

УДК 620.17:658.56

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-105-113

Статистический операционный контроль танталовых электролитических конденсаторов с использованием многофакторной модели

Е. А. Беляева, АО «Элеконд», Сарапул, Россия

С использованием метода статистического дискретного наблюдения получены результаты анализа качества приварки катодного вывода танталовых конденсаторов с жидким электролитом. Базисными информативными показателями установлены баллы качества, рассчитанные по разработанной методике системного межэтапного анализа качества конденсаторов (см. работы в журнале «Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» за 2018 г.).

Проведены верификационные экспериментальные исследования для танталовых конденсаторов с твердым электролитом по разработанному методу системного контроля технологического процесса танталовых электролитических конденсаторов с построением многофакторной модели. В результате исследований установлено наличие отклонения твердоэлектролитических конденсаторов по параметрическому несоответствию тока утечки. Для проведения многофакторного эксперимента выбран процесс изготовления объемно-пористого танталового анодного электрода. Построена регрессионная математическая модель процесса изготовления танталового анода в зависимости от факторов прессования, спекания и электрохимического окислирования. В сформированной математической модели обнаружено наиболее сильное параметрическое влияние на характеристику «ток утечки» плотности прессования и напряжения окислирования, а также совокупного фактора плотности прессования и температуры спекания; имеется также незначительное влияние температуры и совокупности факторов температуры и напряжения окислирования.

Разработанный метод системного контроля технологического процесса танталовых электролитических конденсаторов с использованием многофакторной модели позволяет минимизировать отказы танталовых конденсаторов на входном контроле и в аппаратуре заказчика.

Ключевые слова: конденсатор, операционный контроль, многофакторный эксперимент, качество, отказ.

У Введение
потребителей танталовых электролитических конденсаторов в радиоэлектронной аппаратуре существует проблема их внезапного отказа [1]. Как правило, данные отказы обусловлены повышенными требованиями к электрической нагрузке, не предусмотренными в действующей российской нормативной документации, или вариабельностью импедансных характеристик конденсаторов, несовместимой с требованиями к аппаратуре. Также имеют место вероятностные случайные и износные отказы.

Для предотвращения внезапного выхода из строя танталовых конденсаторов не только производителями конденсаторов уделяется особое внимание разработке и усовершенствованию методологии производства и контроля на этапах изготовления [2–10], но и производителями радиоэлектронной аппаратуры, исследователями – на этапе входного контроля [11–13]. Аспект рискориентированного мышления является очевидным [14–16].

Для возможности управления технологическим процессом танталовых конденсаторов разработан метод системного контроля технологического процесса танталовых электролитических конденсаторов с построением многофакторной модели. Данным методом достигнута практическая интеграция итеративного подхода (с использованием элементов метода анализа видов и последствий потенциальных дефектов FMEA и методологии Деминга – Шухарта – цикла PDCA) [17–19] и многофакторного эксперимента с построением математической регрессионной модели технологического процесса в цикл производства танталовых электролитических конденсаторов. Разработанный метод позволяет инкрементировать производственный процесс изготовления конденсаторов.

По результатам первичной апробации разработанного метода в 2018 г. выявлено, что одним из отклонений танталовых конденсаторов, который следует проанализировать по методике, является «обрыв вывода объемно-пористого танталового конденсатора с жидким

электролитом». В результате проведения многофакторного эксперимента на операции приварки вывода к корпусу конденсатора в рамках разработанного метода построена регрессионная математическая модель технологического процесса импульсной стыковой сварки катодного вывода танталового конденсатора. С помощью модели выявлено сильное влияние на показатели сварки: энергетического параметра – напряжения заряда конденсаторов в корреляции с токовой характеристикой сварки, и механического – величины давления на свариваемые поверхности. По выявленным закономерностям на предприятии-изготовителе проведены предупредительные мероприятия, направленные на контроль энергетического параметра приварки вывода.

