

УДК 620.17:658.56

DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-147-158

Е. А. Беляева, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

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

КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРИВАРКИ ВЫВОДОВ ТАНТАЛОВЫХ ОБЪЕМНО-ПОРИСТЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

С целью оценки качества крепления монтажных выводов танталовых объемно-пористых конденсаторов и для рассмотрения необходимости и целесообразности проведения своевременных корректирующих и предупреждающих мероприятий проведен комплексный контроль качества приварки выводов танталовых конденсаторов по методике системного межэтапного комплексного анализа качества танталовых конденсаторов на основе анализа претензионных изделий с учетом конструкторско-технологического, производственного и человеческого факторов. По статистическому анализу возвращенных изделий выявлена необходимость рассмотрения качества приварки катодного вывода, и с использованием метода полного факторного эксперимента на операции «приварка катодного вывода к корпусу конденсатора» для двух различных типов конструкций вывода исследовано количественное влияние характеристик технологического процесса с целью выявления режимов, наиболее эффективно воздействующих на качество сварочного соединения. Проведен многофакторный эксперимент, в результате которого построена регрессионная модель качества процесса сварки катодного вывода к корпусу танталового конденсатора и выявлена зависимость от энергетических режимов сварки. Обнаружено сильное влияние на качество выполнения операции токового значения сварки и давления на свариваемые поверхности. Область подачи инертного газа также вносит свой вклад в температурное поле зоны сварки, но в меньшей степени по сравнению с параметрами режима сварки.

На основании результатов апробации можно заключить, что методика системного межэтапного комплексного анализа качества танталовых конденсаторов может быть применима для оценки качества танталовых конденсаторов как на этапе производства – для совершенствования технологических процессов, на этапе доработки конструкции, так и на этапе эксплуатации – для удовлетворения требований потребителей, и может дать экономический эффект от снижения доли возвращаемых конденсаторов, подлежащих замене. Комплексный контроль по совокупности параметров на стадии производства, испытаний и эксплуатации позволяет исключить попадание потребителю некачественной продукции.

Ключевые слова: танталовый конденсатор, приварка, вывод, качество, дефект.

Введение

По результатам статистической оценки показателей эксплуатационного этапа в ОАО «Электонд» была установлена необходимость исследования качества танталовых объемно-пористых конденсаторов по вероятностному дефекту «обрыв вывода» [1]. Для объективного анализа качества приварки монтажных выводов конденсаторов необходимо комплексное исследование дефектов структуры металла или включений неоднородных примесей в металлизированную область сварки, исследование глубины и области внедрения расплавленного металла монтажного вывода вглубь корпуса конденсатора, требующие разрушающий метод контроля, что, в свою очередь, не всегда экономически целесообразно с учетом достаточно высокой стоимости танталовых конденсаторов [2–4]. Данные дефекты, возникшие на стадии производства, могут быть обнаруже-

ны как в процессе испытаний на предприятии-изготовителе, так и в процессе эксплуатации у потребителей, что является потенциальной причиной отказа конечного устройства [5, 6].

Для исключения возможных обрывов монтажных выводов танталовых конденсаторов и для оценки необходимости внесения корректив в действующий технологический процесс необходима систематизация и статистический анализ имеющихся данных по отказам в процессе производства, в процессе испытаний и в процессе эксплуатации по данному виду дефекта, и отбор наиболее значимых критериев технологического процесса.

Постановка задачи. Исходные требования

Объектом исследования является качество приварки монтажных выводов танталовых объемно-пористых конденсаторов. Конструктивно выводы объемно-пористых конденсаторов представляют собой гибкие проволочные про-

вода круглого сечения, как правило, унифицированным диаметром 0,6-0,8 мм.

Для удовлетворения требований к монтажу на плату электротехнических изделий и требований к воздействию установленных в нормативной документации механических нагрузок при эксплуатации выводы объемно-пористых танталовых конденсаторов должны выдерживать без механических повреждений и обрывов воздействия следующих факторов:

- растягивающей силы 10 Н, направленной вдоль оси вывода;
- скручивание на угол поворота 180° при допустимом трехкратном воздействии;
- изгибающей силы 5 Н при допустимом трехкратном числе изгибов.

С учетом предъявляемых требований к качеству крепления монтажных выводов на предприятиях конденсаторостроения предусмотрена система разрушающего и неразрушающего контроля, включающая испытания образцов-свидетелей на разных этапах жизненного цикла. Для оценки качества приварки выводов к корпусу танталовых объемно-пористых конденсаторов на стадии производственного цикла предусмотрены выборочные испытания на механическую прочность выводов (разрушающий контроль) и стопроцентный внешний осмотр (неразрушающий контроль) области сварки на соответствие образцам-свидетелям. В составе периодических и квалификационных испытаний контроль механической прочности выводов производят посредством испытаний на воздействие растягивающей силы, на скручивание и изгиб.

