

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 620.17:658.56

Е. А. Беляева, аспирант;

В. А. Кузнецова, аспирант;

В. В. Муравьев, доктор технических наук, профессор

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СРОКА СОХРАНЯЕМОСТИ  
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
И СОСТОЯНИЕ ОБЪЕМНО-ПОРИСТЫХ ТАНТАЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ \*

*Проведены экспериментальные исследования влияния срока сохраняемости на эксплуатационные характеристики герметичных объемно-пористых танталовых конденсаторов постоянной емкости в различных условиях хранения.*

**Ключевые слова:** надежность, сохраняемость, танталовый объемно-пористый конденсатор, эксплуатационные характеристики

**Введение**

Надежность конденсаторов определяется такими показателями технической диагностики, как безотказность, долговечность и сохраняемость [1]. Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение срока службы или наработки при воздействии на него рабочих напряжения и температуры [2]. Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима [3]. Вопросы технического диагностирования процессов деструктуризации и накопления повреждений в материалах рассмотрены в [4–6]. Исследованиям надежности танталовых конденсаторов по параметрам долговечности и безотказности, как сохранению работоспособности конденсатора в течение срока службы при воздействии на него рабочих напряжения и температуры, посвящены работы [7–8].

Однако не менее важным критерием качества является показатель сохраняемости – свойство объекта сохранять значения показателей безотказности и долговечности после хранения и транспортирования, т. е. способность конденсатора сохранять свои свойства в установленных пределах в определенных условиях хранения без электрического, механического и иного воздействия в течение определенного периода времени (срока сохраняемости). На сохраняемость влияет процесс старения, сущность которого заключается в проявлении и развитии различного рода дефектов в конструкционных материалах, в возникновении и развитии физико-химических процессов, приводящих к ухудшению диэлектрических свойств и снижению электрической прочности.

Величину срока сохраняемости танталовых объемно-пористых конденсаторов определяет множество факторов, в том числе качество применяемых материалов [7–8], качество исполнения технологиче-

ской дисциплины, производственный процесс изготовления конденсаторов, выбранные режимы изготовления комплектующих изделий, режимы сборки, критерии отбраковки на стадии производства и т. п. Наиболее критичными эксплуатационными характеристиками танталового объемно-пористого конденсатора в процессе хранения являются изменение емкости относительно первоначальных значений и значение тока утечки.

Для моделирования процессов, происходящих внутри танталовых объемно-пористых конденсаторов в течение срока сохраняемости, проведен длительный эксперимент с последующей обработкой результатов наблюдений.

**Методика эксперимента**

Наиболее важными задачами при изготовлении конденсаторов являются: 1) недопущение падения емкости конденсаторов  $\delta C$  в течение срока сохраняемости относительно первоначального значения более чем на  $\Delta C_{кр}$ , так как данный дефект может оказать сильное влияние на характеристики аппаратуры, в которой установлен конденсатор; 2) недопущение повышения тока утечки  $I_{ут}$  выше предельного значения  $I_{кр}$ , что может привести к короткому замыканию аппаратуры потребителя.

Изменение емкости вычисляется по формуле:

$$\delta C = \frac{C_2 - C_1}{C_1}, \%, \quad (1)$$

где  $C_1$  – первоначальное значение емкости;  $C_2$  – значение емкости во время или после испытаний.

Объектом исследования являются две партии танталовых объемно-пористых постоянной емкости конденсаторов, находящихся на длительном хранении в разных условиях и предназначенных для испытаний на сохраняемость:

– партия № 1 – конденсаторы номинала 16 В – 47 мкФ, объем выборки – 50 шт., условие хранения – отапливаемое хранилище при допустимой температуре окружающей среды от +5 °С до +40 °С в соответствии с требованиями ГОСТ 15150;

– партия № 2 – конденсаторы номинала 16 В – 22 мкФ, объем выборки – 50 шт., условие хранения – под навесом при допустимой температуре окружающей среды от –50 °С до +50 °С в соответствии с требованиями ГОСТ 15150.

