

УДК 621.319.4

Б. И. Сибгатуллин, аспирант
В. К. Барсуков, кандидат технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТЕНДА ИМПУЛЬСНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Составлена математическая модель, описывающая переходные процессы, возникающие при импульсном тестировании. Проведен анализ влияния параметров стенда импульсного тестирования на результаты испытаний. Сформулированы выводы, поставлены задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: танталовый чип-конденсатор, испытания импульсным током, переходные процессы.

Производители конденсаторов при испытаниях пытаются воспроизвести наилучшие условия работы конденсаторов, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации электронных устройств. Таким образом, необходимо проводить испытания, при которых конденсатор подвергается заряду от источника напряжения с малым сопротивлением и разряду через цепь с малым сопротивлением. Такие испытания называются испытаниями импульсным током.

При сотрудничестве ИжГТУ с заводом «Элеконд» в рамках проекта «Организация высокотехнологического производства конденсаторов нового поколения» был разработан прибор для импульсного тестирования танталовых чип-конденсаторов ИТК-10 [1]. Однако результаты испытаний на приборе ИТК-10 и стоящей в линии на заводе «Элеконд» установке импульсного тестирования отличаются. Несмотря на это, прибор ИТК-10 разработан в строгом соответствии с требованиями стандартов на испытания конденсаторов импульсным током [2, 3]. С вышеописанной проблемой столкнулись и зарубежные производители танталовых конденсаторов. Это говорит о том, что существующая методология испытаний импульсным током требует значительной доработки. Стандарты на испытания недостаточно точно определяют методику и условия проведения испытаний. Как будет показано ниже, многие параметры проведения импульсного теста в стандартах не оговорены. У каждого производителя конденсаторов имеется свой набор условий для проведения импульсного теста, и поэтому результаты испытаний, проведенных в разных лабораториях на разных установках, могут существенно отличаться.

В настоящее время существуют два стандарта, регламентирующих условия и методику проведения импульсного тестирования танталовых конденсаторов: MIL-PRF-55365 и ESA/SCC № 3012.

Однако эти стандарты не рассматривают ряд важных вопросов, которые необходимы для проведения достоверных и воспроизводимых испытаний. В частности, они не определяют требования к допустимой индуктивности стенда для испытаний импульсным током, стандарт MIL-PRF-55365 не оговаривает тип ключа, используемый для переключения,

а стандарт ESA/SCC № 3012 предписывает использовать ртутное реле для переключения, что не является оптимальным решением с точки зрения устранения дребезга контактов.

Отдельного внимания заслуживает тот факт, что, согласно стандарту MIL-PRF-55365, импульсный тест не является обязательным при производстве конденсаторов, что, возможно, отражает степень неопределенности параметров этого теста. Эта неопределенность может быть вызвана неполным пониманием механизма отказов конденсаторов при протекании импульсного тока и недостатком информации о типах неисправностей, которые этот тест выявляет. Другая возможная причина может быть связана с невозможностью сравнения результатов испытаний, полученных в разных лабораториях. Следовательно, необходимо разработать более полную теорию, описывающую процессы, возникающие при испытаниях танталовых конденсаторов импульсным током.

Для анализа переходных процессов при импульсном тестировании составлена эквивалентная схема замещения с учетом индуктивностей элементов цепи. Испытываемый танталовый чип-конденсатор представлен простой $R-L-C$ -схемой замещения.

Для простоты расчета целесообразно рассмотреть отдельно цепи заряда и разряда. Упрощенная схема замещения цепи заряда представлена на рис. 1.

