

УДК 620.169.2: 658.562.012.7
DOI 10.22213/2413-1172-2018-1-82-88

В. А. Кузнецова, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

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

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СОХРАЯЕМОСТИ ТАНТАЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛООВОГО МЕТОДА *

Введение

К танталовым оксидно-полупроводниковым и объемно-пористым конденсаторам предъявляются требования по сохранению своей функции в течение длительного времени (до 30 лет). Поэтому одной из наиболее важных характеристик надежности конденсаторов является срок сохраняемости, на который влияет качество материалов. При отладке технологии производства проводятся испытания продукции на надежность работы в определенных условиях [1–5].

Срок сохраняемости конденсаторов (T_{cy}) – это способность конденсатора с вероятностью γ сохранять свои свойства в установленных пределах в определенных условиях хранения и транспортирования без воздействий электрического, механического и иного факторов. Известно, что сохраняемость конденсаторов проверяется методом длительного хранения (в отапливаемом хранилище и под навесом) или путем ускоренной оценки (например, применением расчетного метода по временной зависимости) [6].

Однако данные методы занимают длительное время, поэтому разрабатывают ускоренные методы оценки качества конденсаторов, в том числе с применением теплового воздействия без приложения к конденсаторам электрического напряжения [7], суть которого заключается в том, что ускоренные испытания на сохраняемость в условиях отапливаемого хранилища имитируются годовыми циклами с применением теплового старения. Конденсаторы, помещенные в камеру тепла с установленной температурой, максимально допустимой для конденсаторов $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ (398 K), выдерживаются в течение времени, равного году старения в отапливаемом хранилище (рис. 1).

В данной работе рассмотрены результаты применения метода ускоренной оценки сохраняемости с тепловым воздействием, позволившие оценить в короткие сроки качество изготавливаемых танталовых оксидно-полупроводниковых и танталовых объемно-пористых конденсаторов.

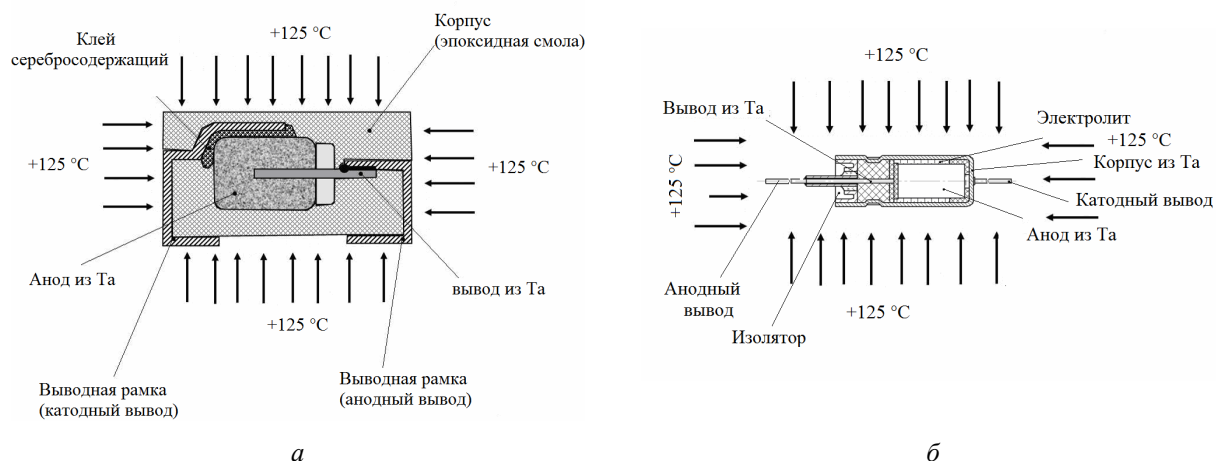


Рис. 1. Воздействие повышенной температуры на элементы конденсатора при тепловом старении: а – оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы; б – объемно-пористые танталовые конденсаторы

Методика эксперимента. Исходные требования

Методика ускоренных испытаний танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов чип-конструкции на сохраняемость основана на имитации хранения конденсаторов в условиях отапливаемого хранилища [8]. При проведении ускоренных испытаний путем теплового воздействия на конденсатор без приложения к нему электрического напряжения происходит старение оксидного слоя на танталовом аноде конденсатора (рис. 2).