Однако следует учитывать дополнительные основополагающие требования, регламентированные нормативной документацией в отрасли электротехнических изделий, нарушение которых способствует возникновению обрывов выводов конденсаторов:

1) изгиб выводов необходимо производить на расстоянии не менее 2,5 мм от корпуса/области сварки, соответственно, для катодного/анодного вывода, при этом допускается производить однократный изгиб выводов на меньшем расстоянии при условии исключения передачи механических сил, сопровождающих изгиб выводов, на контактный узел сварки. При этом радиус изгиба выводов должен быть не менее полуторной величины диаметра вывода;

2) необходимо предусматривать дополнительное крепление конденсаторов к плате при превышении установленных в нормативной документации механических нагрузок, при этом

необходимо провести испытания данных конденсаторов на воздействие повышенных характеристик со специальными креплениями;

3) устройства для монтировки конденсаторов при автоматизированных методах монтажа не должны ослаблять прочность крепления выводов;

4) при креплении конденсаторов не допускаются механические воздействия, повреждающие или деформирующие корпус, вследствие которых может произойти ослабление сварочного соединения.

Применяемые методы

В качестве основной модели контроля качества приварки выводов танталовых объемно-пористых конденсаторов используется метод комплексного системного межэтапного функционального анализа видов и последствий потенциальных дефектов танталовых конденсаторов [7].

В качестве дополнительного метода неразрушающего контроля для оценки производственных факторов и взаимодействия между ними применен многофакторный эксперимент, основанный на математическом моделировании. Поскольку танталовый конденсатор представляет собой конструктивно и технологически сложную комплексную систему, многофакторный эксперимент может послужить основополагающим методом неразрушающего контроля при оценке значимости воздействующих факторов в производственном цикле изготовления. Поскольку преимуществами полного многофакторного эксперимента относительно многочисленных методов однофакторного эксперимента являются простота решения системы уравнений при оценивании параметров процесса и статистическая избыточность количества измерений, которая уменьшает влияние погрешностей отдельных измерений на оценку параметров, данный вид эксперимента может быть использован при оценке качества технологического процесса на любом этапе изготовления как самого конденсатора, так и его комплектующих.

При планировании полного факторного эксперимента реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях. Количество опытов N при данном типе эксперимента, т.е. число возможных комбинаций из k -го количества воздействующих факторов, определяется по формуле

$$N = n^k, \quad (1)$$

где n – количество уровней фактора (для двухуровневого факторного эксперимента уровни фак-

торов представляют собой границы исследуемой области по выбранному параметру: минимальное $z_{i\min}$ и максимальное $z_{i\max}$ значение фактора); k – количество факторов.

Уравнение регрессии полного факторного эксперимента имеет вид полинома первой степени [8]:

$$y(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \dots + \sum_{\substack{i,j,\dots,n=1 \\ i \neq j \neq \dots \neq n}}^k b_{ijn} \cdot x_i \cdot x_j \cdot \dots \cdot x_n. \quad (2)$$

Установив минимальное z_i^{\min} и максимальное z_i^{\max} значения технологического фактора, можно определить основной уровень z_i^0 и интервал варьирования Δz_i по формулам:

$$z_i^0 = \frac{z_i^{\max} + z_i^{\min}}{2}; \quad (3)$$

$$\Delta z_i = \frac{z_i^{\max} - z_i^{\min}}{2}, \quad (4)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, k$.

Таблица 1. Многофакторный эксперимент для трех факторов $k = 3, N = 2^3$

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат								Выходной параметр
	z_1	z_2	z_3	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	
1	z_1^{\min}	z_2^{\min}	z_3^{\min}	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
2	z_1^{\max}	z_2^{\min}	z_3^{\min}	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2
3	z_1^{\min}	z_2^{\max}	z_3^{\min}	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	z_1^{\max}	z_2^{\max}	z_3^{\min}	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_4
5	z_1^{\min}	z_2^{\min}	z_3^{\max}	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
6	z_1^{\max}	z_2^{\min}	z_3^{\max}	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	z_1^{\min}	z_2^{\max}	z_3^{\max}	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	z_1^{\max}	z_2^{\max}	z_3^{\max}	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

Здесь x_0, x_1, x_2, x_3 – основные факторы в безразмерной систем координат; $x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$ – коэффициенты взаимодействия, учитывающие эффект двойного и тройного взаимодействия факторов

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по методу наименьших квадратов, поэтому необходимо отметить, что экспериментальные данные должны быть однородными и нормально распределенными. Любой коэффициент уравнения регрессии b_j определяется скалярным произведением столбца y_i на соответствующий столбец x_j , отнесенным к числу опытов в матрице планирования N :

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i. \quad (7)$$

Следует учитывать, что интервал варьирования не может быть меньше ошибки, с которой экспериментатор фиксирует уровень фактора, и не может быть настолько большим, чтобы верхний и нижний уровень оказались за пределами области определения.

С помощью линейного преобразования необходимо перейти от систем координат z_1, \dots, z_k к безразмерной системе координат x_1, \dots, x_k :

$$x_i = \frac{z_i - z_i^0}{\Delta z_i}, \quad (5)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, k$.

Для трех факторов с фиктивной переменной расширенная матрица планирования полного факторного эксперимента представлена в табл. 1.

