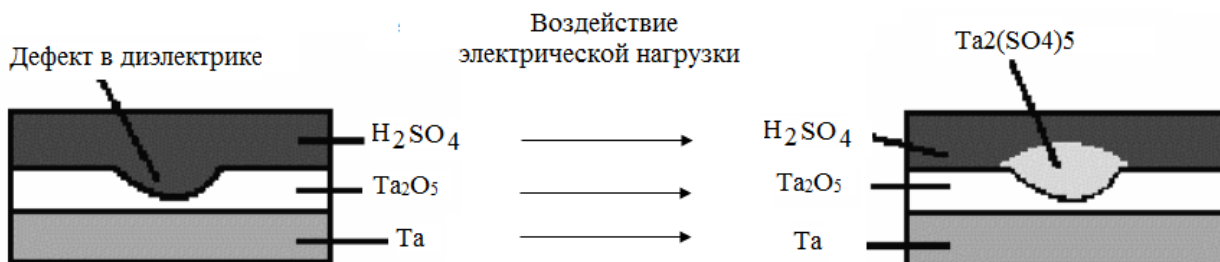


Рис. 2. Дефекты, выявляемые методикой СТРЕСС-ТЕСТ

Fig. 2. Defects detected by the STRESS TEST technique

Ранее были проведены работы по оценке применения методики СТРЕСС-ТЕСТ на конденсаторах оксидно-электролитических алюминиевых, объемно-пористых танталовых, оксидно-полупроводниковых танталовых и конденсаторах с двойным электрическим слоем. Методика показала хорошие результаты по конденсаторам объемно-пористым танталовым, что отражено в работе П. Л. Кузнецова в этом журнале за 2021 год. Оценку качества конденсаторов целесообразно проводить по параметру $R_{\text{экв}}$ на частоте 100 кГц, что отмечено в работе [15].

Согласно ОСТ 11 0481–87 процесс ускорения оценки долговечности конденсаторов была выбрана модель Журкова, максимально приближенная к полученным результатам:

$$\tau_{\text{уск}} = \tau_0 \cdot e^{\frac{w - \alpha \cdot K_n}{K \cdot T}}, \quad (1)$$

где τ_0 – параметр, зависящий от конструкции изделий, ч; w – энергия активации ионного переноса, эВ; K – коэффициент Больцмана, В/градус; K_n – коэффициент нагрузки; α – коэффициент, зависящий от типа носителей заряда, структуры диэлектрика и напряженности поля при номинальном напряжении, эВ; T – температура, К.

Для определения коэффициентов модели проведены испытания конденсаторов К52-... до двух отказов, данные приведены в табл. 1

Таблица 1. Данные для определения коэффициентов модели

Table 1. Data for determining model coefficients

Наименование	Режимы испытаний		Объем выборки, шт.	Продолжительность, тыс. час
	T, K	K_n		
T_1	398	0,7	30	5
T_2	358	1,0	30	14,5
T_3	358	1,15	30	0,9

Согласно ОСТ 11 0481–87 составлена система уравнений:

$$\begin{cases} \ln T_1 = \ln \tau_0 + \frac{w - \alpha \cdot 0,7}{0,87 \cdot 10^{-4} \cdot 398}, \\ \ln T_2 = \ln \tau_0 + \frac{w - \alpha \cdot 1}{0,87 \cdot 10^{-4} \cdot 358}, \\ \ln T_3 = \ln \tau_0 + \frac{w - \alpha \cdot 1,15}{0,87 \cdot 10^{-4} \cdot 358}. \end{cases}$$

Параметры модели τ_0 , α , w получены при решении системы уравнений и приведены в табл. 2. Параметры K_n и T получены опытным путем.

Таблица 2. Полученные данные для методики СТРЕСС-ТЕСТ

Table 2. Data obtained for the STRESS TEST methodology

$\tau_0, ч$	$\alpha, эВ$	$w, эВ$
0,00206	0,1044	0,34

Методика ускоренной оценки качества СТРЕСС-ТЕСТ описывается следующей формулой, основанной на формуле (1) и коэффициентах, приведенных в табл. 1:

$$\tau_{уск} = 0,00206 \cdot e^{\frac{0,34 - 0,1044 K_n}{0,862 \cdot 10^{-4} T}}, \quad (2)$$

Таблица 4. Результаты испытания выборки 2

Table 4. Test results of sample 2

Время испытаний, тыс. ч	0	2	3	8	10	12	16	18	21	24
$R_{экр} \text{ ср, Ом} \leq 1,2$	0,200	0,262	0,232	0,339	0,276	0,244	0,294	0,259	0,270	0,527

В ходе статистической обработки полученных в ходе испытаний данных получены регрессионная модель $R_{экр}$ в зависимости от цикла ис-

где K_n – коэффициент нагрузки; T – температура, К.