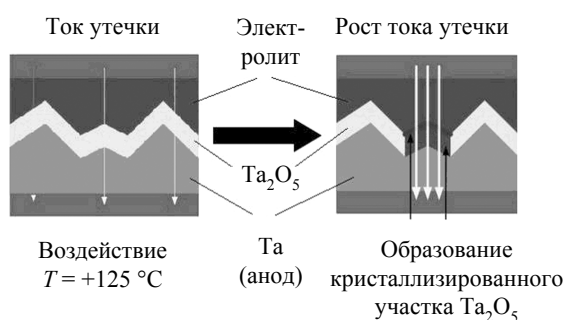


Рис. 2. Процесс старения оксидного слоя Ta₂O₅ при воздействии повышенной температуры и образование кристаллизованного участка Ta₂O₅

В результате старения танталовых конденсаторов происходит изменение их электрических параметров. При воздействии тепла происходит кристаллизация отдельных участков поверхности диэлектрика – пентаоксида тантала Ta₂O₅. Кристаллический Ta₂O₅ является проводником, что, в свою очередь, приводит к резкому возрастанию токов утечки, вследствие чего возможен пробой конденсатора. При хранении конденсаторов в нормальных климатических условиях данный процесс происходит медленнее, своевременное выявление применения некачественных материалов (например, танталовых порошков) затруднительно. При повышении температуры хранения процесс старения ускоряется, что позволяет оценивать качество в короткие сроки.

Длительность ускоренных испытаний τ_n конденсаторов, соответствующая одному году хранения в условиях отапливаемого хранилища, рассчитывается по формуле

$$\tau_n = \sum_{j=1}^k \tau_{nj} = \sum_{j=1}^k \exp \left[B \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_{xj}} \right) \right] \tau_{xj},$$

где k – количество интервалов положительных температур; τ_{xj} – длительность нахождения в j -м интервале положительных температур; τ_{nj} – длительность ускоренных испытаний на сохра-

няемость, имитирующих хранение конденсаторов в j -м интервале положительных температур; B – энергетический параметр конденсаторов, характеризующий зависимость скорости старения конденсаторов от температуры, определяется из анализа процессов, возникающих в элементах конденсаторов при хранении и определяющих их работоспособность; T_n – температура ускоренных испытаний на сохраняемость, К; T_{xj} – среднее значение положительной температуры в условиях отапливаемого хранилища в j -м интервале положительных температур, К.

В табл. 1 приведены основные физико-химические процессы, возникающие в элементах конденсаторов при хранении, а также их энергии активации.

Таблица 1. Основные физико-химические процессы при хранении конденсаторов и энергии активации

Процессы, возникающие в элементах конденсаторов при хранении	Энергия активации процесса, эВ
Тепловой пробой	$E_1 = 0,8$
Старение оксидной пленки и переходных покрытий	$E_2 = 0,3$

Принимая вероятности P_i отказов конденсаторов в результате развития каждого из физико-химического процессов равными, получаем по условиям нормировки

$$\sum_{i=1}^2 P_i = 1 \text{ при } P_1 = P_2 = 1/2.$$

Тогда для конденсаторов общая энергия активации

$$E = (1/2)(E_1 + E_2) = 0,5 \text{ эВ}.$$

Энергетический параметр B рассчитывается из выражения

$$B = E / \kappa = 5797 \text{ К},$$

где $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-21}$ Дж / К, $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

В табл. 2 приведены данные расчета длительности ускоренных испытаний конденсаторов на сохраняемость, имитирующих 1 год хранения конденсаторов в условиях отапливаемого хранилища. Расчет выполнен с учетом существующих значений температур в течение одного года в условиях отапливаемого хранилища в умеренно-холодном климатическом районе и длительности их существования при энергетическом параметре для конденсаторов $B = 5797$ К и заданной температуре ускоренных испытаний $T_n = 398$ К.