Здесь $L_{цз}$ – общая индуктивность соединительных проводов L_n , опорного резистора L_o и транзисторного ключа V_{TI} L_{VTI} :

$$L_{цз} = L_n + L_{VTI} + L_o. \quad (1)$$

$R_{цз}$ – общее сопротивление соединительных проводов R_n , опорного резистора R_o и транзисторного ключа V_{TI} R_{VTI} :

$$R_{цз} = R_n + R_{VTI} + R_o. \quad (2)$$

Для определения мгновенных значений токов и напряжений на зажимах конденсаторной батареи на испытываемом конденсаторе составлена система дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа для цепи после коммутации:

$$\begin{cases} (R_{\text{ИЗ}} + ESR) \cdot i_c(t) + (L_{\text{ИЗ}} + ESL) \cdot i_c'(t) + u_c(t) + \\ + R_{\text{буфф}}(t) \cdot i_{\text{буфф}}(t) + L_{\text{буфф}} \cdot i_{\text{буфф}}'(t) = u_{\text{буфф}}(t), \\ R_{\text{ун}} \cdot i_{\text{пс}}(t) + L_{\text{ун}} \cdot i_{\text{пс}}'(t) - L_{\text{буфф}} \cdot i_{\text{буфф}}'(t) - \\ - R_{\text{буфф}} \cdot i_{\text{буфф}}(t) + u_{\text{буфф}}(t) = E, \\ i_{\text{пс}}(t) + i_{\text{буфф}}(t) - i_c(t) = 0, \\ i_c(t) = C \cdot u_c'(t), \\ i_{\text{буфф}}(t) = -C_{\text{буфф}} \cdot u_{\text{буфф}}'(t), \end{cases} \quad (3)$$

где $i_c(t)$ – мгновенное значение тока через испытываемый конденсатор; $i_{\text{пс}}(t)$ – мгновенное значение тока через источник питания; $i_{\text{буфф}}(t)$ – мгновенное значение тока через батарею конденсаторов; $u_c(t)$ – мгновенное значение напряжения на испытываемом конденсаторе; $u_{\text{буфф}}(t)$ – мгновенное значение напряжения на зажимах конденсаторной батареи.

Для решения системы дифференциальных уравнений необходимо обладать соответствующим набором начальных условий для каждой неизвестной функции. При коммутации ключа SA на схеме на рис. 1 начальные условия для системы уравнений (3) будут следующими:

$$\begin{cases} i_c(0) = 0, \\ i_{\text{пс}}(0) = 0, \\ i_{\text{буфф}}(0) = 0, \\ u_c(0) = 0, \\ u_{\text{буфф}}(0) = E. \end{cases} \quad (4)$$

Система дифференциальных уравнений решена в среде Mathcad с помощью блока Given-Odesolve. Для демонстрации примера расчета приняты следующие параметры стенда:

$$\begin{aligned} R_{\text{ИЗ}} &:= 0.6 \text{ Ом} & C_{\text{буфф}} &:= 6.8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} & C_{\text{буфф}} &:= 0.5 \text{ Ф} & E &:= 50 \text{ В} \\ L_{\text{ИЗ}} &:= 200 \cdot 10^{-9} \text{ Гн} & ESR &:= 0.1 \text{ Ом} & R_{\text{буфф}} &:= 0.02 \text{ Ом} & R_{\text{ИИ}} &:= 2 \text{ Ом} \\ ESL &:= 10 \cdot 10^{-9} \text{ Гн} & L_{\text{буфф}} &:= 200 \cdot 10^{-9} \text{ Гн} & L_{\text{ИИ}} &:= 1000 \cdot 10^{-9} \text{ Гн} \end{aligned} \quad (5)$$

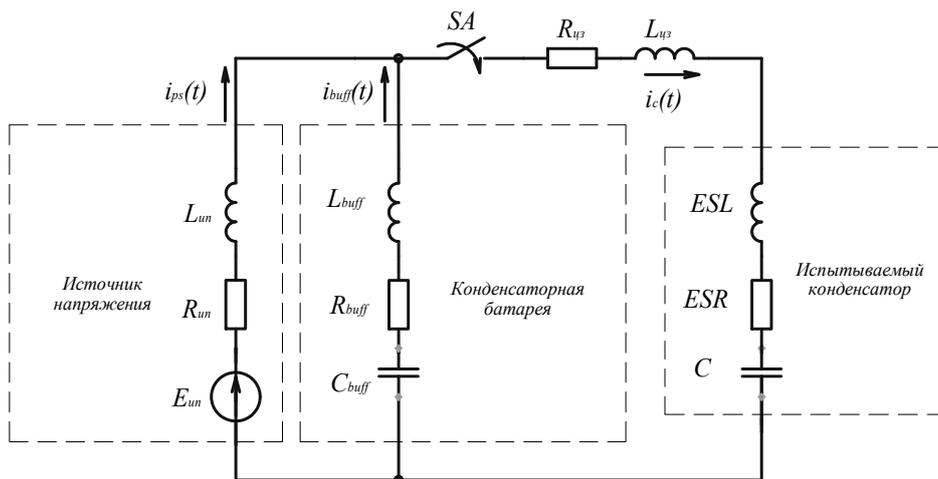


Рис. 1. Упрощенная схема замещения цепи заряда

Результаты расчета приведены на рис. 2.

