

# Танталовые конденсаторы: особенности применения

Целью данной статьи является ознакомление пользователей с особенностями эксплуатации, монтажа и хранения танталовых конденсаторов. Статья содержит описание механизмов пробоя танталовых конденсаторов, предлагает вариант расчета допустимых уровней рабочих токов и напряжений для различных частотных диапазонов.



Электронная промышленность движется в сторону уменьшения габаритов электронных устройств и в сторону увеличения частот переключения: за последние десять лет рабочие частоты преобразователей возросли с 10 кГц до 100 кГц и выше. Требование высоких рабочих частот и малых габаритов приводят к расширению применения твердотельных танталовых конденсаторов. Твердотельные [танталовые конденсаторы](#) обладают отличными характеристиками: высокой удельной емкостью, малыми габаритами (рисунок 1, таблица 1) [1]. Значение ESR таких конденсаторов остается неизменным с ростом частоты или даже уменьшается, а значение импеданса на частотах 100 кГц и выше достигает минимального значения. Кроме того, они отличаются высокой надежностью и совместимы со всеми общепринятыми технологиями монтажа.

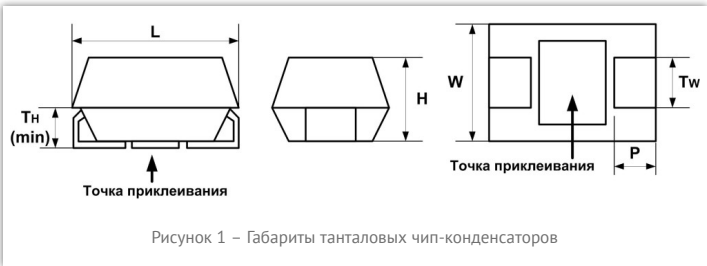


Таблица 1 – Габариты общепринятых типоразмеров танталовых чип-конденсаторов

Типоразмер	Габаритные размеры дюйм [мм]					
	L	W	H	P	TW	TH (мин.)
A	0.126 ± 0.008	0.063 ± 0.008	0.063 ± 0.008	0.031 ± 0.012	0.047 ± 0.004	0.028
	[3.2 ± 0.20]	[1.6 ± 0.20]	[1.6 ± 0.20]	[0.80 ± 0.30]	[1.2 ± 0.10]	[0.70]
B	0.138 ± 0.008	0.110 ± 0.008	0.075 ± 0.008	0.031 ± 0.012	0.087 ± 0.004	0.028
	[3.5 ± 0.20]	[2.8 ± 0.20]	[1.9 ± 0.20]	[0.80 ± 0.30]	[2.2 ± 0.10]	[0.70]
C	0.236 ± 0.012	0.126 ± 0.012	0.098 ± 0.012	0.051 ± 0.012	0.087 ± 0.004	0.039
	[6.0 ± 0.30]	[3.2 ± 0.30]	[2.5 ± 0.30]	[1.3 ± 0.30]	[2.2 ± 0.10]	[1.0]
D	0.287 ± 0.012	0.169 ± 0.012	0.110 ± 0.012	0.051 ± 0.012	0.094 ± 0.004	0.039
	[7.3 ± 0.30]	[4.3 ± 0.30]	[2.8 ± 0.30]	[1.3 ± 0.30]	[2.4 ± 0.10]	[1.0]
E	0.287 ± 0.012	0.169 ± 0.012	0.157 ± 0.012	0.051 ± 0.012	0.094 ± 0.004	0.039
	[7.3 ± 0.30]	[4.3 ± 0.30]	[4.0 ± 0.30]	[1.3 ± 0.30]	[2.4 ± 0.10]	[1.0]
V	0.287 ± 0.012	0.169 ± 0.012	0.079 max	0.051 ± 0.012	0.094 ± 0.004	0.039
	[7.3 ± 0.30]	[4.3 ± 0.30]	[2.0 max]	[1.3 ± 0.30]	[2.4 ± 0.10]	[1.0]

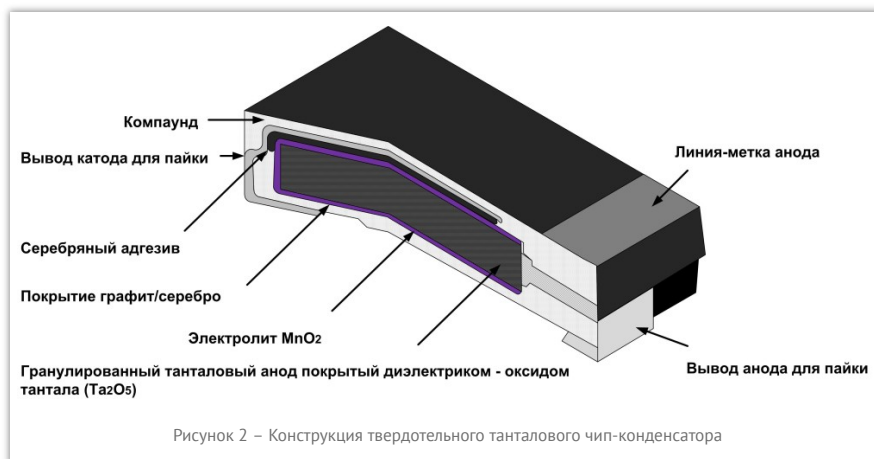
Главной задачей при эксплуатации танталовых конденсаторов является увеличения срока службы и сокращение числа отказов. Анализ показал, что это возможно только при учете их особенностей на всех этапах жизни: производстве, хранении, монтаже, эксплуатации. Для того чтобы определить причины выхода танталовых конденсаторов из строя, необходимо рассмотреть их конструкцию и особенности производства.