Подставляя в формулу (2) коэффициент по напряжению 1,8 и температуру 20 °С (293 К) получаем время для процесса ускорения – 50 минут, что соответствует 10 циклам методики СТРЕСС-ТЕСТ.

Результаты и их обсуждение

Для оценки правильности применения разработанной методики ускоренной оценки качества конденсаторов СТРЕСС-ТЕСТ были взяты 2 выборки конденсаторов К52-... номиналом 35 В × 100 мкФ, $n = 30$ шт.

На выборке 1 было проведено 10 циклов испытаний при напряжении, равном 1,8 $U_{ном} = U_{исп} = 63$ В и температуре 20 °С. Контроль электрических параметров (эквивалентное последовательное сопротивление $R_{экр}$, Ом на частоте 100 кГц). Контроль $R_{экр}$ проводился в наиболее показательных точках: 0 цикл, 1 цикл, 7 цикл, 9 цикл, 10 цикл.

На выборке 2 проведено испытание на длительную безотказность $U_{исп} = 35$ В. $T_{исп} = 85$ °С, продолжительность испытаний – 24000 ч. Контроль $R_{экр}$ проводился в точках: 0 ч, 2000 ч, 3000 ч, 8000 ч, 10 000 ч, 12 000 ч, 16 000 ч, 18 000 ч, 21 000 ч, 24 000 ч. После 24 000 ч произошел массовый отказ конденсаторов.

При испытаниях конденсаторов получены следующие усредненные данные, приведенные в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Результаты испытания выборки 1

Table 3. Test results of sample 1

Номер цикла	0	1	7	9	10
$R_{экр} \text{ ср, Ом} \leq 1,2$	0,201	0,222	0,241	0,199	0,352

пытаний (рис. 3) и регрессионная модель $R_{экр}$ в зависимости от времени испытаний (рис. 4).

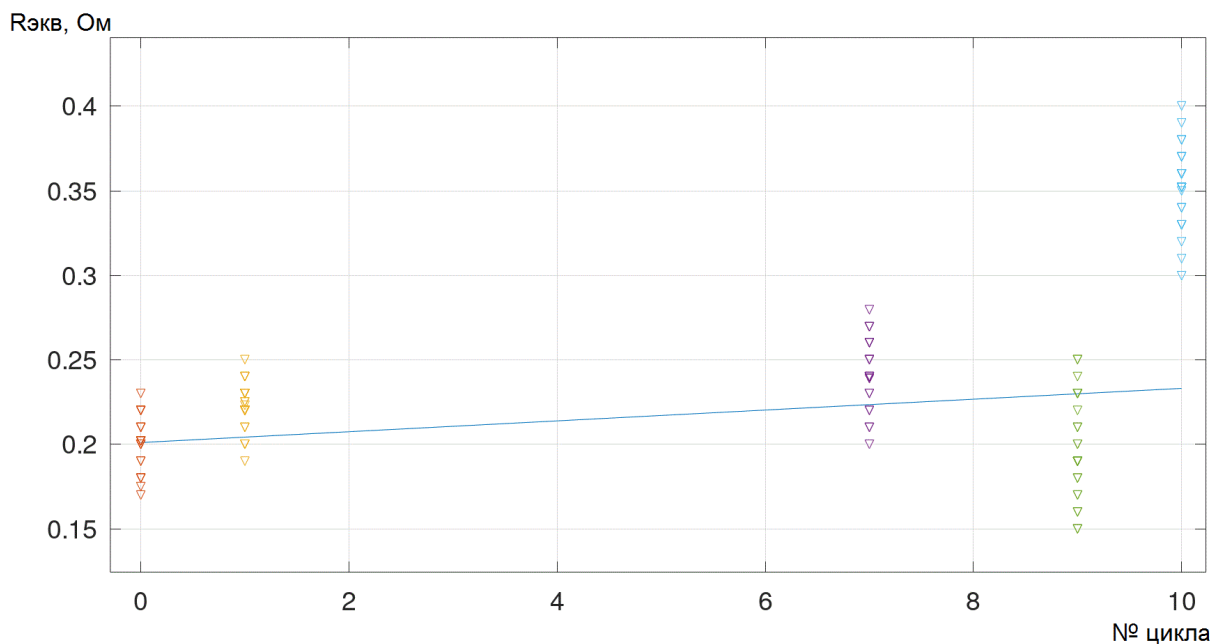


Рис. 3. Регрессионная модель результатов испытаний по методике СТРЕСС-ТЕСТ (выборка 1)
 Fig. 3. Regression model of test results using the STRESS TEST method (sample 1)