Для оценки воспроизводимости и проверки значимости коэффициентов регрессии рекомендуется проводить серии параллельных опытов, тогда выходной параметр будет представлен как y_1, y_2, \dots, y_n , при этом среднее значение выходного параметра определяется по формуле

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i. \quad (6)$$

Для трехфакторного эксперимента $N = 2^3$ эффекты взаимодействия (коэффициенты регрессии) определяются аналогично линейным эффектам:

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1x_2)_i y_i}{N}; \quad b_{13} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1x_3)_i y_i}{N}; \quad (8)$$

$$b_{23} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_2x_3)_i y_i}{N}; \quad b_{123} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1x_2x_3)_i y_i}{N}.$$

Значения коэффициентов уравнения регрессии b_j характеризуют вклад каждого фактора в величину параметра оптимизации y . Дисперсия воспроизводимости параллельных опытов для выходного параметра y определяется по формуле

$$s_i(y)^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{ik} - \bar{y}_i)^2, \quad (9)$$

где m – количество параллельных опытов; $(m-1)$ – количество степеней свободы, равное количеству параллельных опытов минус единица.

Проверка однородности дисперсий воспроизводимости параллельных опытов в данном случае производится с помощью статистического критерия Кохрена, так как число параллельных опытов больше двух и количество опытов во всех точках плана одинаково. Для параллельных опытов проверка на воспроизводимость по статистическому критерию Кохрена [9] производится исходя из соотношения

$$G = \frac{s_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2} \leq G_{кр}, \quad (10)$$

где $G_{кр}$ – табличное критическое значение Кохрена, определяемое исходя из уровня значимости, числа степеней свободы $f_1 = m - 1$, $f_2 = N$, где m – число параллельных опытов, N – количество возможных комбинаций опытов в одной серии экспериментов [10].

Так как матрица планирования состоит из серии опытов, при условии, что экспериментальные данные являются нормально распределенными и однородными, дисперсия параметра оптимизации или дисперсия воспроизводимости (ошибки) эксперимента получается в результате усреднения дисперсий всех опытов:

$$s_{\text{восп}}^2 = s_i(y)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2. \quad (11)$$

Доверительный интервал для коэффициентов модели составляет:

$$\Delta b_j = \pm \frac{t \cdot s(y)^2}{\sqrt{N}}, \quad (12)$$

где t – параметр Стьюдента при определенном уровне значимости, соответствующий числу степеней свободы $N - 1$.

Значимость для каждого коэффициента в отдельности можно проверять по критерию Стьюдента [11], который при проверке нуль-гипотезы формируется в виде

$$t_j = \frac{|b_j|}{\sqrt{s(b_j)^2}} = \frac{|b_j| \cdot \sqrt{N \cdot m}}{\sqrt{s(y)^2}}. \quad (13)$$

Полученное значение критерия Стьюдента сравнивается с табличным значением для соответствующего уровня значимости и степени свободы $N - 1$. Если расчетное значение меньше табличного, то данные коэффициенты при работе с моделью исключаются из уравнения регрессии. Так как ортогональное планирование эксперимента позволяет определять доверительные границы для каждого из коэффициентов регрессии в отдельности, то если любой из коэффициентов окажется незначимым, он может быть исключен без пересчета всех остальных. После этого математическая модель объекта составляется в виде уравнения связи выходного параметра y и переменных x_i , включающего только значимые коэффициенты.

Заключительным этапом является проверка адекватности полученного уравнения регрессии с использованием критерия Фишера [12], расчетное значение которого является отношением дисперсии исходного ряда наблюдений изучаемого показателя и несмещенной оценки дисперсии остаточной последовательности для данной модели:

$$F_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{ост}}^2}{s_{\text{восп}}^2}, \quad (14)$$

где остаточная дисперсия рассчитывается по формуле

$$s_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y})^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2, \quad (15)$$

где d – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

Если расчетное значение $F_{\text{расч}}$ со степенями свободы $k_1 = (N - d - 1)$ и $k_2 = N$ больше табличного при заданном уровне значимости $F_{\text{табл}}$, то модель считается значимой и полученное уравнение регрессии адекватно описывает эксперимент.

Комплексный анализ качества танталовых конденсаторов

Статистический анализ качества претензионных танталовых объемно-пористых конденсаторов ОАО «Элеконд» по дефекту «обрыв вывода» выполнен за базисный период, равный одному календарному году, в течение 2017 г. Произведен расчет относительных показателей качества танталовых объемно-пористых конденсаторов в базисный период по дефекту «об-

рыв вывода» по относительным показателям качества $K_1 - K_4$ и индекса качества C_k по методике [13] с указанием места обнаружения дефекта (входной контроль, производство, эксплуатация). Все данные приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, имеют место обрывы как катодного, так и анодного монтажных выводов конденсаторов, при этом наибольшее количество претензий у потребителей по дефекту «обрыв вывода» возникает на этапе производства, а именно в процессе монтажа конденсаторов

на плату при сборочных операциях, при этом показатели качества на всех жизненных этапах не являются критическими и входят в допустимый уровень 10 ppm. Основную долю обрывов выводов составляет несоблюдение потребителем установленных требований к монтажу изделий. Но поскольку среди забракованных изделий есть признанные по вине изготовителя и наибольшее число претензий приходится на катодный вывод, исследованию в базисном периоде подлежит качество приварки катодного вывода.