## Конструкция и производство твердотельных танталовых конденсаторов

Тантал выбран в качестве основного материала для конденсаторов не случайно [1]. Дело в том, что существует всего несколько металлов, которые при окислении способны создавать плотные и непроводящие оксидные пленки: титан,

цирконий, ниобий, тантал, алюминий и некоторые другие. Однако, среди перечисленных металлов, только при использовании алюминия и тантала удается технологически контролировать толщину оксидной пленки.

Твердотельные танталовые конденсаторы являются электролитическими конденсаторами, которые состоят из четырех основных частей: анода, диэлектрика, электролита (жидкого или твердого) и катода (рисунок 2).



Производство конденсаторов представляет собой сложную цепочку технологических операций [2].

**Создание анода.** В твердотельных танталовых конденсаторах анод представляет собой пористую гранулированную структуру, похожую на губку (рисунок 2), изготовленную из прессованного танталового порошка высокой степени очистки. Эта губку получают в процессе спекания в условиях глубокого вакуума при высоких температурах, которые, как правило, лежат в диапазоне от 1300 до 2000°C. Очевидно, что такая структура имеет высокое соотношение объема и суммарной площади поверхности благодаря высокой степени пористости.

**Формирование диэлектрика.** Диэлектрик представляет собой пленку пентаоксида тантала ( $Ta_2O_5$ ), сформированную на поверхности анода при помощи электрохимического окисления. Толщину оксидной пленки можно задавать, изменяя величину приложенного напряжения в ходе процесса электрохимического окисления. Как правило, толщина пленки чрезвычайно мала – от нескольких сотен до нескольких тысяч ангстрем (1 ангстрем =  $1.0 \cdot 10^{-10}$  метра).

Оксидная пленка ( $Ta_2O_5$ ) имеет аморфную, а не кристаллическую структуру. Это является важным фактором, так как такая структура обеспечивает высокое электрическое сопротивление.

С другой стороны,  $Ta_2O_5$  может находиться и в кристаллическом состоянии. Кристаллический оксид тантала является проводящим материалом и не обеспечивает требований, предъявляемых к диэлектрику. Ниже будет показано, что наличие кристаллов  $Ta_2O_5$  является крайне негативным фактором.

**Формирование электролита.** В качестве электролита используют диоксид марганца ( $MnO_2$ ), который представляет собой твердотельный полупроводниковый материал. Диоксид марганца формируется в ходе окислительно-восстановительной реакции при термической обработке солей марганца. В процессе изготовления конденсатора полученную ранее губчатую структуру пропитывают солями марганца и подвергают нагреву до получения диоксида марганца на поверхности (рисунок 2). Этот процесс пропитки и нагревания повторяют несколько раз, до полного покрытия всей структуры.

**Создание катода.** Для улучшения степени контакта поверхность диоксида марганца покрывают слоем графита, а на графит наносят проводящее металлическое покрытие, обычно серебро.

Полученную структуру запрессовывают в компаунд (рисунок 2).

Представленное описание конструкции позволяет определить механизмы выхода конденсатора из строя. Основной причиной отказов является пробой танталовых конденсаторов.

## Пробой танталовых конденсаторов

Пробой танталовых конденсаторов (breakdown) связан с резким возрастанием токов утечки («leakage current») [2]. Как и все конденсаторы, танталовые конденсаторы имеют токи утечки. Величина их мала и постоянна, но их наличие все равно необходимо учитывать. Так, например, во время задающих цепях ток заряда конденсатора должен превышать ток утечки как минимум в 10 раз. Например, при заряде 47 мкФ конденсатора через резистор 100 кОм напряжением 5 В ток утечки не должен превышать 5 мкА во всем рабочем диапазоне температур.

Возрастание тока утечки связано с пробоем диэлектрика ( $Ta_2O_5$ ). Механизм пробоя достаточно хорошо изучен. Диэлектрик, изначально имеющий аморфную структуру, на отдельных участках поверхности кристаллизуется под действием различных факторов (температура, высокое напряжение). Кристаллический пентаоксид тантала является проводящим материалом, что приводит к резкому возрастанию токов утечки (рисунок 3).

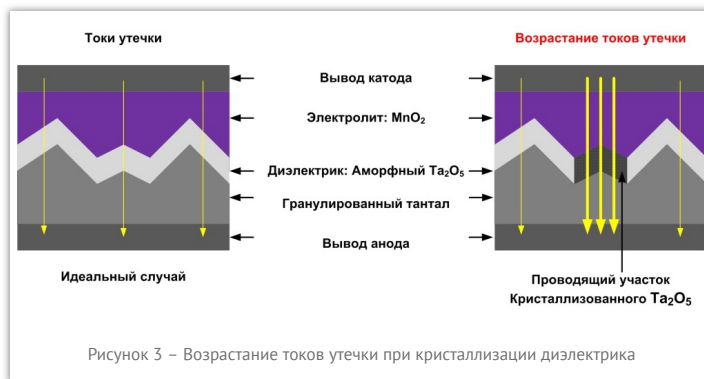
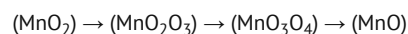


Рисунок 3 – Возрастание токов утечки при кристаллизации диэлектрика

Если пробой произошел при приложении высокого напряжения и высоких температур, то реакция может быстро распространиться на всю поверхность диэлектрика – лавинообразный эффект («avalanche effect»). Степень распространения лавинообразного эффекта может быть различной. Поэтому и степень повреждений варьируется от относительно маленьких «выгоревших» точек до зигзагообразных выжженных участков на поверхности диэлектрика, при этом возможно даже повреждение танталовой основы и металлических контактов.