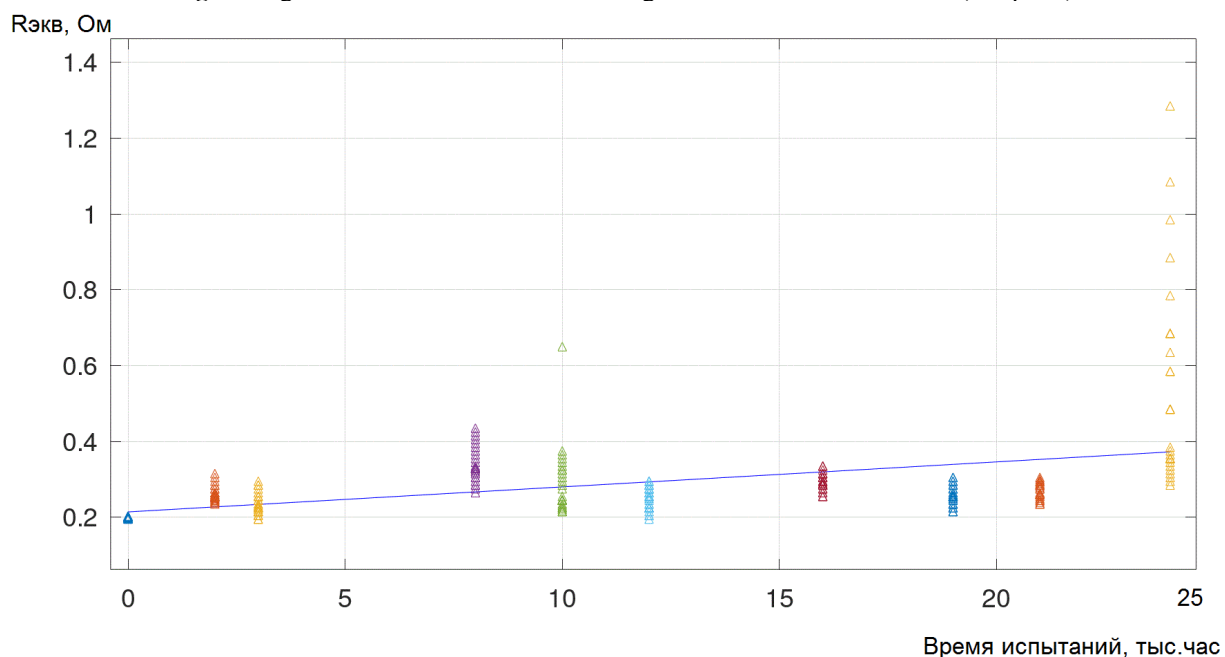


Рис. 4. Регрессионная модель результатов испытаний на длительную безотказность (выборка 2)
 Fig. 4. Regression model of long-term reliability test results (sample 2)

Из полученных данных наблюдается положительная связь между временем испытаний (рис. 4) или количеством циклов (рис. 3) СТРЕСС-ТЕСТ и $R_{экв}$, что обосновывается физико-химическими процессами старения конденсаторов (деградация диэлектрика). Характер поведения регрессионных моделей результатов испытаний на длительную безотказность и результатов испытаний, полученных при проведении СТРЕСС-ТЕСТ, аналогичны и сопоставимы

друг с другом, что делает возможным применение методики СТРЕСС-ТЕСТ взамен устаревших методик испытаний, занимающих длительное время и требующих больших ресурсов.

Выводы

При сравнении статистических данных после проведения испытаний по методике СТРЕСС-ТЕСТ и методом длительной безотказности установлено, что применение метода СТРЕСС-ТЕСТ целесообразно для ускоренной оценки

качества объемно-пористых танталовых конденсаторов. По полученным регрессионным моделям испытаний наблюдается аналогичный характер поведения моделей, полученных при анализе результатов после испытаний на длительную безотказность и после СТРЕСС-ТЕСТ, но при этом экономится время проведения испытаний и ресурсы. Для танталовых объемно-пористых конденсаторов время проведения испытаний сокращается ориентировочно на 2,5 года.