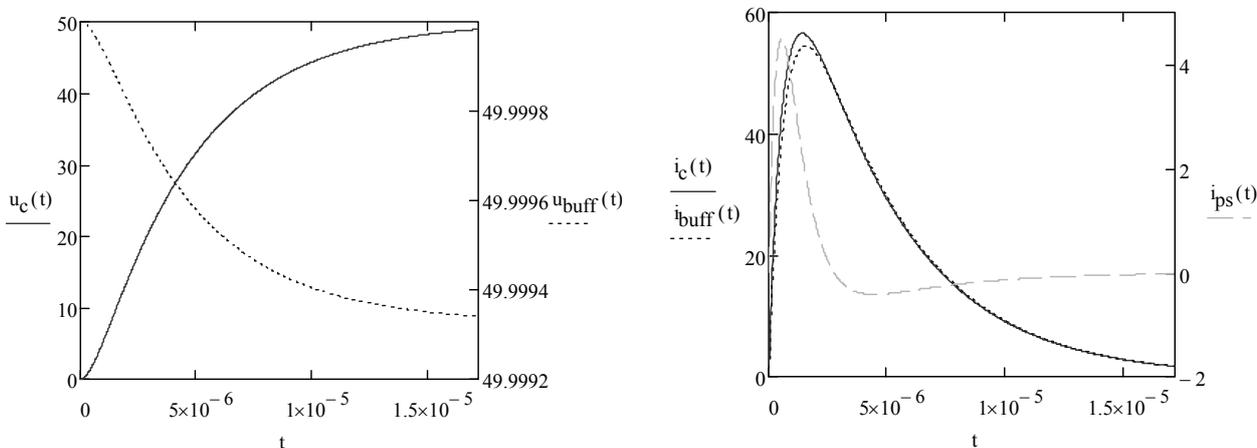


Рис. 2. Расчетные зависимости $i_c(t), i_{\text{пс}}(t), i_{\text{буфф}}(t), u_c(t), u_{\text{буфф}}(t)$

Упрощенная схема замещения цепи разряда представлена на рис. 3.

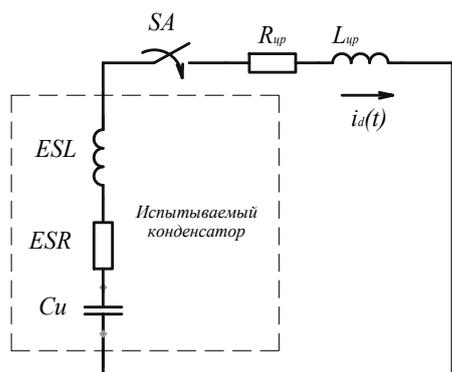


Рис. 3. Упрощенная схема замещения цепи разряда

Здесь $L_{цр}$ – общая индуктивность соединительных проводов, опорного резистора и транзисторного ключа VT2:

$$L_{цр} = L_{п} + L_{VT2} + L_{о}, \quad (6)$$

где $R_{цр}$ – общее сопротивление соединительных проводов, опорного резистора и транзисторного ключа VT2:

$$R_{цр} = R_{п} + R_{VT2} + R_{о}. \quad (7)$$

Разброс параметров индуктивности и сопротивления канала в открытом состоянии у транзисторов VT1 и VT2 несущественен, поэтому можно положить $L_{VT1} = L_{VT2}$ и $R_{VT1} = R_{VT2}$, а следовательно, $L_{цз} = L_{цр}$ и $R_{цз} = R_{цр}$.