Если площадь кристаллизации диэлектрика не велика, может проявиться эффект самовосстановления («healing effect»). В этом случае ток, протекающий через кристаллизованный диэлектрик, вызывает его перегрев, что приводит к химическим преобразованиям в структуре электролита ( $MnO_2$ ). Эти преобразования происходят в следующем порядке:



Уровень перегрева определяет ступень превращения. Первое превращение ( $MnO_2$ ) → ( $MnO_2O_3$ ) требует разогрева до 530°C, а последнее происходит при 1000°C. Каждое следующее преобразование приводит к появлению оксида с меньшим значением проводимости, чем у предыдущего. В результате проводящий кристаллический участок оказывается изолированным непроводящим оксидом марганца (рисунок 4).

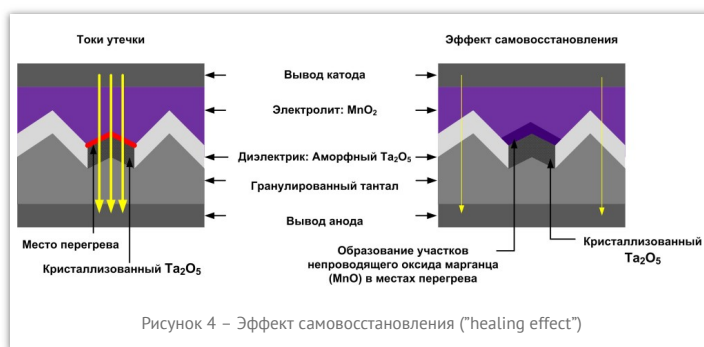


Рисунок 4 – Эффект самовосстановления ("healing effect")

Кроме пробоя, возникающего в процессе неграмотной эксплуатации, возможно нарушение целостности диэлектрика из-за различных дефектов, возникших в процессе производства и транспортировки [2]. Существует несколько основных видов дефектов.

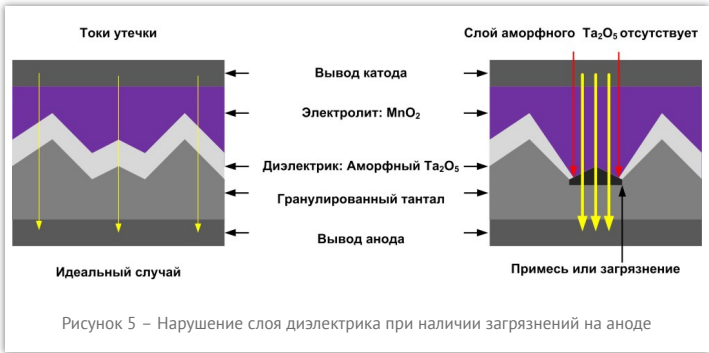
- Механические дефекты диэлектрика.
- Примеси и включения в диэлектрике.
- Участки кристаллического диэлектрика, возникшие при производстве.

**Механические дефекты** могут быть двух видов. Первый вид дефектов возникает при повреждении слоя диэлектрика после того, как он был выращен на металлической подложке. Это может произойти, например, при ударе структуры конденсатора о твердую поверхность.

Второй вид механических дефектов возникнет при формировании слоя электролита ( $MnO_2$ ). Дело в том, что восстановление  $MnO_2$  из солей марганца представляет собой достаточно бурную реакцию с образованием пара, выделением газов и тепла. Так как структура поверхности танталового анода пористая, то внутри пор на поверхность диэлектрика оказывается давление. Совместное действие теплового удара и давления газов внутри малых пор может вызвать повреждение диэлектрика.

**Дефекты, связанные с примесями** возникают из-за наличия на поверхности тантала различных включений (примесей или загрязнений). Такими примесями могут быть: углерод и металлы (железо, кальций и др.). При отсутствии

поверхностных включений слой диэлектрика будет равномерным. Однако при наличии загрязнений образования оксида тантала в этих местах не будет (так как в этих местах не будет достаточного количества тантала). При большой толщине наращиваемого диэлектрика эти места будут заращиваться оксидом, но толщина его будет ниже, чем во всей структуре в целом (рисунок 5).



**Наличие кристаллических вкраплений** в слое аморфного оксида тантала ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) является третьей причиной нарушения слоя диэлектрика при производстве. Кристаллизация может происходить по ряду причин: материал или концентрация электролита не соответствует требованиям, несоблюдение температурного режима, наличие примесей в исходных материалах. Кроме того, кристаллизация может возникать при избытке кислорода в среде при создании танталового анода (этот процесс, как говорилось выше, должен проходить в условиях глубокого вакуума). При наличии кислорода на поверхности танталового анода возникают пирамидальные слои кристаллического оксида тантала. Как было сказано выше эти участки являются проводящими. Именно поэтому производители танталового порошка прикладывают большие усилия, чтобы минимизировать количество кислорода в порошке, прежде чем поставить его производителю конденсаторов. В свою очередь производитель конденсаторов старается максимально контролировать параметры спекания анода.