В соответствии с техническими условиями на конденсаторы срок сохраняемости данного типа конденсаторов при их хранении в отапливаемом хранилище должен быть не менее 20 лет, под навесом – не менее 17 лет. При хранении в отапливаемом хранилище и под навесом соблюдены условия хранения конденсаторов по ГОСТ 15150, ГОСТ В 9.003 [9–10]. Отбор (выбор номиналов) конденсаторов на испытания производился случайным образом из действующего производства.

Хранение конденсаторов под навесом на стеллажах осуществлялось в упаковке изготовителя. Их испытания произведены на специально оборудованной площадке с ограждением (сеткой, жалюзи), настилом и навесом, защищенным от непосредственного воздействия на упаковку атмосферных осадков и солнечного излучения.

Испытания конденсаторов на сохраняемость проведены на типовых представителях от группы изделий в процессе длительного хранения с периодическим контролем параметров по ГОСТ В 20.57.404–81 в испытательной лаборатории ОАО «Электрон» (Сарапул). Важным критерием качества изделий является повторяемость результатов измерений с целью обеспечения надежности всех конденсаторов одного типоминимала. Критериями качества конденсаторов (отсутствие отказов) при испытании на сохраняемость являются соответствие эксплуатационных характеристик конденсаторов в процессе и после испытаний нормам технических условий, а также качество уплотнения.

До испытания, в процессе и после испытания произведены визуальный контроль конденсаторов, измерение электрических параметров конденсаторов (эксплуатационных характеристик). Проверка электрических параметров осуществлялась один раз в год в течение всего срока хранения (в отапливаемом хранилище – 20 лет, под навесом – 17 лет). После испытаний произведена проверка уплотнения.

Измерение емкости  $C$  проводилось по методике 501-1 в соответствии с ГОСТ 28885 на установке РМЭ-8 с погрешностью измерения емкости 1 %. Измерение тока утечки  $I_{УТ}$  конденсаторов проводилось по методике 504-1 в соответствии с ГОСТ 28885 на установке РМЭ-8 с погрешностью измерения 1 %. Проверку уплотнения осуществляли методом 606-5 по ГОСТ 28885 [11].

Для данных номиналов конденсаторов нормы электрических параметров (тока утечки  $I_{УТ}$ , изменение емкости  $\delta C$ ) при первоначальных измерениях и с течением срока сохраняемости согласно техническим условиям приведены в табл. 1.

Таблица 1. Нормы электрических параметров конденсаторов

| Параметр, единица измерения | Номинал                      | Норма                         |                                       |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
|                             |                              | при первоначальных измерениях | с течением срока сохраняемости        |
| $C$ , мкФ                   | 16 В – 47 мкФ                | 47 мкФ $\pm$ 30 %             | –                                     |
|                             | 16 В – 22 мкФ                | 22 мкФ $\pm$ 30 %             | –                                     |
| $\delta C$ , %              | 16 В – 47 мкФ, 16 В – 22 мкФ | –                             | $\Delta C_{КР}$ не более $\pm 20$ мкФ |
| $I_{УТ}$ , мкА              | 16 В – 47 мкФ                | не более 2,5 мкА              | $I_{КР}$ не более 25 мкА              |
|                             | 16 В – 22 мкФ                | не более 1,7 мкА              | $I_{КР}$ не более 17 мкА              |

### Результаты и их обсуждение

Результаты первоначальных измерений параметров тока утечки  $I_{УТ}$  и изменение емкости  $\delta C$  конденсаторов обеих выборок приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения первоначальных электрических параметров конденсаторов

| Параметр                     | Значение для номинала 16 В – 47 мкФ |         |              |
|------------------------------|-------------------------------------|---------|--------------|
|                              | Минимальное                         | Среднее | Максимальное |
| Экспериментальная партия № 1 |                                     |         |              |
| $C$ , мкФ                    | 41                                  | 43,3    | 45           |
| $I_{УТ}$ , мкА               | 0,1                                 | 0,28    | 0,5          |
| Экспериментальная партия № 2 |                                     |         |              |
| $C$ , мкФ                    | 19,4                                | 19,84   | 21,5         |
| $I_{УТ}$ , мкА               | 0,1                                 | 0,27    | 0,3          |