Библиографические ссылки

1. Горбачев И. П., Саинов А. А. Метод выявления внутренних дефектов танталовых конденсаторов для снижения количества отказов аппаратуры // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6, № 1. С. 94–101. DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.94.101.
2. Горбачев В., Кочемасов В., Хорев С. Оксидные конденсаторы // Компоненты и технологии. 2020. № 6 (227). С. 34–39.
3. Кузнецов П. Л., Ломаев Г. В., Кузнецова В. А. Исследование влияния характеристик технологического процесса изготовления на изменения эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2014. № 1. С. 11–15.
4. Кузнецова В. А., Муравьев В. В. Ускоренные испытания сохраняемости танталовых конденсаторов с использованием теплового метода // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 1. С. 82–88. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-82-88.
5. Беляева Е. А., Муравьев В. В. Управление качеством танталовых конденсаторов на основе анализа дефектов, возникающих на этапах технологического процесса и обнаруживаемых при эксплуатации // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 1. С. 74–81. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-74-81.
6. Получение пористых танталовых анодов для электролитических конденсаторов при помощи послойного поточечного электроимпульсного спекания / И. А. Елькин, К. С. Столбов, В. А. Волков, О. Б. Барышев, А. Н. Бельтюков, О. Ю. Гончаров, С. В. Рыбин, А. В. Степанов, А. А. Чулкина // Химическая физика и мезоскопия. 2020. Т. 22. № 4. С. 421–433. DOI 10.15350/17270529.2020.4.40.
7. Беляева Е. А., Муравьев В. В. Влияние пористости и режимов оксидирования анода на качество танталовых конденсаторов с жидким электролитом // Контроль. Диагностика. 2016. № 3. С. 62–70. DOI: 10.14489/td.2016.03.pp.062-070.
8. Барсуков В. К., Сибгатуллин Б. И. Контроль качества танталовых чип-конденсаторов с помощью испытаний импульсным током // Контроль. Диагностика. 2018. № 3. С. 58–63.
9. Предотвращение отказов танталовых чип-конденсаторов на этапе производства / С. В. Горелов, Е. С. Игнатенко, К. Н. Морев, В. И. Никулин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2016. № 3-4. С. 135–138.
10. Абдурахмонов С. У. Испытание различных бумажно-масляных конденсаторов // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 2 (106). С. 8.
11. Федулаев Д. Е., Балакирев Е. Н. Контроль качества производства электролитических конденсаторов // News of Science and Education. 2018. Т. 10, № 2. С. 072–074.
12. Freeman Y. Tantalum and niobium based capacitors. Science, Technology and application. / Freeman Y. // Springer International Publishing AG2018. 2018. ISBN 978-3-319-67869-6, ISBN 978-3-319-67887-2 (e-book), DOI 10.1007/978-3-319-67870-2.
13. Рентюк В. Алюминиевые электролитические конденсаторы, или еще раз про надежность // Силовая электроника. 2018. Т. 3, № 72. С. 4–11.
14. Ежов В. Проблемы и перспективы развития отечественной пассивной электронной компонентной базы // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2019. № 3. С. 44–49.
15. Кузнецов П. Л., Муравьев В. В. Контроль качества электролитических танталовых конденсаторов с использованием СТРЕСС-ТЕСТА // Приборы и методы измерений. 2015. № 1 С. 76–80.

References

1. Gorbachev I.P., Sashov A.A. [Method for detecting internal defects of tantalum capacitors to reduce the number of equipment failures]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*. 2019. Vol. 6, no. 1. Pp. 94-101 (in Russ.). DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.94.101.
2. Gorbachev V., Kochemasov V., Horev S. [Oxide capacitors]. *Komponenty i tekhnologii*. 2020. No. 6 (227). Pp. 34-39 (in Russ.).
3. Kuznetsov P.L., Lomaev G.V., Kuznetsova V.A. [Investigation of the influence of the characteristics of the technological process of manufacturing on the changes in the operational characteristics of tantalum volumetric porous capacitors over time]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. No. 1. Pp. 11-15 (in Russ.).
4. Kuznetsova V.A., Murav'ev V.V. [Accelerated Thermal Testing of Tantalum Capacitors]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. Vol. 21, no. 1. Pp. 82–88 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-82-88.
5. Belyaeva E.A., Murav'ev V.V. [Quality management of tantalum capacitors based on the analysis of defects arising at the stages of the technological process and detected during operation]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. Vol. 21, no. 1. Pp. 74–81 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-74-81.