Таким образом, качество, надежность и срок службы во многом определяется еще на этапе производства. Чем более ответственно производитель конденсаторов следит за выполнением технологии изготовления и качеством материалов, тем надежнее будет итоговый продукт.

Следующим важным этапом, определяющим срок службы конденсаторов, является правильный расчет рабочих режимов: определение допустимых уровней токов и напряжений. Для этого расчета необходимо определить основные параметры танталовых конденсаторов и их особенности.

## Основные параметры танталовых конденсаторов

Расчет безопасных режимов работы подразумевает определение уровней допустимых напряжений и токов [3]. Для этого расчета потребуется использование основных параметров танталовых конденсаторов, которые могут быть найдены в документации на соответствующие компоненты.

**Номинальная емкость («Capacitance»).** Танталовые конденсаторы имеют высокую удельную емкость, что объясняется достаточно просто. Как известно, емкость конденсатора определяется по формуле:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 S / d, (1)$$

где  $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость материала,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $S$  – площадь электродов,  $d$  – толщина диэлектрика.

Диэлектрик ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) имеет высокое значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon=26$  (таблица 2) [1]. Кроме того, сама по себе поверхность анода в структуре конденсатора является гранулированной и имеет большую площадь. В результате, емкость танталовых конденсаторов составляет сотни и тысячи микрофард (таблица 3).

Таблица 2 – Диэлектрическая проницаемость различных материалов

Тип диэлектрика	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$
Воздух (вакуум)	1.0
Бумага	2.0 ... 6.0
Пластик	2.1 ... 6.0
Минеральное масло	2.2 ... 2.3
Силиконовое масло	2.7 ... 2.8

Кварц	3.8 ... 4.4
Стекло	4.8 ... 8.0
Фарфор	5.1 ... 5.9
Слюда	5.4 ... 8.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.4
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	26
Керамика	12 ... 400000

Таблица 3 – Номенклатура и параметры танталовых конденсаторов [серии 293D](#) (Vishay)

Емкость, мкФ	4 В	6.3 В	10 В	16 В	20 В	25 В	35 В	50 В	63 В	75 В
0.10						A	A	A		A
0.15							A	A/B		B
0.22							A	A/B		B
0.33						A	AA	A/B		B
0.47			A		A	A	A/B	A/B/C		B
0.68				A	A	A	A/B	B/C		C
1.0			A	A	A/B	A/B	A/B	B/C		D
1.5		A	A	A/B	A/B	A/B	B/C	B/C/D		D
2.2	A	A	A/B	A/B	A/B	A/B/C	B/C	B/C/D		D
3.3	A	A/B	A/B	A/B	A/B/C	A/B/C	B/C/D	C/D		D
4.7	A/B	A/B	A/B/C	A/B/C	A/B/C	A/B/C/D	B/C/D	C/D/E	D	E
6.8	A/B	A/B	A/B/C	A/B/C	A/B/C	B/C/D	C/D	D/E		
10	A/B	A/B/C	A/B/C	A/B/C/D	B/C/D	B/C/D	C/D	D/E	E	
15	A/B/C	A/B/C	A/B/C	B/C	B/C/D	B/C/D	D/E	E		
22	A/B/C	A/B/C	A/B/C/D	B/C/D	B/C/D	C/D/E/V	D/E			
33	A/B/C	A/B/C	B/C/D	B/C/D	C/D	D/E				
47	A/B/C	A/B/C/D	B/C/D	C/D/E	D/E	D/E				
68	B/C/D	B/C/D	B/C/D/E/V	D/E	D/E	E				
100	A/B/C/D	B/C/D/E	B/C/D/E/V	D/E/V	D/E					
120	D	D	E							
150	B/C/D	C/D/E	C/D/E	D/E						
220	B/C/D/E	C/D/E	D/E/V	E						
330	D/E	D/E	D/E							
470	D/E	D/E	E							
680	D/E	E								
1000	E	E								

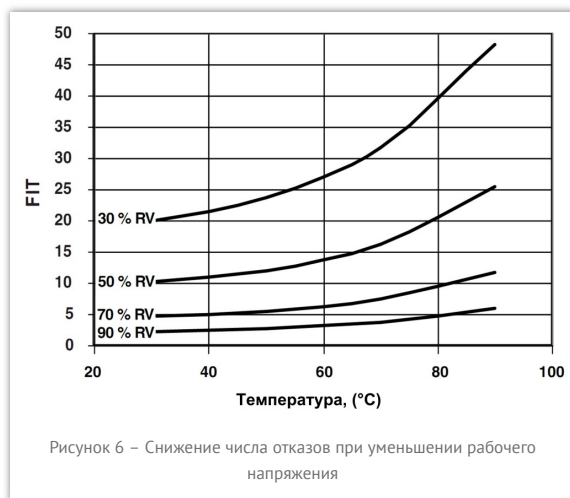
**Номинальное напряжение («Rated Voltage»).** Современные твердотельные танталовые конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения до 75 В (таблица 3). Следует отметить, одну особенность данного параметра: для нормального функционирования в составе различных устройств, танталовые конденсаторы должны использоваться при напряжениях меньших, чем номинальное [4].

Это правило появилось в 50-е годы, и было связано с особенностями военной приемки танталовых конденсаторов, и установленными тогда же процедурами определения надежности. Эти стандартные испытания подразумевали определение надежности с выдержкой конденсаторов при номинальном напряжении в течение 1000 часов, температуре 85°C и токоограничительном резисторе менее 3 Ом. Приемка «М» подразумевает, что количество отказов за 1000 часов не превышает 1%. Как военные, так и коммерческие компоненты разрабатывались с учетом требований этого стандарта.