Постановка задачи. Исходные требования

Статистический системный анализ показателей качества стыковой сварки катодного вывода с корпусом танталового конденсатора

Объектом статистического системного анализа является совокупность параметров, формирующих показатель «суммарный балл качества B_{Σ} » на технологической операции стыковой сварки катодного проволочного вывода с корпусом танталового объемно-пористого конденсатора с жидким электролитом. **Цель статистического наблюдения** – оценить эффективность разработанного метода. Задачей анализа является построение корреляционной зависимости информативных параметров выбранного процесса в базисном периоде для танталового конденсатора с жидким электролитом типа K52.

Информативными параметрами статистического анализа назначены баллы, рассчитываемые по разработанной методике:

- C_k – максимальный индекс качества по результатам анализа претензионных конденсаторов;
- $B_{к-т.з}$ – балл конструктивно-технологического запаса;
- $B_{ст.п}$ – балл стабильности технологического процесса;
- B_{Σ} – суммарный балл качества.

В качестве базисного периода Δt установлены дискретные временные интервалы (отчетные периоды): 2017, 2018, 2019, 2020 гг.

Экспериментальные верификационные исследования танталовых конденсаторов с твердым электролитом по разработанной методике

Объектом экспериментальных исследований являются танталовые конденсаторы оксидно-

полупроводниковые типа K53. **Цель экспериментального исследования** – оценить возможность применения разработанного метода для танталовых электролитических конденсаторов с твердым электролитом. В качестве базисного периода Δt установлен 2020 г.

Применяемые методы

В качестве метода для статистического системного анализа показателей качества на операции стыковой сварки катодного проволочного вывода с корпусом жидкостного танталового конденсатора выбран метод статистического дискретного наблюдения. Контроль информативных показателей танталовых конденсаторов осуществлялся по разработанной методике системного контроля технологического процесса танталовых электролитических конденсаторов.

В методике уточнены условия точности технологического процесса танталовых конденсаторов: если пооперационный процент выхода годных ниже планового, процессу присваиваются баллы значимости K_5 от 1 до 10 (по критериям табл. 1).

Для построения регрессионной модели технологического процесса изготовления танталовых конденсаторов с твердым электролитом применен факторный эксперимент. Подробная методика многофакторного эксперимента представлена в работах автора (см. журнал «Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» за 2018 г.).

Результаты исследований

Статистический системный анализ показателей качества стыковой сварки катодного вывода с корпусом танталового конденсатора

Проведено статистическое дискретное наблюдение за показателями качества технологического процесса импульсной стыковой сварки отрицательного проволочного вывода к корпусу танталового конденсатора с жидким электролитом типа K52 во временном интервале Δt 2017–2020 гг. с дискретностью один календарный год.

Рассчитанные по методике баллы качества выполнения технологического процесса приварки катодного проволочного вывода к корпусу конденсатора по совокупности параметров C_k , $B_{к-т.з}$, $B_{ст.п}$, формирующих показатель B_{Σ} , представлены в таблице 2 и визуализированы на рисунке.

В результате статистического наблюдения выявлено снижение суммарного показателя качества B_{Σ} при стыковой сварке катодного вывода с корпусом танталового конденсатора с жидким электролитом, что свидетельствует о дейст-

венности предпринятых мер и, соответственно, подтверждает правильность установления факторов в построенной модели импульсной сварки и эффективность разработанного метода с построением многофакторной модели.

По результатам статистического анализа уточнены требования о необходимости принятия мер в таблице «Оценка необходимости корректирующих мер в зависимости от общей оценки качества» методики (табл. 3).

Таблица 1. Критерии точности технологического процесса танталовых конденсаторов

Table 1. Accuracy criterions for tantalum capacitors technological process

Критерии точности технологического процесса	$K_{в.г.пл} - \left(\frac{100\% - K_{в.г.пл}}{10} \right) (n_i - 1) \leq K_{в.г.i}(t) \leq K_{в.г.пл} - \left(\frac{100\% - K_{в.г.пл}}{10} \right) n_i,$ <p>где $K_{в.г.}(t)$ – выход годных на операции за период Δt; $K_{в.г.пл}$ – плановый выход годных на операции, %; n_i – соответствует численному значению баллу K_5.</p>									
	Вероятность возникновения дефекта	Сверх-высокая	Очень высокая	Высокая	Средняя высокая	Умеренная	Средняя умеренная	Низко умеренная	Низкая	Очень низкая
Балл значимости K_5	10*	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<p><i>Примечания</i></p> <p>1. Для балла значимости $K_5 = 10$ критерий точности устанавливается в пределах рассчитанного значения и ниже.</p> <p>2. Для балла значимости $K_5 = 1$ критерий точности устанавливается в пределах рассчитанного значения и выше.</p>										