Электрическое состояние цепи после коммутации описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\begin{cases} (L_{цр} + ESL) \cdot C \cdot \frac{d^2 u_d(t)}{dt^2} + (R_{цр} + ESR) \cdot C \cdot \frac{du_d(t)}{dt} + u_d(t) = 0, \\ i_d(t) = -C \cdot \frac{du_d(t)}{dt}. \end{cases} \quad (8)$$

Начальные условия при этом будут определяться так:

$$\begin{cases} u_d(0) = E, \\ \frac{du_d(0)}{dt} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Дифференциальное уравнение решено в среде Mathcad. Результаты решения представлены на рис. 4. Параметры цепи соответствуют (5).

На переходный процесс заряда оказывают влияние внутренние сопротивления и индуктивности батареи конденсаторов и источника питания, в то время как на процесс разряда эти параметры не оказывают влияние. Для сравнения зарядных и разрядных токов через конденсатор их удобнее представить на одном графике (рис. 5).

Как видно из рис. 5, амплитуда импульса разрядного тока незначительно превышает амплитуду за-

рядного. Это происходит в результате того, что на разряд испытываемого конденсатора не оказывают влияние сопротивления и индуктивности конденсаторной батареи и источника питания.

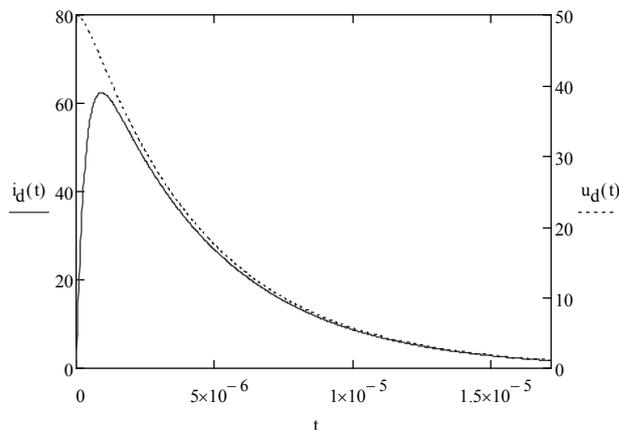


Рис. 4. Расчетные зависимости $i_d(t)$, $u_d(t)$

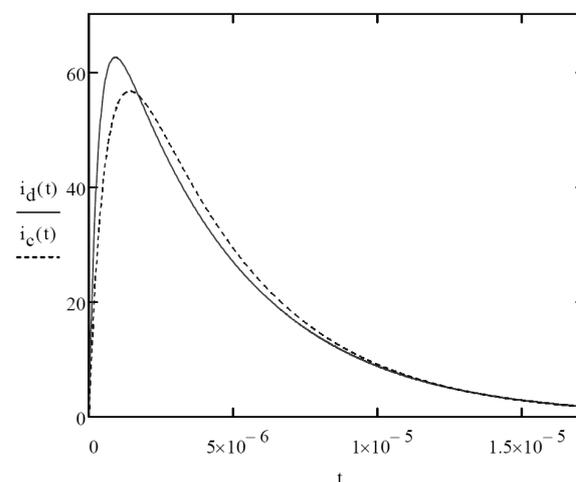


Рис. 5. Расчетные зависимости $i_c(t)$, $i_d(t)$

Полученная математическая модель позволяет оценить влияние параметров (5) на мгновенные значения токов и напряжений на зажимах конденсаторной батареи и испытываемого конденсатора. Однако точное определение параметров (5) затруднено с метрологической точки зрения. Для анализа некоторых вопросов удобнее пользоваться моделью коммутации последовательно включенных элементов R-L-C на постоянное напряжение E , приведенной на рис. 6.