Таблица 2. Матрица анализа претензионных конденсаторов

Этап забракования у потребителя	Показатель качества		K_1	K_2^*	K_3	K_4	C_k
	Претензионные изделия	катодный вывод 72 %** анодный вывод 28 %**					
Итого за базисный период (2017 г.), в том числе:	Претензионные изделия	катодный вывод 72 %** анодный вывод 28 %**	$7,5 \cdot 10^{-6}$ (2)	-	$2,1 \cdot 10^{-6}$ (2)	$2,1 \cdot 10^{-6}$ (2)	-
	Признанные по вине изготовителя	катодный вывод 28 %**					
Входной контроль	Претензионные изделия	катодный вывод 14 %**	$7,5 \cdot 10^{-6}$ (2)	$8,3 \cdot 10^{-4}$ (3)	$2,1 \cdot 10^{-6}$ (2)	$2,1 \cdot 10^{-6}$ (2)	24
	Признанные по вине изготовителя	катодный вывод 15 %**					
Производство***	Претензионные изделия	катодный вывод 57 %** анодный вывод 28 %**	$7,5 \cdot 10^{-6}$ (2)	$4,3 \cdot 10^{-3}$ (4)	$2,1 \cdot 10^{-6}$ (2)	$2,1 \cdot 10^{-6}$ (2)	32
	Признанные по вине изготовителя	катодный вывод 14 %					
Эксплуатация	Претензионные изделия	0	0	0	0	0	0
	Признанные по вине изготовителя	0					

* В графах « K_2 » установлены наибольшие из рассчитанных показателей качества K_2 для различных потребителей.

** Процент от общего числа возвращенных изделий.

*** Обнаружено несоблюдение потребителем требований к монтажу по пп. 1), 3), 4) у 40 % возвращенных изделий; по п. 1) – у 40 % возвращенных изделий; по пп. 1), 4) – у 20 % возвращенных изделий.

При выполнении экспертного анализа качества приварки катодного вывода танталового объемно-пористого конденсатора в зависимости от конструктивного, технологического и производственного аспектов использованы основные сведения о приварке катодного вывода к корпусу танталового объемно-пористого конденсатора. Присоединение катодного вывода к корпусу танталового объемно-пористого конденсатора осуществляется методом конденсаторной бестрансформаторной ударной сварки в среде защитного газа. Конденсаторная (или импульсная) сварка представляет собой контактную сварку, где на расплавление металла расходуется энергия, запасенная в батарее конденсаторов большой емкости [14]. При разряде конденсаторов выделение накопленной энергии происходит практически мгновенно в течение 1-3 мс, что обеспечивает высококонцентрированное тепло-

выделение в области сварного соединения и позволяет сваривать сплавы и металлы, отличные по теплофизическим свойствам, и как результат – получение прочного соединения при минимизации зоны сварки и отсутствии необходимости дополнительной обработки шва. Простота дозирования энергии и усилия осадки приводит к стабильно высокому качеству соединения.

При данном типе сварки качество сварного соединения определяется, как правило, геометрическими размерами и структурой сварной точки (сварного ядра), температурой в зоне расплавленных металлов, скоростью охлаждения, технологий охлаждения, которые, в свою очередь определяются силой сварочного тока, временем воздействия тока, формой и размерами контактной поверхности, состоянием свариваемых поверхностей, усилием сжатия свариваемых деталей.

При отсутствии общего ядра свариваемых металлов не получают достаточного развития процессы перемешивания и оттеснения частиц металла к границе ядра. Температура расплавленного металла в ядре и окружающей зоне сварки зависит от энергии сварочного процесса. В процессе исследований установлено, что при выполнении ряда условий температура на поверхности детали в контактной зоне электрод – деталь характеризует температуру и размеры литой зоны сварного соединения, однако измерять ее не представляется целесообразным, так как действующие методы контроля и регулирования по температуре имеют существенные недостатки, из-за которых ограничено их практическое использование. Скорость охлаждения сварного металла зависит от применяемого инертного газа и способа его подачи.

Сварочный ток $I_{св}$ – энергетический параметр, определяющий режим сварки, температуру зоны сварки и качество сварного шва. При импульсной сварке способ задания и регулирования сварочным током заключается в изменении его действующего значения при изменении напряжения заряда батареи конденсаторов $U_{зар}$, при этом время воздействия импульса t составляет 1-3 мс и обеспечивается конфигурацией оборудования.

Усилие сжатия электродов $F_{сж}$ является одним из воздействующих факторов, влияющих на внедрение расплавленного металла в область свариваемых поверхностей.

Далее проводится анализ конструктивно-технологического и производственного запасов (КТЗ) крепления катодного вывода к корпусу

конденсатора. На производственном этапе оценка качества крепления катодного вывода каждой изготавливаемой партии производится путем разрушающего контроля на воздействие растягивающей силы 20 Н, что двукратно превышает допустимую нагрузку (10 Н), на воздействие скручивания и контроля прочности сварки методом натяжения. В течение базисного периода отказов в производстве не было, что подтверждает высокое качество приварки катодных выводов. Из вышеизложенного следует, что танталовые объемно-пористые конденсаторы имеют достаточный КТЗ, конструктивно изделия проработаны.

Затем устанавливаются ключевые технологические операции, обеспечивающие качественную приварку катодного вывода. На качество крепления монтажного вывода оказывает влияние качество сварного соединения, зависящее от многих факторов: качества применяемых материалов, качества свариваемых поверхностей, технологических режимов сварки, стабильности работы оборудования (табл. 3).