6. El'kin I.A., Stolbov K.S., Volkov V.A., Baryshev O.B., Bel'tyukov A.N., Goncharov O.YU., Rybin S.V., Stepanov A.V., Chulkina A.A. [Obtaining porous tantalum anodes for electrolytic capacitors using layer-by-layer pointwise electric pulse sintering]. *Himicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2020. Vol. 22, no. 4. Pp. 421-433 (in Russ.). DOI 10.15350/17270529.2020.4.40.
7. Belyaeva E.A., Murav'ev V.V. [Influence of porosity and anode oxidation modes on the quality of tantalum capacitors with liquid electrolyte]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2016. No. 3. Pp. 62-70. (in Russ.). DOI: 10.14489/td.2016.03.pp.062-070.
8. Barsukov V.K., Sibgatullin B.I. [Quality Control of Tantalum Chip Capacitors by Impulse Current Testing]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2018. No. 3. Pp. 58-63 (in Russ.).
9. Gorelov S.V., Ignatenko E.S., Morev K.N., Nikulin V.I. [Preventing Failure of Tantalum Chip Capacitors During Manufacturing]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2016. No. 3-4. Pp. 135-138 (in Russ.).
10. Abdurakhmonov S.U. [Testing various oil-paper capacitors]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*. 2020. No. 2. P. 8 (in Russ.).
11. Fedulaev D.E., Balakirev E.N. [Quality control of production of electrolytic capacitors]. *News of Science and Education*. 2018. Vol. 10, no. 2. Pp. 072-074 (in Russ.).
12. Freeman Y. Tantalum and niobium based capacitors. Science, Technology and application. In Springer International Publishing AG2018. 2018. ISBN 978-3-319-67869-6, ISBN 978-3-319-678870-2 (e-book), DOI 10.1007/978-3-319-67870-2.
13. Rentyuk V. [Aluminum electrolytic capacitors, or again about reliability]. *Silovaya elektronika*. 2018. Vol. 3, no. 72. Pp. 4-11 (in Russ.).
14. Ezhov V. [Problems and prospects for the development of the domestic passive electronic component base]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes*. 2019. No. 3. Pp. 44-49 (in Russ.).
15. Kuznetsov P.L., Murav'ev V.V. [Quality control of electrolytic tantalum capacitors using STRESS-TEST]. *Pribory i metody izmerenii*. 2015. No. 1. Pp. 76-80 (in Russ.).

Investigation of Tantalum Capacitors Using the Accelerated Quality Assessment Technique STRESS TEST

P. L. Kuznetsov, Chief of metrologist department, JSC Elecond, Sarapul, Russia

V. A. Kuznetsova, PhD in Engineering, Associate Professor, Sarapul Polytechnic Institute (branch) of Kalashnikov ISTU, Sarapul, Russia

V. V. Muravyev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper discusses the possibility of conducting accelerated tests to assess the quality of tantalum bulk-porous capacitors according to the developed STRESS TEST technique instead of outdated methods that require costly resources for testing and do not provide proper rejection of capacitors (detection of defects in the oxide layer).

It is known that the grown amorphous pentoxide is able to form a uniform layer on the surface of tantalum, but due to various factors (due to surface roughness, porosity, uneven distribution of the electrolyte during the oxidation process and the electric contact of the carrier-anode), a surface is created with "problem areas", "incomplete formation", or, in other words, a "weak spot", the rejection of which is most important for modern tantalum capacitors. A comparative analysis of the application of the standard method and the STRESS TEST technique for accelerated evaluation of the quality of tantalum bulk-porous capacitors will prove the effectiveness of the developed technique.

The developed STRESS TEST technique is based on cyclic (10 cycles) application of an increased voltage to the capacitor (corresponding to the voltage during the formation of an oxide layer on a tantalum anode) for the duration of each cycle for 5 minutes, which is proved by calculating this process based on the Zhurkov reliability acceleration model. The technique makes it possible to identify low-quality capacitors in advance with defects in the structure of the oxide layer. The technique makes it possible to evaluate the quality of capacitors in an accelerated time, which is confirmed by the obtained regression model of equivalent series resistance in comparison with the regression model of the standard type of tests for long-term reliability for 24,000 hours. The application of the STRESS TEST technique for tantalum volumetrically porous capacitors will reduce the testing time by approximately two and a half years.

Keywords: Tantalum capacitors, testing technique, equivalent series resistance, oxide layer, defect.

Получено: 30.11.2021