Таблица 2. Баллы качества технологического процесса приварки отрицательного проволочного вывода танталовых конденсаторов с жидким электролитом

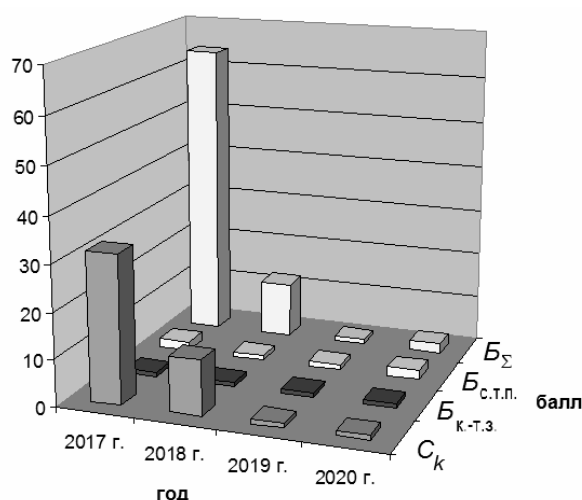
Table 2. Quality indexes for negative terminal welding process of tantalum wet capacitors

Балл	Базисный период			
	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
C_k	32	12	1	1
$B_{к-т.з}$	1	1	1	1
$B_{с.т.п}$	2	1	1	2
B_{Σ}	64	12	1	2

Примечания

1. В базисном периоде 2017 г. количество претензионных конденсаторов с дефектом «обрыв катодного вывода» – 2 шт.

2. В базисном периоде 2018–2020 гг. конденсаторы с дефектом «обрыв катодного вывода», признанным по вине изготовителя, отсутствуют. В 2018 г. имеется отклонение «обрыв катодного вывода» по вине потребителя у 1 шт. по причине некорректного монтажа



Корреляционная временная зависимость баллов качества процесса сварки катодного проволочного вывода с корпусом танталового конденсатора

The correlation time dependence of quality indexes for negative terminal welding process of tantalum capacitors

Таблица 3. Оценка необходимости принятия мер в зависимости от общей оценки качества

Table 3. Assessment of needs to action depending on total quality index

Общая оценка качества B_{Σ}	Вероятность возникновения дефекта	Необходимость мер	Пояснения по мерам
500 000...1 000 000	Сверхвысокая	Сверхвысокая	Требуются безотлагательные корректирующие меры
250 000...500 000	Очень высокая	Очень высокая	Требуются незамедлительные корректирующие меры
100 000...250 000	Высокая	Высокая	Требуются корректирующие меры
50 000... 100 000	Средняя высокая	Средняя высокая	Требуются корректирующие меры
15 000...50 000	Умеренная	Умеренная	Рекомендуется проведение корректирующих мер
4 000...15 000	Средняя умеренная	Средняя умеренная	Рекомендуется проведение корректирующих мер
1000...4000	Низко умеренная	Низкая	Требуются предупреждающие меры
500...1000	Низкая	Очень низкая	Требуются предупреждающие меры
50 ... 500	Очень низкая	Очень низкая	Рекомендуются предупреждающие меры
1...50	Малая	Сверхнизкая	Предупреждающие меры возможны

Экспериментальные верификационные исследования танталовых конденсаторов с твердым электролитом по разработанной методике

По результатам оценки танталовых конденсаторов по разработанной методике за базисный период Δt – 2020 г. одним из значимых дефектов исходя из рассчитанных коэффициентов B_{Σ} является дефект «ток утечки выше нормы» (или большой ток утечки, далее по тексту – БТУ) танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов с твердым электролитом типа К53.