На основе проведенного анализа разработана причинно-следственная диаграмма вероятности возникновения дефекта «обрыв катодного вывода» по методу Иссикавы с учетом установленных потенциальных причин возникновения дефекта (рисунок).

С учетом табл. 3 и рисунка сформированы типовые возможные причины появления дефекта «обрыв вывода» (табл. 4), установлены баллы значимости и рассчитан коэффициент риска для каждой возможной причины в соответствии с методикой, опубликованной в [15].

Таблица 3. Наиболее значимые технологические операции, обеспечивающие качество приварки катодного вывода конденсатора

Операция	Вероятный фактор, влияющий на качество	Возможный дефект	Возможная причина
Приварка катодного вывода к корпусу конденсатора	– некачественный материал; – некорректный технологический режим; – сбой оборудования, оборудование не обеспечивает заданную точность; – отсутствует подача инертного газа; – человеческий фактор (невнимательность, болельность, неопытность и т. п.)	– пережог вывода, прожог корпуса;	– нарушение температурного поля в области сварки вследствие отклонения энергетических параметров, некачественной поверхности электрода и свариваемых деталей
		– налет сажи на корпусе;	
		– непровар (полное отсутствие соединения, малые размеры ядра, недостаточная зона взаимного расплавления, полное отсутствие зоны взаимного расплавления);	– отставание скорости деформации от скорости нагрева
		– выброс расплавленного металла из зоны сварки (выплеск металла);	– превышение усилия сжатия свариваемых деталей
		– деформация корпуса	
		– нарушение сплошности металла ядра и околошовной зоны (трещины, раковины)	– неравномерное распределение температурного поля, возникновение растягивающих напряжений

Окончание табл. 3

Операция	Вероятный фактор, влияющий на качество	Возможный дефект	Возможная причина
Покрытие вывода	– некачественные материалы; – некачественная среда	– налет сажи на корпусе	– некачественная поверхность электрода и свариваемых деталей; – следствие пережога
Контроль качества приварки	– выборка не обеспечивает вероятность попадания некачественной продукции; – контролер не провел операцию надлежащим образом; – оснастка не обеспечивает требования контроля	– пропуск некачественно приваренного вывода	– некорректно разработана карта контроля; – невнимательность, неопытность контролера; – отсутствие своевременной аттестации приспособлений контроля



Причинно-следственная диаграмма для анализа качества приварки монтажного катодного вывода танталового объемно-пористого конденсатора

Таблица 4. Возможные причины появления дефекта «обрыв катодного вывода» и баллы значимости

Возможная причина	Баллы значимости			КР
	S	O	D	
Нарушение режимов монтажа/испытаний у потребителя	8	4	4	160
Оборудование не обеспечивает точность, сбой оборудования	8	2	8	128
Некорректные технологические режимы	8	2	4	64
Некачественный материал	8	2	4	64
Невнимательность, болезнь, неопытность, халатное отношение к работе	8	2	6	96
Некорректные процессы (например, технологическая инструкция не в полной мере описывает технологический процесс, замена рабочего проведена на неопытного и т. п.)	8	1	3	24

На основе аналитических данных наиболее значимыми возможными причинами появления дефекта «обрыв катодного вывода» конденсато-

ра являются нарушение режимов монтажа/испытаний у потребителя или сбой оборудования и последующий пропуск брака исполни-

телем при контроле (ввиду отсутствия симптоматики некачественной сварки при маловероятных случаях и невозможности оценки качества неразрушающим методом контроля). Соответственно, при появлении претензий по некачественному креплению выводов конденсаторов в первую очередь необходим анализ режимов монтажа и эксплуатации конденсаторов у потребителей.

Статистический анализ показателей качества технологического процесса танталового конденсатора проводится на выбранных наиболее значимых ключевых технологических операциях в базисном периоде Δt :

– на операциях «приварка катодного вывода к корпусу конденсатора», «контроль качества приварки» в базисном периоде Δt операционный процент выхода годных находился выше планового, отклонений не было, ПВГ стабильный.

– произведена оценка уровня технологической дисциплины при производстве танталовых конденсаторов на наиболее значимых для появления дефекта «обрыв вывода» операциях – отклонений за базисный период не выявлено ($K_{\text{тд}} = 0$)

– статистическая оценка показателей настроенности, точности, стабильности технологического процесса производится по имеющейся методике на операциях «приварка катодного вывода к корпусу конденсатора» и «приварка анодного вывода с трубочкой изолятора» – в базисном периоде Δt отклонений не было.

В ходе апробации методики, представленной в [16], сформулированы рекомендации по ее улучшению.