Таблица 2. Расчет длительности ускоренных испытаний конденсаторов

Существующие интервалы температур в условиях отапливаемого хранилища в течение года, К	Средняя температура в интервале температур T_j , К	Длительность τ_{uj} существования температур T_j в условиях отапливаемого хранилища в течение года, ч	Длительность ускоренных испытаний на сохраняемость при $T_{и} = 398$ К, имитирующих хранение конденсаторов при температуре T_j в течение одного года, ч
273...278	275,5	927	1,43
278...283	280,5	2901	6,50
283...288	285,5	2729	8,78
288...293	290,5	1498	6,83
293...298	295,5	674	4,31
298...303	300,5	37	0,33
–	–	–	$\sum_1^k \tau_{uj} = 28,18$ ч

Материалы и условия испытаний

Для оценки сохраняемости в течение 30 лет хранения взяты 3 выборки танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов в количестве 45 штук каждая выборка следующих номиналов:

- выборка 1 – номинал 6,3 В×68 мкФ;
- выборка 2 – номинал 20 В×33 мкФ;
- выборка 3 – номинал 50 В×6,8 мкФ;

Для альтернативной оценки использован другой тип танталовых конденсаторов – танталовые объемно-пористые конденсаторы в количестве 45 штук в каждой из 2 выборок:

- выборка 4 – номинал 125 В×22 мкФ;
- выборка 5 – номинал 100 В×220 мкФ.

Режимы испытаний конденсаторов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Режим и длительность проведения испытаний образцов конденсаторов

Имитация хранения, лет	Режим испытаний, $T_{и}$, °С (К)	Длительность испытаний, имитирующих 1 год хранения, ч	Количество циклов испытаний	Общая длительность испытаний (ускоренное хранение), ч
5	125 (398)	28,18	5	141
15	125 (398)	28,18	15	423
20	125 (398)	28,18	20	564
25	125 (398)	28,18	25	705
30	125 (398)	28,18	30	845

Конденсаторы, помещенные в камеру тепла, расположены таким образом, чтобы была обеспечена свободная циркуляция воздуха между ними, а также между конденсаторами и стенками камеры. В камере поддерживалась температура, соответствующая испытательному режиму, с обеспечением равномерности распределения по всему объему. Отклонение температуры при испытании не превышало ± 2 °С от значений, указанных в нормативной документации для климатических испытаний конденсаторов.

После испытаний, соответствующих годовым циклам (5, 15, 20, 25 и 30), конденсаторы выдерживали в нормальных климатических условиях в течение не менее 5 ч, после чего проводили измерение параметров – критериев годности: емкости, тангенса угла потерь, тока утечки, эквивалентного последовательного сопротивления (C , $\text{tg } \delta$, $I_{ут}$, $R_{эКВ}$).

Результаты и их обсуждение

Значения электрических параметров после имитации хранения танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов номиналом 6,3 В×68 мкФ (выборка 1) приведены на рис. 3.

Значения контролируемых параметров в выборке 1 по результатам ускоренного хранения с тепловым воздействием находятся в пределах нормы, однако в процессе хранения некоторые параметры претерпевают изменения к окончанию срока хранения, имитирующего срок более 25 лет.

На рис. 4 приведены значения электрических параметров танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов номиналом 20 В×33 мкФ (выборка 2) после имитации хранения. Отмечено, что токи утечки начали расти после имитации 15 лет ускоренного хранения с тепловым воздействием, хотя и находятся в пределах нормы.