Результаты измерений электрических параметров конденсаторов от времени сохраняемости (в годах) приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Значения электрических параметров конденсаторов экспериментальной партии № 1 в течение срока сохраняемости (20 лет)

| Параметр | Значение | Год  |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|----------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          |          | 0    | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| $C$      | min      | 0    | –2,33  | –2,3  | –2,44 | –2,79 | –3,48 | –3,49 | –3,49 | –3,48 | –3,49 |
|          | ср       | 0    | –0,016 | –0,32 | –0,76 | –0,44 | –0,41 | –0,45 | –0,6  | –0,21 | 0,76  |
|          | max      | 0    | 1,9    | 1,19  | 1,19  | 1,19  | 2,32  | 1,19  | 1,19  | 1,19  | 1,19  |
| $I_{УТ}$ | min      | 0,1  | 0,2    | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 1     | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
|          | ср       | 0,28 | 0,78   | 0,6   | 0,55  | 0,63  | 0,6   | 1     | 0,5   | 0,5   | 0,82  |
|          | max      | 0,5  | 1      | 1,5   | 1     | 1     | 1     | 1     | 0,5   | 0,5   | 1     |

| Параметр        | Значение \ Год | Год   |       |      |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|----------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                | 10    | 11    | 12   | 13    | 14    | 15    | 16    | 18    | 19    | 20    |
| C               | min            | -4,65 | -3,49 | -3,5 | -4,54 | -2,32 | -2,32 | -1,16 | -2,33 | -4,65 | -2,33 |
|                 | cp             | -0,75 | -0,71 | -0,8 | 0,025 | 0,77  | 0,46  | 1,23  | 1,03  | -0,37 | 0,66  |
|                 | max            | 1,19  | 1,19  | 1,2  | 4,76  | 2,38  | 2,38  | 3,49  | 4,88  | 2,32  | 2,38  |
| I <sub>ут</sub> | min            | 0,5   | 0,5   | 0,5  | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 1     | 0,5   | 1     | 0,5   |
|                 | cp             | 0,5   | 0,53  | 0,5  | 0,5   | 0,78  | 0,5   | 1,13  | 0,5   | 1     | 0,5   |
|                 | max            | 0,5   | 1     | 0,5  | 0,5   | 1     | 0,5   | 2     | 0,5   | 1     | 0,5   |

Таблица 4. Значения электрических параметров конденсаторов экспериментальной партии № 2 в течение срока сохраняемости (17 лет)

| Параметр        | Значение \ Год | Год  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                | 0    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| C               | min            | 0    | -1,02 | -2,38 | -2,43 | -1,54 | -2,38 | -2,86 | -2,56 | -2,56 | -2,5  |
|                 | cp             | 0    | 0,29  | -0,41 | -0,23 | -0,28 | -0,47 | -0,53 | -0,23 | -0,44 | -0,56 |
|                 | max            | 0    | 1,99  | 1,48  | 2,32  | 0,49  | 0     | 0,51  | 1     | 0,98  | 0,5   |
| I <sub>ут</sub> | min            | 0,1  | 0,1   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
|                 | cp             | 0,27 | 0,32  | 0,5   | 0,68  | 0,76  | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
|                 | max            | 0,3  | 0,5   | 0,5   | 2     | 1     | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |

| Параметр        | Значение \ Год | Год   |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    |
| C               | min            | -2,56 | -2,56 | -4,76 | -4,47 | -2,56 | -2,56 | -5,6  | -5,12 |
|                 | cp             | -0,56 | -0,23 | -0,47 | 0,22  | 0,31  | 0,59  | -2,24 | -2,32 |
|                 | max            | 0,5   | 2,5   | 5     | 3,01  | 3,01  | 5     | 0     | 0     |
| I <sub>ут</sub> | min            | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 1     | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
|                 | cp             | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 1     | 0,53  | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
|                 | max            | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 1     | 1     | 0,5   | 0,5   | 0,5   |

При испытании партий № 1 и 2 отказов конденсаторов не выявлено.

Обработка результатов проведенного эксперимента на сохраняемость конденсаторов экспериментальных партий № 1 и 2 представлена в виде отдельных графиков изменения параметров емкости  $\delta C$  и тока утечки  $I_{ут}$  на рис. 1 и 2.