В качестве объекта исследования взяты танталовые конденсаторы корпусного исполнения. Результаты статистического системного анализа претензионных корпусных конденсаторов К53 следующие: $K_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ (соответствует баллу 2); $K_2 = 7,9 \cdot 10^{-5}$ (соответствует баллу 3); $K_3 = K_4 = 0$ (соответствует баллу 1). Соответственно, максимальный индекс качества

$$C_k = 2 \cdot 3 = 6.$$

Системный контроль исследуемых конденсаторов по методике выявил, что наиболее частой причиной появления дефекта «БТУ» корпусного твердотельного танталового конденсатора на эксплуатационном этапе является образование токопроводящего нитевидного проводника на внутренней или внешней поверхности изолятора, вызванное фазовым переходом припоя из твердого в жидкое состояние и последующей его кристаллизации в процессе монтажа. Данный процесс является следствием недопустимого теплового воздействия на область паяного соединения изолятора конденсатора из-за превышения длительности и (или) температуры

пайки, отсутствия теплоотводящего элемента на паяльнике, близкое расстояние области монтажа до конструктивной области пайки изолятора с выводом и корпусом конденсатора. Также причиной токовой утечки танталового конденсатора может быть локальный перегрев анода конденсатора вследствие превышения допустимого постоянного, импульсного или переменного напряжения. Следовательно, при рассмотрении претензий по конденсаторам К53 корпусного исполнения прежде всего необходима проработка эксплуатационных и производственных режимов потребителей.

В связи с тем, что гипотетически с некоторой долей вероятности отказ танталового оксидно-полупроводникового конденсатора может быть случайным и обусловлен производственным аспектом, при этом токовая утечка танталовых конденсаторов может быть связана с пробоем диэлектрика, рассмотрим статистический анализ показателей качества технологического процесса изготовления конденсатора.

Анализ проведен в базисном периоде Δt – 2020 г. на наиболее значимых ключевых технологических операциях: «измерение электрических параметров анода», «измерение тока утечки секций», «измерение тока утечки конденсаторов» по информативному параметру «ток утечки».

На выбранных операциях в базисном периоде Δt операционный процент выхода годных находился выше планового, что соответствует баллу значимости 1. Произведена оценка уровня технологической дисциплины при производстве, балл значимости равен 2. Соответственно, $B_{с.т.п} = 1 \cdot 2 = 2$.

Суммарный балл качества технологического процесса составляет

$$B_{\Sigma} = C_k \cdot B_{к-т.з} \cdot B_{ст.п} = 6 \cdot 3 \cdot 2 = 36.$$

Рассмотрим планирование многофакторного эксперимента. В качестве наиболее значимых операций, влияющих на величину токовой утечки в гипотетической модели, аналогично анодному электроду конденсатора с жидким электролитом (вследствие идентичности протекания процессов) выбраны технологические стадии изготовления объемно-пористого танталового анода: прессование высокопористого тела, его спекание и электрохимическое оксидирование анода.

Согласно стратегии проведения многофакторного эксперимента проведены исследования влияния трех технологических факторов изготовления танталового объемно-пористого анода на показатель тока утечки анода высоковольтно-

го корпусного конденсатора. В качестве параметра оптимизации (выходного параметра) взят показатель «ток утечки анода», измеряемый на операции «измерение электропараметров анода» (после проведения оксидирования); в качестве воздействующих факторов выбраны: z_1 – плотность прессования, г/см³; z_2 – температура спекания, °С; z_3 – напряжение оксидирования, В.

В таблице 4 представлены характеристики выбранных технологических факторов.

Система координат z_1, z_2, z_3 преобразуется в безразмерную систему x_1, x_2, x_3 линейным преобразованием ($i = 1, 2, 3$)

$$x_i = \frac{z_i - z_i^0}{\Delta z_i}.$$

Проведены три серии экспериментов ($k = 3$), результаты экспериментов сведены в матрицу (табл. 5).