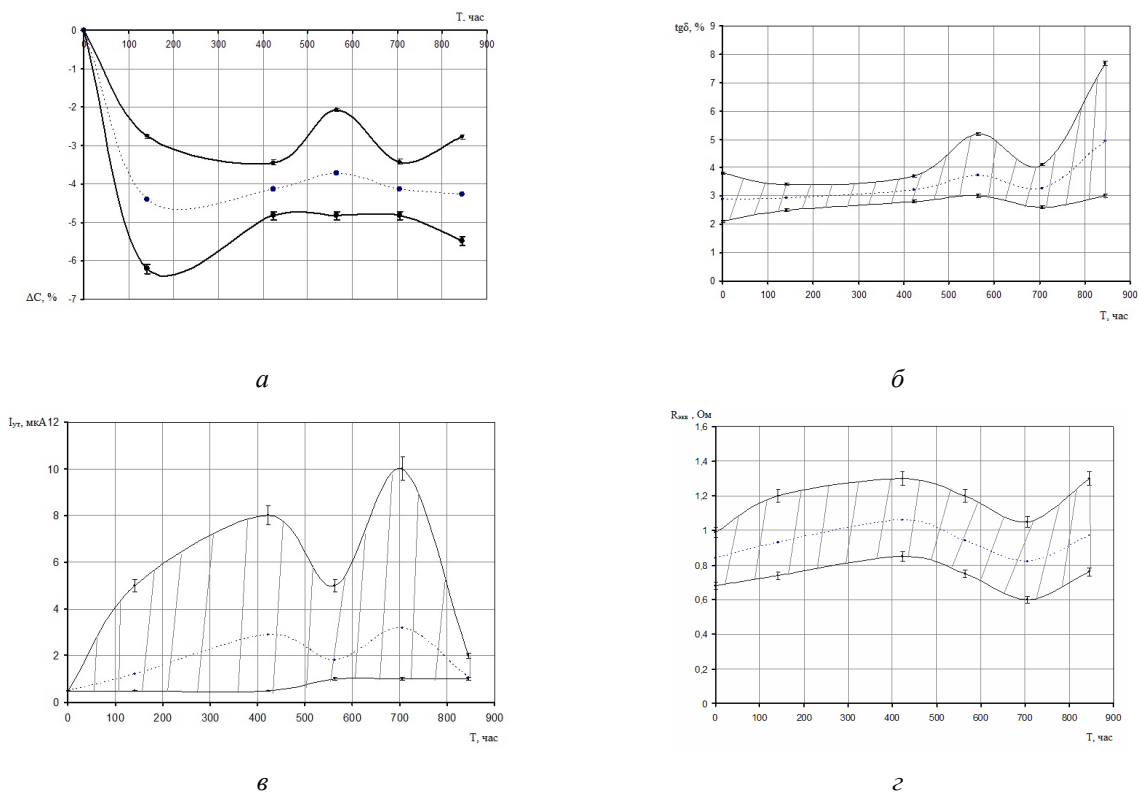


Рис. 3. Изменение параметров танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов номиналом 6,3 В×68 мкФ (выборка 1) в ходе проведения испытаний: *a* – изменение емкости, *б* – тангенс угла потерь, *в* – тока утечки, *г* – эквивалентного последовательного сопротивления