Уточнить графу «Возможная частота дефектов» в таблице «Рекомендуемые корреляционные баллы возникновения причины дефекта O » для балла O :

№ п/п	Вероятность возникновения дефекта	Описание	Возможная частота дефектов	Балл O
1	Сверхвысокая	Дефект неизбежен	$>5 \cdot 10^{-1}$	10
2	Очень высокая	Дефект возникает почти всегда	$5 \cdot 10^{-1} \dots 2 \cdot 10^{-1}$	9
3	Высокая	Дефект ассоциируется с аналогичными процессами, которые часто отказывают	$2 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	8
4	Средняя высокая		$1 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$	7
5	Умеренная	Дефект ассоциируется с предыдущими процессами, у которых наблюдались случайные дефекты, но не в большой пропорции	$5 \cdot 10^{-2} \dots 2 \cdot 10^{-3}$	6
6	Средняя умеренная		$2 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$	5
7	Низко умеренная		$5 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-4}$	4
8	Низкая	Отдельные дефекты, связанные с подобными процессами	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$	3
9	Очень низкая	Отдельные дефекты, связанные с почти идентичными процессами	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$	2
10	Малая	Дефект маловероятен. Дефекты никогда не связаны с такими же идентичными процессами	$<1 \cdot 10^{-6}$	1

Определить баллы корреляции для трех этапов:

– для анализа возвратов (балл C_k) – максимальный индекс качества из матрицы анализа претензионных конденсаторов;

– конструктивно-технологического запаса (балл $B_{\text{ктз}}$);

– стабильности ТП ($B_{\text{тп}}$) в зависимости от степени проявления отказов в процессе производства на основании данных табл. 4.

Вывести общую оценку качества путем произведения баллов:

$$B_{\Sigma} = C_k \times B_{\text{ктз}} \times B_{\text{тп}}$$

и сравнить с оценкой качества для оценки необходимости принятия корректирующих мер.

№ п/п	Общая оценка качества B_{Σ}	Вероятность возникновения дефекта	Необходимость корректирующих мер
1	500 000...1 000 000	Сверхвысокая	Сверхвысокая
2	250 000...500 000	Очень высокая	Очень высокая
3	100 000...250 000	Высокая	Высокая
4	50 000...100 000	Средняя высокая	Средняя высокая
5	15 000...50 000	Умеренная	Умеренная
6	4 000...15 000	Средняя умеренная	Средняя умеренная
7	1000...4000	Низкая умеренная	Низкая
8	500...1000	Низкая	Очень низкая
9	100...500	Очень низкая	Не требуется
10	1...100	Малая	

Для проведенного исследования суммарный балл качества $B_{\Sigma} = 32 \cdot 1 \cdot 2 = 64$.

По результатам статистического анализа претензионного этапа, испытаний на конструктивно-технологический и производственный запас, оценки настроенности технологического процесса можно заключить, что конденсаторы объемно-пористые танталовые производства ОАО «Электонд» в части крепления выводов конструктивно проработаны, и с учетом результатов производственных испытаний с достаточной достоверностью можно заключить, что конденсаторы имеют запас относительно норм технических требований на изделия.

С учетом того, что отказы у потребителя составляют менее 10 ppm, и на основании данных по статистической оценке качества на стадии производства, конструктивно-производственного запаса можно заключить, что незамедлительных корректирующих мер по исключению данного вида дефекта не требуется, увеличение выборки на технологических испытаниях на прочность сварки экономически нецелесообразно.

Многофакторный эксперимент

Поскольку наибольшее число отказавших ввиду некачественной приварки монтажного вывода конденсаторов по вине изготовителя приходится на катодный вывод, с помощью трехфакторного эксперимента изучено качество приварки катодного вывода к корпусу конденсатора. В качестве критерия качества сварки (выходной параметр) выбран относительный показатель «глубина внедрения металла монтажного вывода в корпус конденсатора», определяемая методом косвенного измерения (разности длины вывода до сварки и после в мм). В соответствии со стратегией многофакторного эксперимента при числе факторов $k = 3$ проведены три серии экспериментов. В качестве факторов выбраны: x_1 – усилие сжатия электродов, Н; x_2 – напряжение заряда конденсаторов, В; x_3 – расстояние от места подачи защитного газа до области сварки, мм. В табл. 5 представлены уровни факторов и интервалы варьирования, рассчитанные по формулам (3) и (4).

В табл. 6 представлены результаты трехфакторного эксперимента.

Таблица 5. Уровни факторов и интервалы варьирования

Фактор	Наименование фактора	Уровень факторов			Интервал варьирования
		–	0	+	
z_1	Напряжение заряда конденсаторов $U_{\text{зад}}$, В	260	295	330	35
z_2	Усилие сжатия свариваемых поверхностей $F_{\text{сж}}$, Н	100	125	150	25
z_3	Расстояние от места (зона) подачи защитного газа до области сварки, мм	5	7,5	10	2,5

Таблица 6. Результаты полного трехфакторного эксперимента для приварки катодного вывода к конденсатору