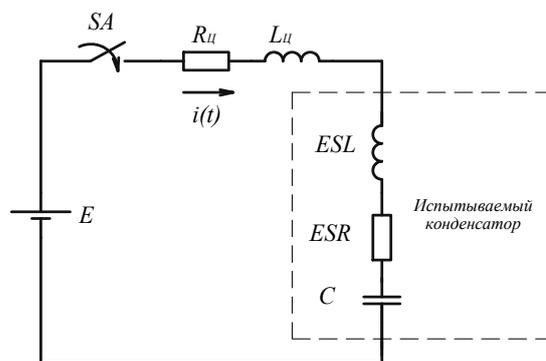


Рис. 6. Упрощенная модель испытаний

Переходный процесс при замыкании ключа SA будет описываться дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\begin{cases} (L_{\Pi} + ESL) \cdot C \cdot \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + (R_{\Pi} + ESR) \cdot C \cdot \frac{du(t)}{dt} + u(t) = E, \\ i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}, \end{cases} \quad (10)$$

где $L_{\Pi} = L_{\text{цз}} + L_{\text{buff}}$, $R_{\Pi} = R_{\text{цз}} + R_{\text{buff}}$.

Начальные условия будут следующими:

$$\begin{cases} u(0) = 0, \\ \frac{du(0)}{dt} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Для сравнения результатов расчетов, полученных для схемы на рис. 1 и для схемы на рис. 6, удобно представить значения $i(t)$, $u(t)$, $i_c(t)$ и $u_c(t)$ на одном графике (рис. 7).

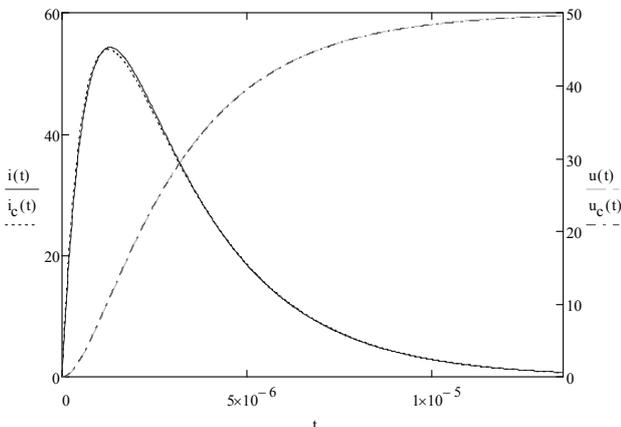


Рис. 7. Сравнение результатов расчета, полученных для схемы на рис. 1 ($i_c(t)$, $u_c(t)$) и для схемы на рис. 6 ($i(t)$, $u(t)$)

Из рис. 7 видно, что при $R_{\text{buff}} \ll R_{\text{ин}}$ и $C_{\text{buff}} \gg C$ источник питания оказывает незначительное влияние на переходный процесс, и в ряде случаев им можно пренебречь и использовать для анализа упрощенную модель на рис. 6.

Оценка влияния индуктивности цепей заряда и разряда на характер переходного процесса при импульсном тестировании конденсаторов. Используя упрощенную математическую модель $R-L-C$, можно рассчитать переходные процессы для различных L_c при определенных параметрах стенда. Аналогичный расчет был выполнен в работе [4].

На рис. 8 приведены результаты расчета при следующих параметрах. Параметры испытываемого конденсатора: $C=1$ мкФ, $ESR=0,1$ Ом, $ESL=10$ нГн. Внутреннее сопротивление стенда $R_c=0,5$ Ом.

Из анализа результатов на рис. 8 видно, что увеличение индуктивности оказывает на переходные процессы следующее влияние:

1. Уменьшается амплитуда импульса тока I_n .
2. Замедляется нарастание фронта импульса тока и увеличивается время переходного процесса.

3. Увеличивается вероятность возникновения перенапряжений на испытываемом конденсаторе. При достаточно большой индуктивности цепи переходный процесс будет колебательным, что приводит к превышению напряжения на испытываемом конденсаторе выше номинального. Эти перенапряжения могут достигать значительных величин. Для рассматриваемого случая амплитуда напряжения увеличивается более чем на 25 % при индуктивности цепи $L_c \sim 700$ нГн. В работе [5] экспериментально были получены перенапряжения более 70 %.