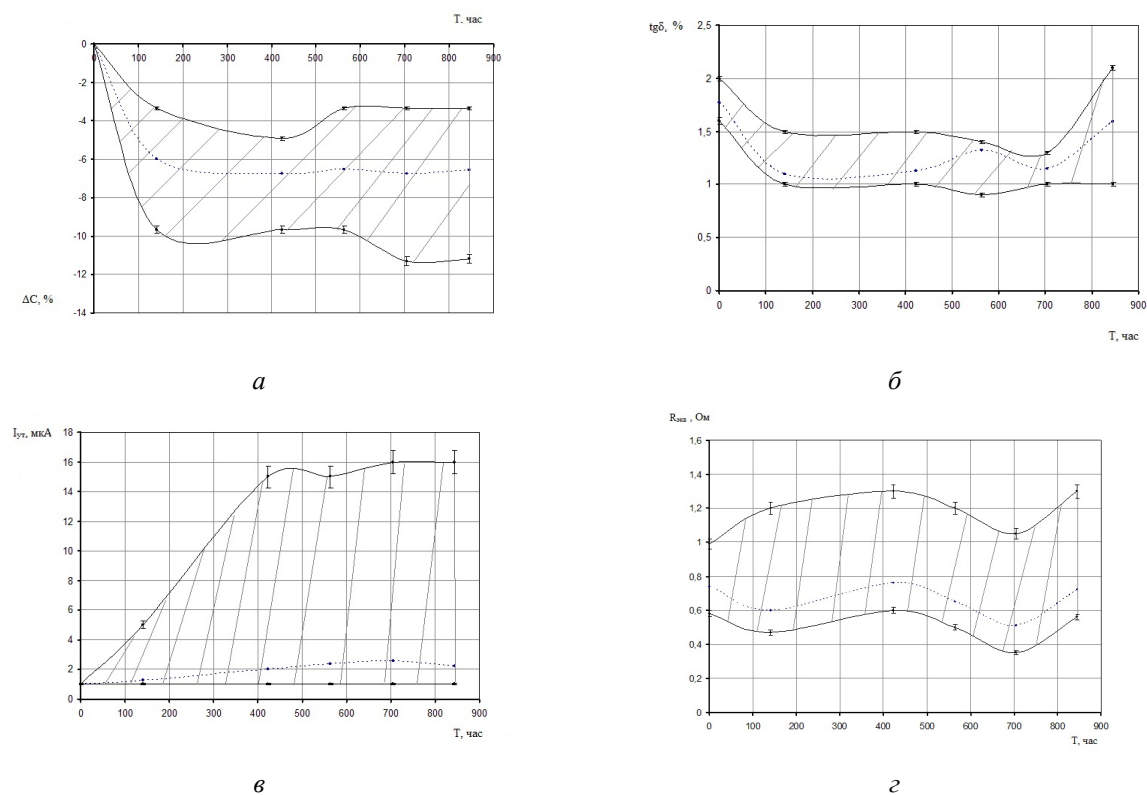


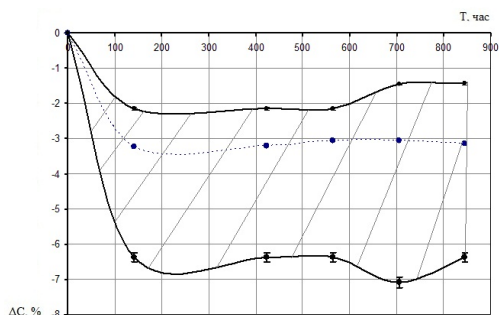
Рис. 4. Изменение параметров танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов номиналом 20 В×33 мкФ (выборка 2) в ходе проведения испытаний: *a* – изменение емкости, *б* – тангенс угла потерь, *в* – тока утечки, *г* – эквивалентного последовательного сопротивления

На рис. 5 приведены значения электрических параметров танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов номиналом 50 В×6,8 мкФ (выборка 3) после имитации хранения. Значения контролируемых параметров в выборке 3 также находятся в пределах нормы.

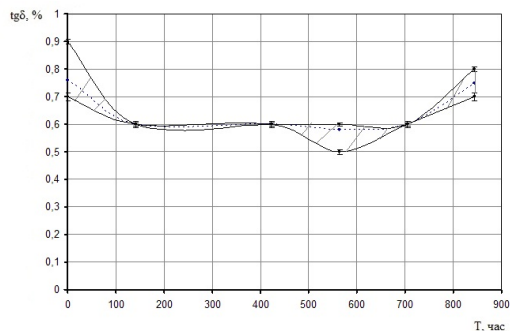
На рис. 6 приведены значения электрических параметров танталовых объемно-пористых конденсаторов номиналом 125 В×22 мкФ (выборка 4) после имитации хранения. Видно, что в выборке 4 существенные изменения контро-

лируемых параметров (например, ток утечки) наблюдаются после 25 лет, но при этом находятся в пределах нормы.