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат				Выходной параметр (для 3 серий опытов)			Расчетные данные			
	z_1	z_2	z_3	x_0	x_1	x_2	x_3	y_{i1}	y_{i2}	y_{i2}	\bar{y}_i	s_i^2	\hat{y}_i	$ \Delta y_i $
Вариация θ_1														
1	260	100	5	1	-1	-1	-1	0,17	0,16	0,17	0,167	0,000033	0,170	0,0029
2	330	100	5	1	1	-1	-1	0,18	0,18	0,17	0,177	0,000033	0,177	0,0004
3	260	150	5	1	-1	1	-1	0,18	0,17	0,18	0,177	0,000033	0,177	0,0004
4	330	150	5	1	1	1	-1	0,19	0,19	0,18	0,187	0,000033	0,185	0,00208
5	260	100	10	1	-1	-1	1	0,17	0,18	0,18	0,177	0,000033	0,175	0,00125
6	330	100	10	1	1	-1	1	0,18	0,18	0,19	0,183	0,000033	0,183	0,00042
7	260	150	10	1	-1	1	1	0,18	0,19	0,18	0,183	0,000033	0,183	0,00042
8	330	150	10	1	1	1	1	0,19	0,18	0,19	0,187	0,000033	0,190	0,0038
											$\sum s_i^2$	0,000267	$\sum \Delta y_i^2$	0,0000292
											$s_{\text{восп}}^2$	0,0000333	$s_{\text{ост}}^2$	0,0000058
<p><i>Примечание.</i> Приняты следующие обозначения: \bar{y} – среднее значение выходного параметра, определяемое по формуле (6); s^2 – дисперсия воспроизводимости параллельных опытов, определяемая по формуле (9); \hat{y} – расчетное значение параметра y, рассчитанное из модели; $\Delta y = \bar{y}_i - \hat{y}_i$</p>														

Проверяем однородность дисперсий воспроизводимости параллельных опытов по статистическому критерию Кохрена по соотношению (10) путем сравнения с табличным критическим значением $G_{кр} = 0,5157$, определяемым исходя из уровня значимости 5 %:

$$G = \frac{0,000033}{0,000267} = 0,125 < G_{кр} \Big|_{f_1=2}^{f_2=8} = 0,5157.$$

Экспериментальные данные являются нормально распределенными и однородными, следовательно, дисперсия воспроизводимости эксперимента определяется по формуле (11):

$$s_{восп}^2 = s_i(y)^2 = 0,0000333.$$

Определяем по формуле (12) доверительный интервал при параметре Стьюдента $t = 1,895$ (при уровне значимости 5 % при числе степеней свободы 7) для коэффициентов модели:

$$\Delta b_j = \pm \frac{1,895 \cdot 0,0000333^2}{\sqrt{8}} = \pm 0,000022.$$

Находим линейные коэффициенты и коэффициенты взаимодействия факторов для уравнения регрессии по формулам (7) и (8):

$$b_0 = 0,18; \quad b_1 = 0,00375; \quad b_2 = 0,00375;$$

$$b_3 = 0,00292; \quad b_{12} = -0,00042;$$

$$b_{13} = -0,00125; \quad b_{23} = 0; \quad b_{123} = -0,00042.$$

Проверяем значимость для коэффициентов b_i путем сравнения значений, определяемых по формуле (13) для каждого коэффициента уравнения регрессии, с критерием Стьюдента $t = 1,895$:

$$t_0 = 152,7351; \quad t_1 = 3,181981; \quad t_2 = 3,181981;$$

$$t_3 = 2,474874; \quad t_{12} = -0,35355;$$

$$t_{13} = -1,06066; \quad t_{23} = 0; \quad t_{123} = -0,35355.$$

Проверка показала, что значимыми являются коэффициенты уравнения регрессии $b_0 = 0,18$; $b_1 = 0,00375$; $b_2 = 0,00375$; $b_3 = 0,00292$.

Таким образом, при проведении эксперимента получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 0,18 + 0,00375 \cdot x_1 + 0,00375 \cdot x_2 + 0,00292 \cdot x_3.$$

Проверка адекватности полученного уравнения регрессии с использованием критерия Фишера при уровне значимости 5 % проводится исходя из расчетного значения $F_{расч}$, рассчитанного по формуле (14), где остаточная дисперсия по формуле (15) составляет $s_{ост}^2 = 0,0000750$:

$$F_{расч} = \frac{0,0000058}{0,0000333} = 0,175 < F_{табл} \Big|_{k_1=4}^{k_2=8} = 3,84.$$

Так как $F_{расч} < F_{табл}$, получены модели, адекватно описывающие зависимость параметра качества сварки от определяющих факторов.

В представленной модели при импульсной стыковой сварке катодного вывода обнаружено наиболее сильное влияние на качество сварки энергетического параметра – напряжения заряда конденсаторов, непосредственно зависящего от тока сварки и давления на свариваемые поверхности. Зона охлаждения – область подачи инертного газа – оказывает также влияние на качество выполнения операции, но меньшее по сравнению с энергетическими факторами. Зависимости совокупности факторов не обнаружено.

Выводы

1. В части изготавливаемой продукции имеет место скрытый дефект сварного соединения, обнаруживаемый на этапе монтажа у потребителя, при этом вероятность отказов входит в допустимый уровень 10 ppm, а наибольшую долю отказов составляют обрывы по причине некорректных режимов монтажа у потребителей.

2. Проведен многофакторный эксперимент, в результате которого построена регрессионная модель качества процесса сварки катодного вывода к корпусу танталового конденсатора и выявлена зависимость от энергетических режимов сварки. Обнаружено сильное влияние на качество выполнения операции токового значения сварки и давления на свариваемые поверхности. Область подачи инертного газа также вносит свой вклад в температурное поле зоны сварки, но в меньшей степени по сравнению с параметрами режима сварки.

3. На основании результатов апробации на ОАО «Элеконд» можно заключить, что методика системного межэтапного комплексного анализа качества танталовых конденсаторов может быть применима для оценки качества танталовых конденсаторов как на этапе производства – для совершенствования технологических процессов, на этапе доработки конструкции, так и на этапе эксплуатации – для удовлетворения требований потребителей, и может дать экономический эффект от снижения доли возвращаемых конденсаторов, подлежащих замене. Комплексный контроль по совокупности параметров на стадии производства, испытаний и эксплуатации позволяет исключить попадание потребителю некачественной продукции.