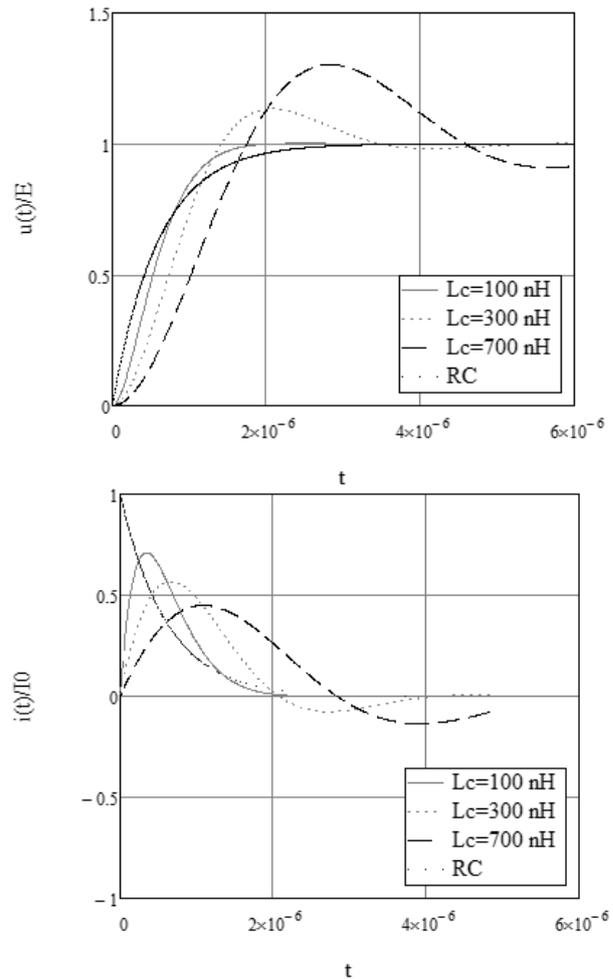


Рис. 8. Результаты расчета переходных процессов при различных индуктивностях цепи

Уменьшение амплитуды импульса тока I_n происходит одновременно с увеличением $\tau_{\text{сп}}$, так что общая энергия, рассеиваемая в конденсаторе, остается постоянной. Однако мгновенное нарастание тока может приводить к локальным адиабатическим перегревам, что приводит к разрушению электродов и диэлектрика и выходу конденсатора из строя. Вполне вероятно, что при импульсах тока с более низкой амплитудой, но с большей длительностью эти условия не будут достигнуты. Влияние изменения формы импульса тока при изменении индуктивности стенда на результаты импульсного теста требует дальнейших исследований. Однако перенапряжения могут значительно увеличивать вероятность выхода из

стройка конденсаторов при испытаниях импульсным током. В любом случае, испытания на различных установках импульсного теста дают разный процент выхода из строя конденсаторов из-за того, что не учитывается влияние индуктивности стенда на результаты испытаний.

На практике, в цепях с низким сопротивлением с достаточной индуктивностью для возникновения колебательного переходного процесса, вполне вероятно возникновение перенапряжений на конденсаторах в моменты коммутации или при работе в импульсном режиме из-за индуктивности цепи. По этой причине целесообразно оценить способность конденсатора выдерживать короткие перенапряжения в микросекундном диапазоне [6]. Для этого необходимо разработать соответствующую методику испытаний, которая будет отличаться от существующих испытаний импульсным током.

Чтобы избежать возникновения колебательных процессов и перенапряжений при импульсном тестировании, параметры элементов схемы должны удовлетворять определенным условиям. Пользуясь упрощенной моделью испытаний (рис. 6), можно вывести критическое значение индуктивности L_{ck} , при котором возникает колебательный переходный процесс [7]. Характеристическое уравнение для цепи рис. 4 после коммутации будет иметь вид:

$$Z(p) = C(L_{ck} + ESL)p^2 + (R_c + ESR)p + 1. \quad (12)$$

Для того чтобы переходный процесс был аperiодическим, корни характеристического уравнения (13) должны быть действительными, а следовательно, дискриминант уравнения (13) был положительным числом:

$$(R_c + ESR)^2 - 4C(L_{ck} + ESL) \geq 0. \quad (13)$$

Из соотношения (14) можно вывести L_{ck} :

$$L_{ck} \leq \frac{C(R_c + ESR)^2}{4} - ESL. \quad (14)$$

На рис. 9 представлен график зависимости L_{ck} от сопротивления цепи R_c при различных емкостях испытываемых конденсаторов.