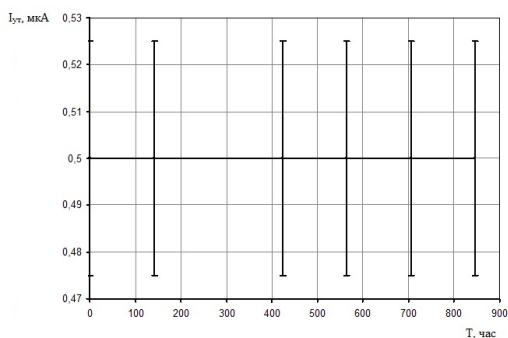
На рис. 7 приведены значения электрических параметров танталовых объемно-пористых конденсаторов номиналом 100 В×220 мкФ (выборка 5) после имитации хранения. Обнаружено, что в этой выборке наибольшие изменения претерпел параметр тока утечки, при этом все параметры находятся в пределах нормы.



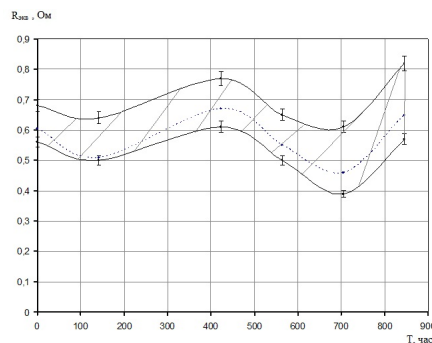
а



б

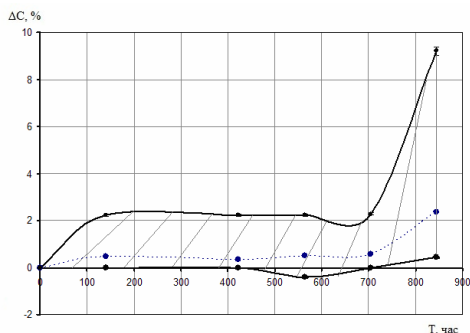


в

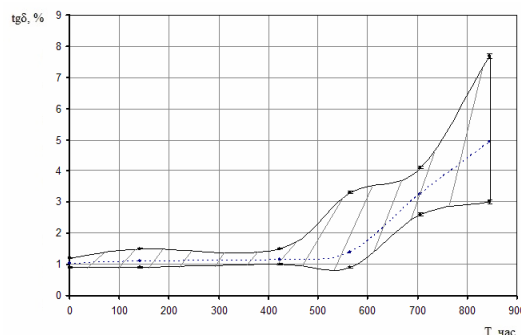


г

Рис. 5. Изменение параметров танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов номиналом 50 В×6,8 мкФ (выборка 3) в ходе проведения испытаний: а – изменение емкости, б – тангенса угла потерь, в – тока утечки, г – эквивалентного последовательного сопротивления



а



б

Рис. 6. Изменение параметров танталовых объемно-пористых конденсаторов номиналом 125 В×22 мкФ (выборка 4) в ходе проведения испытаний: а – изменение емкости, б – тангенса угла потерь

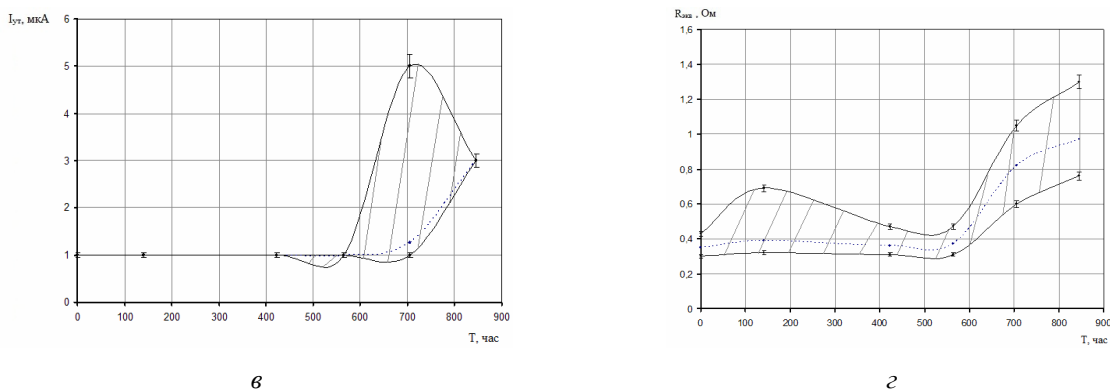


Рис. 6 (продолжение): в – тока утечки, г – эквивалентного последовательного сопротивления