Таблица 4. Характеристики факторов, воздействующих на процесс изготовления объемно-пористого анода
Table 4. Characteristics of factors exerting influence upon porous anode technological process

Фактор	Наименование технологического фактора	Уровень факторов			Интервал варьирования
		-	0	+	
z_1	Плотность прессования, г/см ³	7,0	7,5	8,0	0,5
z_2	Температура спекания, °С	1950	1960	1970	10
z_3	Напряжение оксидирования, В	138	140	142	2

Таблица 5. Матрица трехфакторного эксперимента для операций изготовления объемно-пористого анода
Table 5. Matrix three-factorial experiment for porous anode technological process

№ опыта	Технологические факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат				Параметр оптимизации «ток утечки» (для 3 серий опытов)			Расчетные характеристики			
	z_1	z_2	z_3	x_0	x_1	x_2	x_3	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	\bar{y}_i^*	s_i^2	\hat{y}_i	$ \Delta y_i $
1	7	1950	138	1	-1	-1	-1	1,8	2,3	2,3	2,050	0,093750	1,719	0,33125
2	8	1950	138	1	1	-1	-1	2,1	2,2	2,2	2,150	0,003750	2,231	-0,0812
3	7	1970	138	1	-1	1	-1	1,2	1,5	1,5	1,350	0,033750	1,556	-0,2063
4	8	1970	138	1	1	1	-1	2,2	2,1	2,2	2,150	0,003750	2,069	0,08125
5	7	1950	142	1	-1	-1	1	0,7	0,8	0,8	0,750	0,003750	0,706	0,04375
6	8	1950	142	1	1	-1	1	1,1	1	1	1,050	0,003750	1,219	-0,1688
7	7	1970	142	1	-1	1	1	0,5	0,5	0,6	0,500	0,005000	0,544	-0,0437
8	8	1970	142	1	1	1	1	1,5	1,2	1,8	1,350	0,123750	1,056	0,29375

Проведены расчеты для многофакторной модели технологического процесса. Для определения величины воздействия каждого технологического фактора (z_1, z_2, z_3) на величину параметра y «ток утечки» методом наименьших квадратов, скалярным произведением столбца y_i на соответствующий столбец x_j определены значения коэффициентов уравнения b_j , отнесенным к числу опытов $N = 2^3$ (см. табл. 5). На основании вычисленных для каждого опыта дисперсий воспроизводимости s_i для параметра y «ток

утечки» определена дисперсия воспроизводимости (ошибки) для серии параллельных экспериментов:

$$s_{восп}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2 = \frac{0,27125}{8} = 0,0339063.$$

Произведена проверка однородности дисперсий воспроизводимости параллельных опытов посредством сравнения с табличным критическим значением критерия Кохрена (при уровне значимости 5 %):

$$G = \frac{s_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2} = \frac{0,12375}{0,27125} = 0,4562 < G_{\text{кр}} \Big|_{f_1=2, f_2=8} = 0,5157.$$

Доверительный интервал коэффициентов модели (при уровне значимости 5 %, числе степеней свободы 7, значении параметра Стьюдента $t = 1,895$):

$$\Delta b_j = \pm \frac{ts(y)^2}{\sqrt{N}} \pm \frac{1,895 \cdot 0,0339063}{\sqrt{8}} = \pm 0,022717.$$

Коэффициенты уравнения регрессии и результаты проверки значимости коэффициентов представлены в таблице 6.

Таблица 6. Коэффициенты уравнения регрессии технологического процесса изготовления объемно-пористого анода и результаты проверки значимости для уравнения

Table 6. Regression equation coefficients for porous anode technological process and significance testing results

Коэффициент уравнения регрессии		Коэффициент значимости регрессии		Значение параметра Стьюдента [6]	Проверка значимости коэффициента
обозначение	значение	обозначение	значение		
b_0	1,3875	t_0	36,915	1,895	Значимый
b_1	0,25625	t_1	6,81757		Значимый
b_2	-0,08125	t_2	-2,1617		Значимый
b_3	-0,50625	t_3	-13,469		Значимый
b_{12}	0,15625	t_{12}	4,157055		Значимый
b_{13}	0,03125	t_{13}	0,83141		Незначимый
b_{23}	0,0875	t_{23}	2,328		Значимый
b_{123}	-0,01875	t_{123}	-0,49885		Незначимый

Уравнение регрессии технологического процесса изготовления объемно-пористого анода танталового конденсатора имеет вид

$$y = 1,3875 + 0,25625x_1 - 0,08125x_2 - 0,50625x_3 + 0,15625x_1x_2 + 0,0875x_2x_3.$$

Проведена проверка адекватности регрессионного уравнения исходя из расчетного значения $F_{\text{расч}}$ (при уровне значимости 5 %):

$$F_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{ост}}^2}{s_{\text{восп}}^2} = \frac{0,0568125}{0,0339063} = 1,676 < F_{\text{табл}} \Big|_{k_1=4, k_2=8} = 3,84.$$

Полученная математическая модель технологического процесса адекватно описывает зависимость тока утечки анода конденсатора от значимых факторов стадий изготовления объемно-пористого танталового анодного электрода.