Библиографические ссылки

1. 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.
2. Исследование влияния на эксплуатационные характеристики качества материалов танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов / В. А. Кузнецова, П. Л. Кузнецов, Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2(22). С. 140–143.
3. 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.
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. 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.
6. 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.
7. Беляева Е. А., Муравьев В. В. Указ. соч.
8. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 279 с.
9. <http://statistica.ru/local-portals/medicine/q-kriteriy-kokhrena/>
10. Аббакумов К. Е. Статистические основы организации и измерений в неразрушающем контроле. СПб. : ЛЭТИ, 2012. 192 с.
11. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Указ. соч.
12. Аббакумов К. Е. Указ. соч.
13. Беляева Е. А., Муравьев В. В. Указ. соч.
14. Конденсаторная сварка // Технологические процессы в машиностроении : учеб. пособие ; под общ. ред. В. А. Вагнера. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. 592 с.
15. Беляева Е. А., Муравьев В. В. Указ. соч.
16. Там же.

References

1. Belyaeva E. A., Murav'ev V. V. (2018). Quality management of tantalum capacitors on the basis of the analysis of defects arising at the stages of the technological process and detected during operation. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], vol. 21, no. 1, pp. 74-81 (in Russ.).
2. Kuznecova V. A., Kuznecov P. L., Belyaeva E. A., Murav'ev V. V. (2013). Investigation of the influence on the performance characteristics of the materials of tantalum oxide semiconductor chip capacitors. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve* [Intellectual systems in production], no. 2(22), pp. 140-143 (in Russ.).
3. Kuznecov P. L., Kuznecova V. A., Lomaev G. V. (2014). Investigation of the influence of the characteristics of the manufacturing process on changes in the performance characteristics of tantalum space-porous capacitors in time. *Vestnik IzhGTU* [Bulletin ISTU], no. 1(61), pp. 11-15 (in Russ.).
4. Barsukov V. K., Sibgatullin B. I. (2015). Test bench for tantalum capacitors with pulse current. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve* [Intellectual systems in production], no. 3(27), pp. 63-66 (in Russ.).
5. Kuznecova V. A., Kuznecov P. L., Murav'ev V. V. (2013). Investigation of the reliability of tantalum oxide semiconductor chip capacitors on the basis of experimental data. *Vestnik IzhGTU* [Bulletin ISTU], no. 3(59), pp. 88-91 (in Russ.).
6. Gorelov S. V., Ignatenko E. S., Morev K. N., Nikulin V. I. (2016). Prevention of failures of tantalum chip capacitors at the stage of production. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], no. 3-4, pp. 135-138 (in Russ.).
7. Belyaeva E. A., Murav'ev V. V. (2018). Op. cit.
8. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskij Yu. V. (1976). *Planirovanie ehksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij* [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow : Nauka (in Russ.).
9. Ibid.
10. Abbakumov K. E. (2012). *Statisticheskie osnovy organizacii i izmerenij v nerazrushayushchem kontrole* [Statistical fundamentals of organization and measurements in non-destructive testing]. St. Petersburg: LEHTI (in Russ.).
11. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskij Yu. V. (1976). Op. cit.
12. Abbakumov K. E. (2012). Op. cit.
13. Belyaeva E. A., Murav'ev V. V. (2018). Op. cit.
14. V. A. Vagner (2006). *Condenser welding. Tekhnologicheskie processy v mashino-stroenii* [Technological processes in mechanical engineering]. Barnaul: AltGTU (in Russ.).
15. Belyaeva E. A., Murav'ev V. V. (2018). Op. cit.
16. Ibid.

Integrative Quality Control of Wet Tantalum Capacitors Terminal Welding

E. A. Belyaeva, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. V. Murav'ev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

In order to assess the quality of wet tantalum capacitors positive and negative wire welding and to consider the need for preventive or remedial actions, the integrative quality control of terminal welding has been accomplished in this paper by the method of tantalum capacitors quality control based on assessment of returned products, design and technology, production and human factors. Having estimated and analyzed the returned products the need for assessment of the welding quality for the negative wire is identified. Using the full factorial experiment on the operation "welding of the cathode terminal to the capacitor case" to identify the most effective modes for the quality of the weld, the quantitative effect of the process characteristics was investigated and the regression model was constructed. The dependence on the energy parameters of welding has been revealed. The welding current and pressure on the welding surfaces are the most influencing on the operation quality, the inert gas feed zone also contributes to the temperature field of the weld zone, but to a lesser extent compared to the energetic parameters of the welding modes.

On the results of the approbation it can be concluded that the methodology of a systemic integrative quality analysis of the tantalum capacitors quality can be applied to assess the quality of tantalum capacitors at the production stage (for improving the technological processes), at design modification and for the usage stage, and can give an economic effect. Integrative control of the set of parameters at the stage of production, testing and operation makes it possible to exclude the transfer of the low-quality product to consumers.

Keywords: tantalum capacitor, welding, wire, terminal, quality, defect.

Получено 03.05.2018