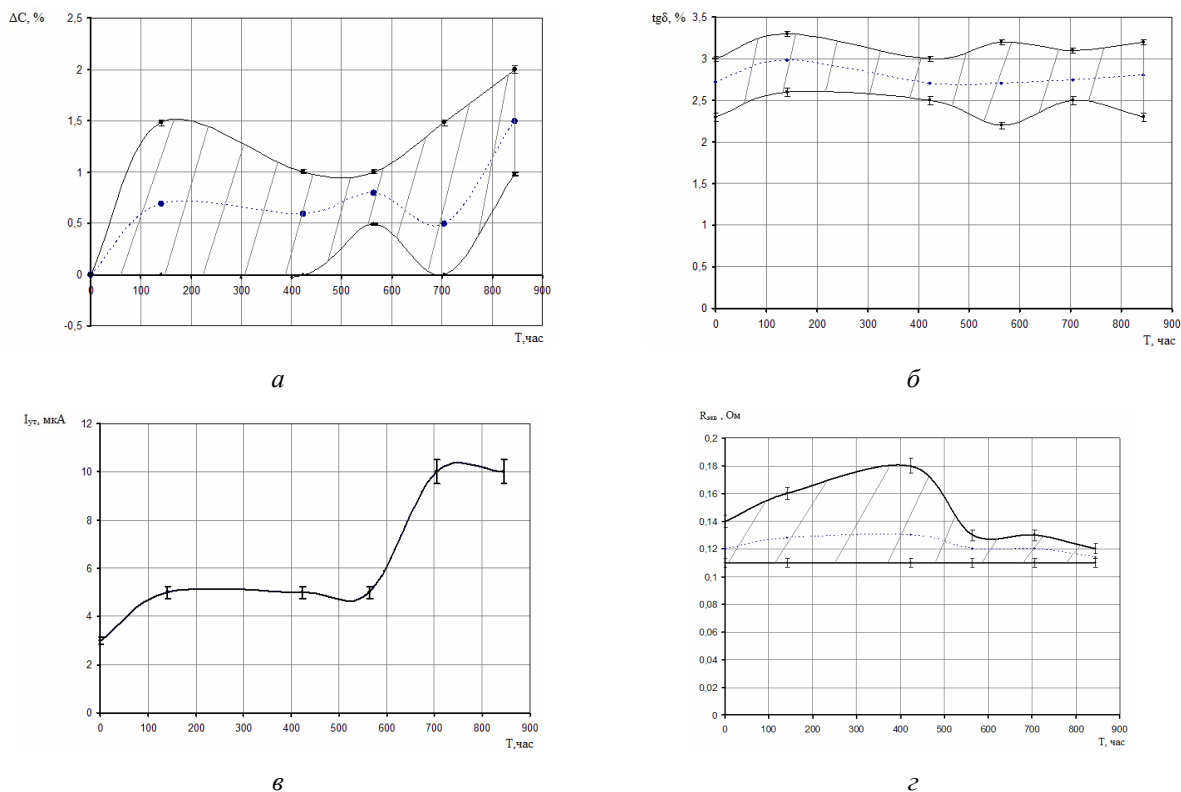


Рис. 7. Изменение параметров танталовых объемно-пористых конденсаторов номиналом 100 В×22 мкФ (выборка 4) в ходе проведения испытаний: а – изменение емкости, б – тангенса угла потерь, в – тока утечки, г – эквивалентного последовательного сопротивления

Из анализа рис. 3–7 получаем, что отклонение от монотонной зависимости для всех выборок на уровне 550 и 700 ч связаны с критическими моментами воздействия тепла на конденсаторы (тепловое старение оксидной пленки). Данный момент носит показательный характер: конденсаторы с лучшими параметрами являются наиболее качественными (с достаточной толщиной оксидной пленки).