Наиболее оптимальным режимом изготовления анодного электрода танталового конденсатора, изготовленного из конкретной партии танталового порошка, является минимальная плотность прессования, максимальная температура спекания и напряжения оксидирования.

Анализ результатов, выводы

1. В результате статистического дискретного наблюдения за показателями качества приварки катодного проволочного вывода танталовых конденсаторов выявлено снижение суммарного показателя качества B_{Σ} . Отсутствие возвратов

конденсаторов по дефекту «обрыв» за 2019 и 2020 гг. свидетельствует о действенности предпринятых мер, подтверждает правильность установления факторов в построенной модели импульсной сварки и эффективность разработанного метода с построением многофакторной модели.

2. При анализе по методике установлено, что отказ возвращенных твердотельных танталовых конденсаторов корпусного исполнения, как правило, обусловлен недопустимым тепловым воздействием в области пайки изолятора. В качестве предупреждающих мероприятий потребителям рассылаются рекомендации по применению конденсаторов.

3. В построенной модели регрессии технологического процесса изготовления анода обнаружено наиболее сильное параметрическое влияние на характеристику «ток утечки» плотности прессования и напряжения оксидирования, а также совокупного фактора плотности прессования и температуры спекания; имеется также незначительное влияние температуры и совокупности факторов температуры и напряжения оксидирования.

4. В экспериментально выявленной закономерности установлено, что наименьшие величины температуры спекания и напряжения электрохимического оксидирования приводят

к увеличению значений токовой утечки анодного электрода, что, соответственно, теоретически объясняется недостаточным выгоранием примесей из прессованной высокопористой таблетки при высокотемпературном спекании и недостаточной толщиной сформированного оксидного слоя при электрохимическом окислении.

Библиографические ссылки

1. 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.

2. Чернов Д. В., Шавкунов С. П. Влияние электрохимической полировки тантала на диэлектрические параметры анодного оксида // Конденсированные среды и межфазные границы. 2018. Т. 20, № 2. С. 289–295. DOI: 10.17308/kcmf.2018.20/524.

3. Получение пористых танталовых анодов для электролитических конденсаторов при помощи послойного поточечного электроимпульсного спекания / И. А. Елькин, К. С. Столбов, В. С. 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.

4. Иванченко С. Н., Пойлов В. З. Исследование возможности снижения сопротивления покрытия коллоидного графита в конструкции твердотельных танталовых конденсаторов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). С. 6.

5. Иванченко С. Н., Пойлов В. З. Оптимизация процесса реанодизации при производстве танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). С. 6.

6. Кузнецова В. А., Муравьев В. В. Влияние качества корпуса оксидно-полупроводниковых танталовых чип-конденсаторов на эксплуатационные параметры // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 112–115.

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

8. 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.

9. Kolosov V.N., Miroshnichenko M.N., Prokhorova T.Y., Orlov V.M. Preparation of tantalum powders by the reduction of complex oxyfluoride compounds with sodium. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2016, vol. 57, no. 6, pp. 599–603. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-8-70-78.

10. Freeman Y. Tantalum and niobium based capacitors. Science, Technology and application, Springer International Publishing AG, 2018, 120 p. DOI: 10.1007/978-3-319-67870-2, ISBN 978-3-319-67869-6, ISBN 978-3-319-67887-0 (e-book).

11. 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.

12. Анализ влияния внутренних дефектов на надежность танталовых конденсаторов / А. Н. Алыков, И. Ю. Булаев, Т. Ю. Корбанкова, А. Я. Кулибаба // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7, № 2. С. 90–96. DOI: 10.30894/ISSN 2409-0239.2020.7.2.90.96.