Эти условия остаются промышленным стандартом до сих пор, но современные низкоимпедансные схемы (с минимальным ограничительным сопротивлением) требуют более высокой надежности, чем обеспечивает приемка «М».

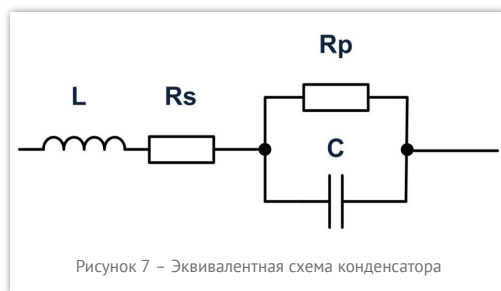
Так как в последнее время стали доступны данные по числу отказов (в основном данные о военной электронике), то стало возможным проведение фактических расчетов и создания нового стандарта Mil-Std-217, который учитывает требования всех типов конденсаторов.

Исследования показали, что для повышения надежности необходимо снижать рабочее напряжение. Снижение рабочего напряжения до 50% от номинального напряжения RV («Rated Voltage»), приводит к снижению показателя отказов FIT («Failures In Time») до 5% (рисунок 6).

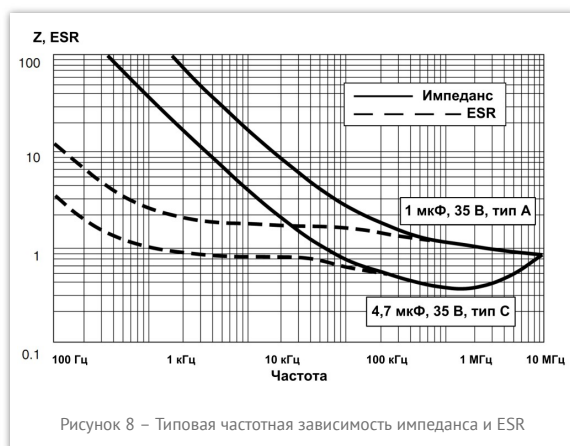


**Полное сопротивление алюминиевого электролитического конденсатора (импеданс).** Как известно, эквивалентная схема замещения конденсатора (рисунок 7) кроме емкостной составляющей содержит ряд дополнительных элементов:

- индуктивную составляющую (L), которая учитывает индуктивность выводов;
- параллельное сопротивление ( $R_p$ ), которое позволяет учесть ток утечки через диэлектрик и поверхностные токи утечки;
- последовательное эквивалентное сопротивление («Equivalent Series Resistance», ESR).



Полное сопротивление схемы имеет сложную частотную зависимость (рисунок 8). Главной особенностью этой зависимости является тот факт, что с ростом частоты импеданс уменьшается вплоть до мегагерцового диапазона. Это позволяет использовать танталовые конденсаторы в современных источниках питания, работающих на частотах от 100 кГц и выше.



**Эквивалентное последовательное сопротивление («Equivalent Series Resistance», ESR).** При работе на переменном напряжении конденсатор обладает последовательным сопротивлением. На низких частотах это сопротивление

определяется сопротивлением диэлектрика (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). На высоких частотах начинает преобладать сопротивление электролита (MnO<sub>2</sub>). Типовая частотная зависимость определяет уменьшение ESR с ростом частоты вплоть до мегагерцового диапазона (рисунок 8).

Так как сопротивление диоксида марганца обратно пропорционально температуре, то ESR твердотельного танталового конденсатора на высоких частотах уменьшается с ростом температуры.

**Максимальная рассеиваемая мощность («Power dissipation»).** Когда к твердотельному танталовому конденсатору приложено переменное напряжение, наличие последовательного сопротивления приводит к выделению тепла, согласно формуле:

$$P = I^2 ESR, (2)$$

Допустимое повышение температуры конденсатора за счет выделяемой мощности определяется экспериментально. Например, значение перегрева в 20°C является максимальным для стандартных танталовых чип-конденсаторов. В свою очередь этот перегрев определяет и максимальную выделяемую мощность (таблица 4).

Таблица 4 – Максимальная рассеиваемая мощность конденсаторов [серии 293D](#)

Типоразмер	Максимальная рассеиваемая мощность (25°C). Вт
A	0.075
B	0.085
C	0.11
D	0.15
E	0.165
V	0.125

Ознакомившись с конструкцией, механизмами пробоя и основными параметрами танталовых конденсаторов, можно определить основные ограничения, накладываемые на рабочие уровни токов и напряжений.

## Определение безопасных рабочих напряжений

При эксплуатации конденсаторов необходимо выбирать рабочие напряжения с учетом целого ряда особенностей [2,3].