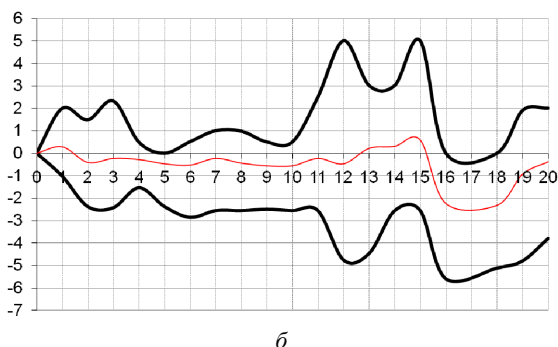
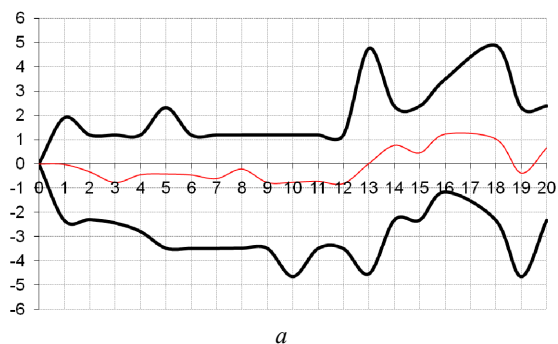


Рис. 1. Минимаксный разброс изменения емкости конденсаторов партий № 1 (а) и № 2 (б) от времени хранения

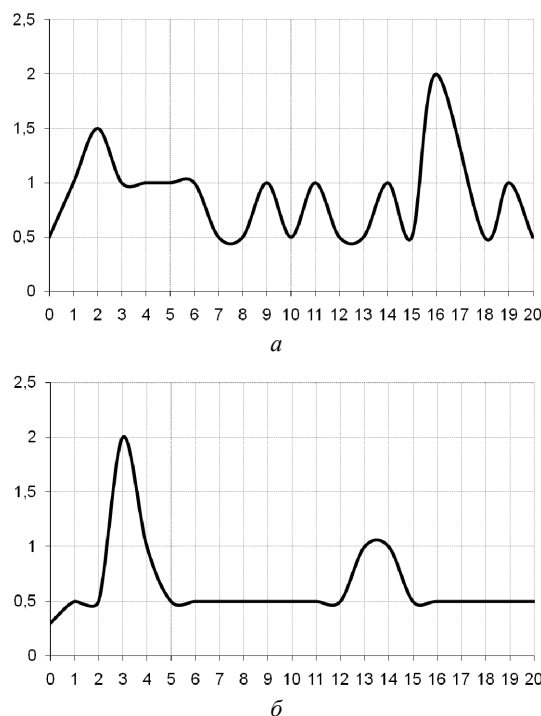


Рис. 2. Зависимость изменения тока утечки конденсаторов партий № 1 (а) и № 2 (б) от времени хранения

Проанализировав построенные гистограммы распределения параметров в процессе хранения, можно сделать следующее заключение.

По гистограммам, приведенным на рис. 1 и 2, можно сделать заключение о некоторой степени систематичности поведения конденсаторов в течение срока сохраняемости независимо от вида хранения (под навесом или в отапливаемом хранилище).

Динамика изменения среднего значения емкости конденсаторов (рис. 1) в течение срока хранения в отапливаемом хранилище и под навесом идентичная. До 12-го года хранения в обоих случаях хранения наблюдалось постепенное снижение емкости, экстремум значений наблюдался в двух точках: на 12-м, 13-м годах и 16–18-м годах. Данные пики могут свидетельствовать о начале изменения структуры материалов вследствие старения. Одной из причин изменения емкости может служить частичное высыхание электролита.

На зависимости, приведенной на рис. 2, наблюдается нормализация тока утечки и приближение его к номинальному значению после 3-го года хранения в отапливаемом хранилище и после 5-го года хранения под навесом, что связано со стабилизацией электрохимических процессов, происходящих внутри конденсатора. Экстремумы тока утечки на 2-м годе хранения в отапливаемом хранилище, на 3-м годе хранения под навесом свидетельствуют о возможном появлении вероятностного отказа одного из конденсаторов. Ток утечки конденсаторов, хранившихся под навесом, стабилизировался после 5-го года хранения и колеблется в пределах погрешности измерения. Ток утечки конденсаторов, хранившихся в отапливаемом помещении, после 3-го года стабилизировался и на 16-м годе хранения имел пик роста, который так же, как снижение емкости, вероятно, свидетельствует о начале процесса старения используемых материалов.