13. Шавкунов С. П., Чернов Д. В. Исследование электрических свойств танталовых конденсаторов циклическими поляризационными и импедансными измерениями // Вестник Пермского университета. Серия: Химия. 2020. № 3 (10). С. 318–326. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-318-327.

14. Идентификация и оценка рисков процесса планирования высокопроизводительного производства / Е. А. Скорнякова, В. Ш. Сулаберидзе, А. С. Борейшо, В. С. Лугиня // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 108–114.

15. Скорнякова Е. А., Бабаев С. А. Проблемы принятия оперативных управленческих решений из-за отклонений в процессе производственного планирования высокопроизводительного предприятия // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. № 4. С. 35–39.

16. Сушенцева А. Д., Бекмешов А. Ю. Анализ эффективности функционирования технологических процессов производства // Качество. Инновации. Образование. 2019. № 3 (161). С. 69–74. DOI: 10.31145/1999-513x-2019-69-74.

17. Безъязычный В. Ф., Ильина М. Е. Алгоритмы управления процессами производства машиностроительной продукции на основе цикла PDCA // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2020. № 4. С. 43–51.

18. Антипов Д. В., Буркова В. А. Совершенствование метода FMEA-анализа для оценки рисков // Дневник науки. 2019. № 5. С. 79

19. Квалиграмма как инструмент описания процессов с учетом цикла PDCA и риск-ориентированного мышления / Н. В. Мерзликина, В. С. Секацкий, К. О. Полещук, Л. Д. Дедух, К. О. Осколкова // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 11-4 (65). С. 55–58. DOI: 10.23670/IRJ.2017.65.171.

References

1. Gorelov S.V., Ignatenko E.S., Morev K.N., Nikulin V.I. [Prevention of failure tantalum chip capacitors at the production stage]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2016, no. 3-4, pp. 135-138 (in Russ.).

2. Chernov D.V., Shavkunov S.P. [The influence of surface preparation of tantalum electrodes on the process of electrochemical oxidation in phosphoric acid solu-

tion]. *Condensed Matter and Interphases*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 289-295 (in Russ.). DOI: 10.17308/kcmf.2018.20/524.

3. Elkin I.A., Stolbov K.S., Volkov V.A., Baryshev O.B., Beltukov A.N., Goncharov O.Y., Rybin S.V., Stepanov A.V., Chulkina A.A. [Production of porous tantalum anodes for electrolytic tantalum capacitors using spot pulsed electric current sintering]. *Chemical Physics and Mezcscopy Journal*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 421-431 (in Russ.). DOI: 10.15350/17270529.2020.4.40.

4. Ivanchenko S.N., Pojlov V.Z. [Research of the possibility of reducing resistance of the graphite coating in the solid tantalum capacitor]. *Engineering Journal of Don*, 2017, no. 2, pp. 6 (in Russ.).

5. Ivanchenko S.N., Pojlov V.Z. [Optimization of the reanodization in the production of tantalum oxide-semiconductor capacitors]. *Engineering Journal of Don*, 2018, no. 2, pp. 6 (in Russ.).

6. Kuznetsova V.A., Muraviev V.V. [Influence of tantalum solid chip-capacitors case quality on operating parameters]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2014, no. 2, pp. 112-115 (in Russ.).

7. Kuznetsova V.A., Muraviev V.V. [Method of accelerated tests for persistence of tantalum chip capacitor]. *Testing. Diagnostics*, 2016, no. 7, pp. 57-60 (in Russ.).

8. Kuznetsov P.L., Muraviev V.V. [The quality control of electrolytic tantalum capacitors by using the stress test]. *Devices and Methods of Measurements*, 2015, no. 1, pp. 76-80 (in Russ.).

9. Kolosov V.N., Miroshnichenko M.N., Prokhorova T.Y., Orlov V.M. Preparation of tantalum powders by the reduction of complex oxyfluoride compounds with sodium. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2016, vol. 57, no. 6, pp. 599-603. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-8-70-78.