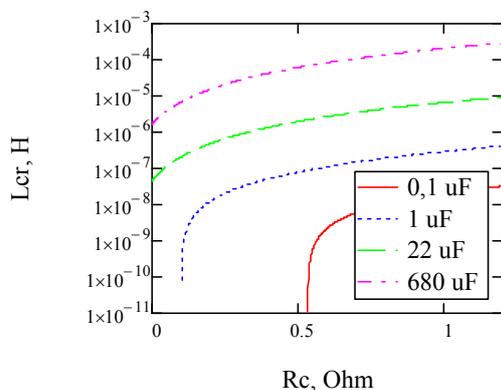


Рис. 9. Зависимость критической индуктивности стенда от сопротивления

Из рис. 9 видно, что при определенных значениях сопротивления стенда для испытаний физически невозможно добиться аperiодического переходного процесса. Например, при испытаниях конденсаторов емкостью 0,1 мкФ и сопротивлении стенда < 0,5 Ом колебательный процесс может возникнуть вследствие собственной индуктивности испытываемых конденсаторов. Более того, даже при максимально разрешенном стандартом MIL-PRF-55365 сопротивлении цепи 1,2 Ом выполнение условия (14) может являться весьма трудной задачей. При испытаниях конденсаторов емкостью 0,1 мкФ и сопротивлении стенда 1,2 Ом индуктивность цепи должна быть ниже 35 нГн.

Оценка влияния сопротивления цепей заряда и разряда на характер переходного процесса при импульсном тестировании конденсаторов. Вопрос влияния внутреннего сопротивления цепи R_c на надежность работы танталовых конденсаторов рассматривался в работах [8] и [9]. В [10] было выдвинуто предположение, что выход из строя танталовых конденсаторов при работе в импульсном режиме в цепях с низким сопротивлением происходит не столько от протекания через конденсаторы импульсных токов большой амплитуды, сколько от величины тока, который может протекать через конденсатор после его пробоя. Обоснованием этой гипотезы является то, что танталовые конденсаторы способны самовосстанавливаться после частичных пробоев [11]. После пробоя конденсатора ток через него ограничен сопротивлением цепи. При низких значениях сопротивления цепи через пробившийся конденсатор протекает достаточно большой ток, что приводит к его сильному разогреву. В таких условиях процессы самовосстановления не происходят. Если эта гипотеза верна, процент выхода из строя конденсаторов при импульсном тестировании, проводимом после испытаний на безотказность, должен быть ниже. В [12] экспериментально вывели зависимость напряжения пробоя конденсаторов от сопротивления цепи R_c :

$$U_n = \alpha \cdot R_c^\beta, \quad (15)$$

где $\beta \sim 0,2$. Интересно здесь отметить результаты моделирования переходных процессов при импульсном тестировании, приведенных в работе [13]. Зависимость перенапряжений на испытываемом конденсаторе при колебательном переходном процессе от сопротивления цепи можно аппроксимировать степенным законом [14].

Используя упрощенную математическую модель $R-L-C$, можно рассчитать переходные процессы при разном сопротивлении стенда. Пример расчета для испытываемого конденсатора емкостью $C = 6,8$ мкФ с внутренним сопротивлением $ESR = 0,1$ Ом, индуктивностью $ESL = 10$ нГн при индуктивности стенда $L_c = 400$ нГн представлен на рис. 10.

Рис. 10. Переходный процесс при сопротивлении стенда 0,5 и 1,2 Ом

Изменение сопротивления стенда в допустимых по стандарту MIL-PRF-55365 пределах приводит к значительным изменениям амплитуды импульса тока и скорости нарастания напряжения на испытываемом конденсаторе. В результате этого условия испытаний на разных стендах будут различными, а следовательно, результаты таких испытаний невоспроизводимы.