**1. Работа конденсаторов при напряжениях выше номинального не допускается.** Работа конденсатора на повышенных напряжениях снижает срок его службы (рисунок 6). В документации на конкретные серии часто приводятся рекомендуемые значения для уровней напряжения (таблица 5). Эти значения представляют собой компромисс между надежностью (потенциальным сроком службы) и необходимым напряжением питания

Таблица 5 – Рекомендуемые значения рабочих напряжений для серии 293D (Vishay)

Номинальное напряжение, В	Рекомендуемое рабочее напряжение (стандартные условия, например выходной фильтр), В	Рекомендуемое рабочее напряжение (тяжелые условия, например входной фильтр), В
4.0	2.5	2.5
6.3	3.6	3.3
10	6.0	5.0
16	10	8.0
20	12	10
25	15	12
35	24	15
50	28	24
63	36	31
75	42	37

\* – для температуры окружающей среды ниже +85°C

**2. Суммарное напряжение постоянной и переменной составляющих напряжения не должны превышать номинальное напряжение.**

**3. Максимально допустимое среднеквадратичное напряжение определяется с учетом наличия постоянной составляющей.**

Если постоянное смещение больше половины предельного напряжения ( $V_{bias} > 0.5 \cdot V_{pp}$ ), то допустимое среднеквадратичное напряжение вычисляется по формуле:

$$V_{rms} = (V_{pp} - V_{bias}) / \sqrt{2}, (3)$$

Если  $V_{bias} < 0.5 \cdot V_{pp}$ , то

$$V_{rms} = V_{bias} / \sqrt{2}, (4)$$

Как видно из таблицы 5, оптимальная составляющая равна примерно половине номинального напряжения. В этом случае  $V_{bias} = 0.5 \cdot V_{pp}$  и формулы (3) и (4) примут вид:

$$V_{rms} = V_{pp} / 2\sqrt{2}, (5)$$

Не сложно рассчитать значения допустимого среднеквадратичного напряжения для этого случая (таблица 6).

Таблица 6 – Максимальное среднеквадратичное напряжение танталовых конденсаторов

Номинальное напряжение, В	$V_{rms} \text{ max, В}$
4	1.42
10	5.30
20	7.07
25	8.84
35	12.37
40	14.14
50	17.68

**4. Не допускается прикладывать к твердотельным танталовым конденсаторам обратного напряжения [1,4].** Согласно документации танталовые конденсаторы способны выдерживать броски обратного напряжения амплитудой до 10% от номинального напряжения при температуре +25°C, и 5% от номинального напряжения при температуре +85°C. Однако приложение обратного напряжения крайне не рекомендуется.

## Определение безопасных уровней токов на низких частотах

Для определения максимально допустимого значения среднеквадратичного тока необходимо разделить значение  $V_{rms}$  на значение импеданса на заданной частоте:

$$I_{rms} = V_{rms} / Z, (6)$$

Значение импеданса может быть определено графически (рисунок 8), взято из документации, либо рассчитано как:

$$Z = \sqrt{X^2 + ESR^2}, (7)$$

где

$$X = 1/C\omega + L\omega, (8)$$

Так как значение индуктивной составляющей (L) составляет всего несколько нГн, то индуктивная составляющая в формуле (8) начинает сказываться на значении импеданса только на частотах в несколько МГц. Для фильтрации сигналов в диапазоне 100 кГц и ниже, индуктивной составляющей импеданса можно пренебречь:

$$Z = \sqrt{(1/C\omega)^2 + (DF/C\omega)^2} = (1/C\omega)\sqrt{1 + DF^2}, (9)$$

При значениях тангенса угла потерь  $DF < 10\%$ , его вклад в значение импеданса не превышает 1%, и им можно пренебречь. В результате формула для определения импеданса принимает вид

$$Z = 1/C\omega = 1/2\pi fC, (10)$$



Из формулы (10) видно, что наибольшее значение импеданса получится при наименьших значениях емкости, поэтому **в расчетах необходимо использовать минимальное значение емкости с учетом точности номинала.**

Рассмотрим частный случай: частота 120 Гц, постоянная составляющая равна половине номинального напряжения ( = 0.5·Vpp). С учетом формул (5), (6) и (10), можно получить расчетную формулу для максимального среднеквадратичного тока, выраженного в миллиамперах:

$$I_{rms} = 0.266 \cdot C \cdot V_{pp}, \quad (11)$$

где – максимально допустимое среднеквадратичное значение тока (мА); C – минимальная емкость конденсатора с учетом точности (мкФ); Vpp – максимальное значение напряжения (В).

## Определение безопасных уровней токов на высоких частотах

На частотах от 10 КГц до нескольких сотен кГц, значение тока ограничивается в первую очередь значением допустимой рассеиваемой мощности. Следующая формула позволяет рассчитать максимально допустимое среднеквадратичное значение переменного тока:

$$I_{rms} = \sqrt{P_{max}/ESR}, \quad (12)$$

где Pmax – максимальная мощность, которую может рассеивать конденсатор; ESR – максимальное значение эквивалентного последовательного сопротивления на заданной частоте.

Как было указано выше значение максимальной рассеиваемой мощности определяется производителем экспериментально. Типовые значения находятся в документации на компоненты (таблица 4).

Максимальное значение ESR, как правило, приводится в документации в графической форме (рисунок 8), либо в виде значений для конкретных частот.

## Учет влияния различных факторов на максимальное значение среднеквадратичного тока

Формула (12) применима при воздействии синусоидального напряжения высокой частоты при температуре +25°C. Очевидно, что если форма сигнала отлична от синусоидального, или температура среды отличается от +25°C, то необходимо дополнительно корректировать рассчитанные значения.

1. В случае несинусоидального сигнала, результат расчета по формуле (9) следует дополнительно разделить на коэффициент заполнения («duty cycle»).
2. Если температура выше +25°C, результат дополнительно необходимо умножить на корректирующий коэффициент (таблица 7).

Таблица 7 – Корректирующие множители для различных температур

Температура, °C	Корректирующий множитель
+25	1.0
+85	0.9
+125	0.4

Зависимость корректирующего множителя в документации приводится, как правило, в виде графика и дополнительно учитывает необходимость снижения тока при различных уровнях рабочего напряжения (рисунок 9).