10. Freeman Y. Tantalum and niobium based capacitors. *Science, Technology and application*, Springer International Publishing AG, 2018, 120 p. DOI: 10.1007/978-3-319-67870-2, ISBN 978-3-319-67869-6, ISBN 978-3-319-678870-2 (e-book).

11. Gorbachev I.P., Sashov A.A. [Method to Detect Internal Defects of Tantalum Capacitors to Decrease Failures of the Equipment]. *Rocket-Space Device Engi-*

neering and Information Systems, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 94-101 (in Russ.). DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.94.101.

12. Alykov A.N., Bulaev I.Ju., Korbankova T.Ju., Kulibaba A.Ja. [Impact Analysis of Internal Defects of Tantalum Capacitors on their Reliability]. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2020, vol. 7, no. 2, pp. 90-96. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.90.96.

13. Shavkunov S.P., Chernov D.V. [The investigation of electrical parameters of tantalum electrolytic capacitors by cyclic polarization curves and impedance measurements]. *Bulletin of Perm University. Chemistry*, 2020, no. 3, pp. 318-326. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-318-327.

14. Skorniakova E.A., Sulaberidze V.Sh., Borejsho A.S., Luginja V.S. [Identification and assessment of high-productivity plant production planning process risks]. *Issues of radio electronics*, 2019, no. 4, pp. 108-114 (in Russ.). DOI: 10.21778/2218-5453-2019-4-108-114.

15. Skorniakova E.A., Babaev S.A. [Problems of making operational management decisions due to deviations in the process of production planning of a high-performance enterprise]. *Engineering and Automation Problems*, 2018, no. 4, pp. 35-39 (in Russ.).

16. Sushenceva A.D., Bekmeshov A.Ju. [Analysis of operation efficiency of technological processes of production]. *Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie*. 2019, no. 3 (161), pp. 69-74 (in Russ.). DOI: 10.31145/1999-513x-2019-69-74.

17. Bez'yazychny V.F., Ilyina M.E. [Machine-building manufacturing processes' control algorithms on the basis of the PDCA cycle]. *Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University*, 2020, no. 4, pp. 43-51 (in Russ.).

18. Antipov D.V., Burkova V.A. [The improving of method FMEA of risk assessment]. *Dnevnik nauki*, 2019, no. 5, pp. 79 (in Russ.).

19. Merzlikina N.V., Sekackij V.S., Poleshhuk K.O., Deduh L.D., Oskolkova K.O. [Qualigram as a description tool of processes accounting the PDCA cycle and risk-oriented thinking]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2017, no. 11-4, pp. 55-58 (in Russ.). DOI: 10.23670/IRJ.2017.65.171.

Statistical Operational Control of Tantalum Electrolytic Capacitors by Using Multifactorial Model

E.A. Belyaeva, JSC "Elecond", Sarapul, Russia

The quality of negative terminal welding of tantalum wet capacitors have been controlled by using statistic discrete observation. Calculated by the developed systematic integrative quality control method (see works in the journal "Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova" for 2018) quality indexes have been considered as basic informative indicators. Verification experimental investigations have been carried out for tantalum solid capacitors according to the method of system statistical control of tantalum electrolytic capacitors processing by using multifactorial model. On the results of the approbation the defect of tantalum solid capacitors "the leakage current increasing" has been displayed. The porous anode operations have been an appropriate choice for a full factorial experiment. The regression mathematical model of anode processing in relation to the factors of pressing, sintering and electrochemical oxidation has been constructed. It is shown that in the constructed model the factors which have the most impact on the leakage current are the pressure density and oxidation voltage, and also the combined factor of pressure density and sintering temperature. There is also a slight influence of temperature and the combined factors of temperature and

oxidation voltage. It can be concluded that the developed method of systematic integrative quality control of tantalum electrolytic capacitor's process by using multifactorial model allows for minimizing the failures.

Keywords: capacitor, operational control, multifactorial model, quality, failure.

Получено 26.04.2021

Образец цитирования

Беляева Е. А. Статистический операционный контроль танталовых электролитических конденсаторов с использованием многофакторной модели // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 2. С. 105–113. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-105-113.

For Citation

Belyaeva E.A. [Statistical Operational Control of Tantalum Electrolytic Capacitors by Using Multifactorial Model]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 105-113 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-105-113.