### Выводы

Независимо от места хранения, под навесом или в отапливаемом хранилище, изменение критических параметров конденсаторов (тока утечки и емкости) имеет систематический характер, что связано с формированием физико-химической структуры конденсатора при подаче на него переменного синусоидального напряжения при измерении электрических параметров. Снижение емкости и повышение тока утечки конденсаторов в процессе хранения свидетельствуют о постепенном старении материалов, которое неизбежно в конечном итоге приведет к отказу.

### Библиографические ссылки

1. *Alvsten, B.* Electrolytic capacitors : theory and application. – Gränna : RIFA Electrolytics, [1995]. – 68 p.
2. Ультразвуковой контроль накопления усталостных повреждений и восстановление ресурса деталей: научное

издание / Л. Б. Зуев, В. Я. Целлермаер, В. Е. Громов, В. В. Муравьев ; Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск) // Журнал технической физики / Рос. акад. наук, Отделение физических наук, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе. – 1997. – Т. 67, № 9. – С. 123–125.

3. Акустический контроль долговечности стальных образцов и восстановление их ресурса / Л. Б. Зуев [и др.] ; Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск) // Прикладная механика и техническая физика / Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние. – 1998. – Т. 39, № 4. – С. 180–183.

4. *Степанова Л. Н., Муравьев В. В., Круглов В. М. и др.* Способ диагностирования мостовых металлических конструкций и устройство для его осуществления : патент РФ № 2240551 С2 RU. Дата регистрации: 20.06.2001. Оpubл. Бюл. № 32, 27.06.2003. Москва, ФИПС. – 20 с.: ил.

5. *Степанова Л. Н., Ивлиев В. В., Муравьев В. В. и др.* Акустико-эмиссионный способ диагностирования колесных пар железнодорожного подвижного состава и устройство для его осуществления : патент RU № 2296320 С1 РФ. Дата регистрации: 07.09.2005. Бюл. № 9, 27.03.2007. Москва, ФИПС. – 16 с.

6. Способ диагностирования рельсовых плетей металлического моста и устройство для его осуществления / Муравьев М. В., Муравьев В. В., Степанова Л. Н., Муравьев Т. В. : патент RU № 2284519 С1 РФ. Дата регистрации: 14.02.2005. Оpubл. Бюл. № 27, 27.09.2006. Москва, ФИПС. – 14 с.

7. *Кузнецова В. А., Кузнецов П. Л., Муравьев В. В.* Исследование надежности танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов на основе экспериментальных данных // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 88–91.

8. Исследование влияния на эксплуатационные характеристики качества материалов танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов / В. А. Кузнецова [и др.] // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2013. – № 2. – С. 140–143.

9. ГОСТ 15150–69. Межгосударственный стандарт. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 29.12.1969 № 1394) (ред. от 27.11.2012). – URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294852/4294852592.htm> (дата обращения: 29.04.2014).

10. ГОСТ В 9.003–80. Единая система защиты от коррозии и старения. Общие требования к условиям хранения. Изд. офиц. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1980.

11. ГОСТ 28885–90. Конденсаторы. Методы измерений и испытаний. Изд. офиц. – М. : Изд-во стандартов, 1999.

\* \* \*

*E. A. Belyaeva*, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University; Engineer, Open Joint-Stock Company “Elecond”

*V. A. Kuznetsova*, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University; Engineer, Open Joint-Stock Company “Elecond”

*V. V. Muravyov*, DSc in Engineering, Professor, Head of department of Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Investigation of shelf life influence on performance characteristics and state of tantalum wet capacitors

*By means of experimental methods investigation of influence of storability on the state of hermetic tantalum wet capacitors with constant capacity was lead.*

**Keywords:** storability, reliability, shelf life, tantalum wet capacitor, leakage current, capacity change

Получено: 16.04.14