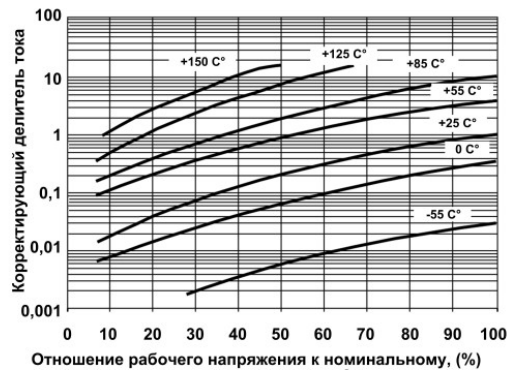


Рисунок 9 – Корректирование расчетных значений тока

## Пример расчета допустимых значений токов и напряжений

В качестве примера рассмотрим расчет предельных значений токов и напряжений для конденсатора [серии 293D](#) (Vishay): типоразмер В, 1 мкФ  $\pm 20\%$ , 35 В. Минимальное значение емкости с учетом погрешности 20%, составляет 0.8 мкФ.

Рассчитаем значения токов и напряжений для двух значений частоты: 120 Гц и 100 кГц.

### Расчет для частоты 120 Гц

Предельное значение  $V_{rms}$  может быть определено из формул (3), (4), (5) в зависимости от уровня постоянной составляющей приложенного напряжения. Если выбран частный случай с постоянным смещением равным половине номинального напряжения ( $V_{bias} = 0.5 \cdot V_{pp}$ ), то можно воспользоваться таблицей 6: для конденсаторов с номинальным напряжением 35 В, значение  $V_{rms}$  составляет 12.37 В.

Для определения значения максимального среднеквадратичного тока, необходимо определить значение импеданса (формула 10):

$$Z = 1/2\pi fC = 1/2\pi \cdot 120 \cdot (0.8 \cdot 10^{-6}) = 1.66 \text{ кОм}, (10)$$

Максимальный среднеквадратичный ток (формула 6):

$$I_{rms} = V_{rms}/Z = 12.37/1660 = 0.007 \text{ А}$$

Еще раз стоит напомнить, что в расчетах использовалось минимальное значение емкости с учетом точности номинала.

### Расчет для частоты 100 кГц

На высоких частотах основное ограничение на величину тока вносит допустимая рассеиваемая мощность. Максимальный среднеквадратичный ток может быть вычислен по формуле (12), зная значения  $P_{max}$  и ESR.

Значение допустимой рассеиваемой мощности для типоразмера В можно взять из таблицы 3:  $P_{max}$  (тип В) = 0.085 Вт.

Значение ESR выбирается одним из предложенных способов:

- При определении ESR по графику (рисунок 8). ESR = 1.5 Ом.
- При использовании табличного значения: ESR (+25 °C) = 5 Ом.

В расчетах необходимо использовать максимальное значение ESR. Подставляя найденные значения в формулу (12), получаем:

$$I_{rms} = \sqrt{P_{max}/ESR} = \sqrt{0.085/5} = 0.13 \text{ А}$$

Значение максимального среднеквадратичного напряжения можно определить из формулы (3). Значение импеданса определено по графику (рисунок 8).

$$V_{rms} = I_{rms} \cdot Z = 0.13 \cdot 3 = 0.39 \text{ В}$$

Помимо грамотного расчета рабочих режимов необходимо соблюдать требования хранения и технологию монтажа танталовых конденсаторов.

# Особенности проектирования печатных плат

Твердотельные танталовые конденсаторы не накладывают каких-либо специфических ограничений на материал печатной платы. Могут быть использованы все общепринятые материалы: FR4, FR5, G10, алюминиевые платы, фторопластовые (PTFE) платы.

Форма и размер контактных площадок, как правило, предоставляются производителями конденсаторов. Чертеж посадочного места сопровождается указанием способа монтажа.

Если требуется использовать форму или размеры площадок отличные от рекомендуемых, следует позаботиться об отладке процесса монтажа. Это может потребовать корректировки температурных режимов пайки.

## Особенности монтажа танталовых конденсаторов

**Нанесение паяльной пасты.** Рекомендованная толщина паяльной пасты составляет  $0.178 \pm 0.025$  мм. Не смотря на то, что особых требований к паяльной пасте не предъявляется, необходимо помнить, что флюс, используемый в пасте должен достаточно эффективно удалять окислы с контактных площадок, для эффективного растекания пасты и тепла при пайке. На практике этого добиваются подбором оптимального режима пайки. Обычно для улучшения удаления окислов стадию предпрогрева увеличивают [1].

**Установка и позиционирование конденсаторов.** Твердотельные танталовые чип-конденсаторы имеют общепринятую систему маркировки, которая включает обозначение емкости, номинального напряжения и полярности (рисунок 10). В случае корпусов типа В, С, D, E, У используется полная версия маркировки. В случае корпуса А используется сокращенная маркировка, в которой вместо значения напряжения приводится буквенный код. Маркировка может иметь дополнительные поля: код даты, индивидуальный код (логотип) производителя, дополнительная маркировка исполнения [1].



Установка конденсаторов стандартных типоразмеров на платы может производиться как вручную, так и с использованием автоматизированных систем. Особых ограничений на тип автоматизированного оборудования, как правило, не предъявляется.