Применение методики ускоренной оценки сохраняемости конденсаторов позволяет выявлять некачественные конденсаторы на ранней стадии (стадии производства, а не на стадии эксплуатации).

Выводы

Значения контролируемых параметров во всех выборках по результатам ускоренного хранения с тепловым воздействием находятся в пределах нормы, однако в процессе хранения некоторые параметры претерпевают изменения к окончанию срока хранения, имитирующему срок более 25 лет.

Отклонение от монотонной зависимости для всех выборок на уровне 550 и 700 ч связаны с критическими моментами воздействия тепла на конденсаторы (тепловое старение оксидной пленки). Это носит показательный характер: конденсаторы с лучшими параметрами являются

ся наиболее качественными (с достаточной толщиной оксидной пленки).

Применение методики ускоренной оценки сохраняемости позволяет выявить некачественные конденсаторы на ранней стадии (стадии производства, а не на стадии эксплуатации).

Библиографические ссылки

1. Кузнецова В. А., Кузнецов П. Л., Муравьев В. В. Исследование надежности танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов на основе экспериментальных данных // Вестник ИжГТУ. 2013. № 3(59). С. 88–91.

2. Кузнецов П. Л., Кузнецова В. А., Ломаев Г. В. Исследование влияния характеристик технологического процесса изготовления на изменения эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени // Вестник ИжГТУ. 2014. № 1(61). С. 11–15.

3. Сибгатуллин Б. И., Барсуков В. К. Расчет и моделирование переходных процессов при испытаниях танталовых конденсаторов импульсным током // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1(25). С. 115–120.

4. Барсуков В. К., Сибгатуллин Б. И. Стенд для испытаний танталовых конденсаторов импульсным током // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 3(27). С. 63–66.

5. Электроимпульсная консолидация танталовых анодов для электролитических конденсаторов / М. С. Юрлова, Е. Г. Григорьев, Е. А. Олевский, В. Д. Деменюк // Физика и химия обработки материалов. 2014. № 5. С. 82–90.

6. Кузнецова В. А., Муравьев В. В. Прогнозирование сохраняемости танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов по временной зависимо-

сти // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. № 4(72). С. 69–72.

7. Кузнецов П. Л., Муравьев В. В. Контроль качества электролитических танталовых конденсаторов с использованием стресс-теста // Приборы и методы измерений. 2015. № 1(10). С. 76–80.

8. Кузнецова В. А., Муравьев В. В. Метод ускоренных испытаний сохраняемости танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов // Контроль. Диагностика. 2016. № 7. С. 57–60.

References

1. Kuznecova V. A., Kuznecov P. L., Murav'ev V. V. (2013). *Vestnik IzhGTU* [Bulletin ISTU], no. 3(59), pp. 88-91 (in Russ.).

2. Kuznecov P. L., Kuznecova V. A., Lomaev G. V. (2014). *Vestnik IzhGTU* [Bulletin ISTU], no. 1, pp. 11-15 (in Russ.).

3. Sibgatullin B. I., Barsukov V. K. (2015). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 1, pp. 115-120 (in Russ.).

4. Barsukov V. K., Sibgatullin B. I. (2015). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 3(27), pp. 63-66 (in Russ.).

5. Jurlova M. S., Grigor'ev E. G., Olevskij E. A., Demenjuk V. D. (2014). *Fizika i himija obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Material Processing], no. 5, pp. 82-90 (in Russ.).

6. Kuznecova V. A., Murav'ev V. V. (2016). *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], no. 4 (72), pp. 69-72 (in Russ.).

7. Kuznecov P. L., Murav'ev V. V. (2015). *Pribory i metody izmerenij* [Devices and measurement methods], no. 1(10), pp. 76-80 (in Russ.).

8. Kuznecova V. A., Murav'ev V. V. (2016). *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], no. 7, pp. 57-60 (in Russ.).