**Пайка.** Пайка танталовых конденсаторов возможна практически любым из общепринятых способов: вручную, в конвекционных печах, в инфракрасных печах, пайка волной. Однако стоит понимать, что при необходимо придерживаться тех способов, которые позволяют придерживаться рекомендуемого температурного режима (рисунок 11, таблица 8). Рекомендуемый температурный режим пайки предполагает предпрогрев со скоростью нарастания температуры, не превышающей  $3^{\circ}\text{C}/\text{c}$  [1].

Можно отметить, что SnPb конденсаторы могут использовать температурные режимы, разработанные для (Pb)-free конденсаторов.

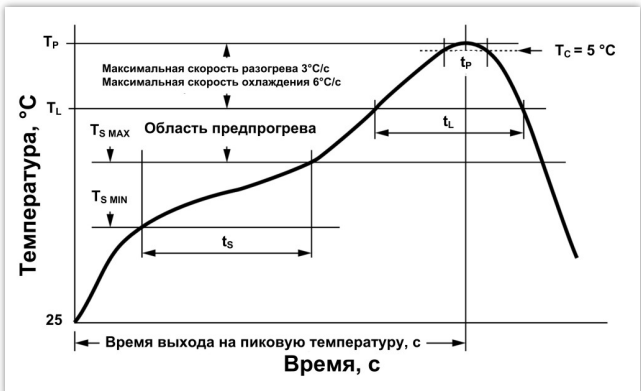


Таблица 8 – Параметры рекомендуемого режима пайки

Параметр	Значение	
	SnPb	LEAD (Pb)-FREE
Предпрогрев		
Минимальная Температура предпрогрева (Ts min), °C	100	150
Температура предпрогрева максимальная (Ts max), °C	150	200
Время перехода от Ts min до Ts max, с	от 60 до 120	
Прогрев		
Максимально допустимая скорость прогрева при переходе от TL до Tr, °C/с	3	
Температура ликвидуса (TL), °C	183	217
Время нахождения при температуре выше температуры ликвидуса (tL), с	от 60 до 150	
Пиковая температура (Tr), °C		
типоразмеры A, B, C, V	235	260
типоразмеры D, E, W	220	250
Время нахождения в температурном диапазоне от Tr до (Tr – 5) °C (tp), с	20	30
Максимально допустимое время выхода на пиковую температуру, мин	6	8
Охлаждение		
Скорость охлаждения при переходе от Tr до TL, °C/с	6	

Очистка плат после пайки. При очистке допустимо использовать практически все общеизвестные отмывочные средства (TES, TMS, Prelete, Chlorethane, Terpene). Исключение составляют отмывочные средства на базе дихлорметана (methylene chloride) и других веществ, способных растворять компаунды корпуса.

При использовании ультразвуковой чистки стоит помнить о том, что суть метода состоит в создании вибрации платы, что может привести к нарушению паяных соединений.

#### Особенности хранения танталовых конденсаторов

Твердотельные конденсаторы сохраняют свои характеристики в течение долгого времени, это связано с отсутствием явных механизмов старения. При строгом соблюдении условий хранения (температура не более 40°C, влажность 60%), длительность хранения этих конденсаторов ограничивается только ухудшением способности к пайке.

После 1999/2000 года произошло резкое снижение спроса на танталовые конденсаторы, что привело к образованию на складах излишков хранившихся более двух лет. По результатам исследований произведенных компанией Vishay, даже в случае длительности хранения превышающей 3 или 4 года, способность к качественной пайке конденсаторов Vishay сохранялась на великолепном уровне [4]. При этом тестовая пайка проводилась в соответствии с ANSI/J-002, MIL-STD-202, Method 208, которая подразумевает 8-часовое воздействие пара.

## Заключение

Твердотельные танталовые конденсаторы благодаря отличным электрическим и частотным характеристикам, а также малым размерам получают все более широкое распространение во всех областях электроники.

Одной из задач, которая стоит перед разработчиками и производителями, является увеличения срока службы и снижения количества отказов танталовых конденсаторов. Она решается на всех этапах жизни танталового конденсатора:

- соблюдением технологии изготовления на этапе производства;
- тщательным контролем готовых компонентов различными методами;
- выполнением требований условий хранения и монтажа;
- грамотным выбором безопасных режимов работы, определением оптимальных и допустимых уровней напряжений и токов;
- соблюдением требований эксплуатации (температурных, вибрационных и др.).

[Подберите нужный вам танталовый конденсатор по параметрам](#)  
[Проанализируйте надежность выбранного вами конденсатора](#)

*FIT (failures in time) — число отказов за время, миллиард часов*

*MTBF (mean time between failures) — средняя наработка до отказа, миллионов часов.*

## Дополнительные материалы

[Datasheet\\_293D series \(0.45 Мб\)](#)

[Application Note\\_AC Ripple Current Calculations Solid Tantalum Capacitors \(0.06 Мб\)](#)

[Technical Note\\_DC Leakage Failure Mode \(0.22 Мб\)](#)

[Frequently Asked Questions\\_Solid Tantalum Capacitors \(0.08 Мб\)](#)

[General Information\\_Date code marking molded chips \(0.07 Мб\)](#)

[Product Literature\\_Guide for Molded Tantalum Capacitors \(0.38 Мб\)](#)

[Product Literature\\_Typical Performance Characteristics Tantalum Capacitors \(0.09 Мб\)](#)

[Selector Guide\\_Capacitors - Surface-Mount Solid Tantalum Capacitors \(0.96 Мб\)](#)

• • •