Стандарты MIL-PRF-55365 и ESA/SCC № 3012 определяют сопротивление цепи R_c как сумму сопротивления по постоянному току элементов цепи и внутреннего сопротивления источника питания, что создает неясность, т. к. сопротивление зависит от частоты, а частота не определена. Предполагается, что сопротивление источника питания определяется сопротивлением конденсаторной батареи. Чтобы избежать неопределенности, целесообразно заменить формулировку «выходное сопротивление стабилизированного источника питания» в стандартах на «ЭПС конденсаторной батареи».

Как было показано в работе [15], изменения сопротивления цепи R_c в допустимых пределах согласно стандарту MIL-PRF-55365 от 0 до 1,2 Ом значительно изменяют уровень перенапряжений на конденсаторе, а также форму и амплитуду токов через испытываемый конденсатор. Эти изменения также влияют на величину энергии Q , выделяемую в конденсаторе.

С другой стороны, величина энергии, выделяемая в конденсаторе, не зависит от индуктивности цепи, поэтому для упрощения расчетов целесообразно пренебречь индуктивностью элементов и использовать R - C -модель. Для цепи с внутренним сопротивлением R_c энергия, выделяемая в течение импульсного тестирования в испытываемом конденсаторе с сопротивлением ESR , может быть выражена следующим образом:

$$Q = \int_0^{\infty} i^2(t) \cdot ESR \cdot dt = \frac{U^2 \cdot ESR}{(R_c + (ESR))^2} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{2 \cdot t}{\tau}\right) \cdot dt \quad (16)$$

Интегрирование выражения (16) дает:

$$Q = \frac{ESR}{R_c + ESR} \cdot \frac{C \cdot U^2}{2} = \alpha \cdot \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{ESR}{R_c + ESR}, \quad (18)$$

где α – коэффициент, определяющий долю энергии, рассеиваемой в конденсаторе. Зависимость $\alpha(R_c)$ при сопротивлении конденсатора $ESR = 0,1$ Ом представлена на рис. 11.

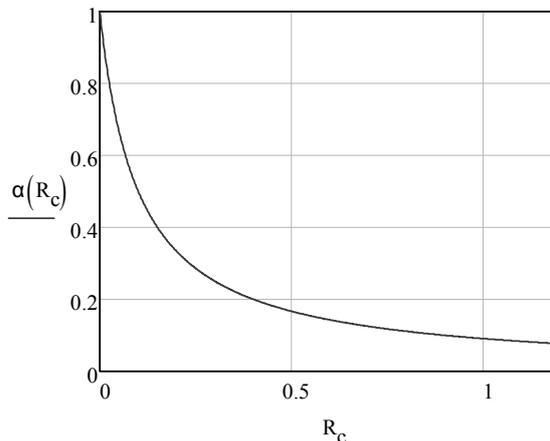


Рис. 11. Зависимость $\alpha(R_c)$

Если предположить сопротивление конденсатора $ESR = 0,1$ Ом, α изменится от 100 % при $R_c = 0$ до 7 % при $R_c = 1,2$ Ом. Очевидно, испытания на установках с различными R_c приведут к различным результатам вследствие разного количества энергии, выделяемой в конденсаторах при испытаниях. По этой причине допустимое сопротивление цепи R_c должно быть определено в более узком диапазоне, например от 0,5 до 1 Ом. При этих условиях α будет изменяться в меньшем диапазоне, от 17 до 9 %. Также определение минимально допустимого значения R_c значительно уменьшит возможность возникновения перенапряжений на испытываемых конденсаторах вследствие смягчения требований к максимально допустимой индуктивности цепи [16].

Оценка влияния емкости испытываемых конденсаторов на характер переходного процесса при импульсном тестировании конденсаторов. Если рассматривать цепь стенда для испытаний без учета индуктивностей, амплитуда импульса тока не зависит от емкости испытываемого конденсатора и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи. Перенапряжения на конденсаторе при этом не возникают. Однако R - C - L -модель предсказывает зависимость амплитуды импульса тока и перенапряжений от емкости.

В работе [17] было показано, что результаты импульсного теста, проведенные при одних и тех же условиях для конденсаторов с одинаковым номинальным напряжением, зависят от значения емкости испытываемого конденсатора. Конденсаторы большей емкости будут испытывать меньшие перенапряжения но большие импульсы тока по сравнению

с конденсаторами меньшей емкости. Это значит, что механизмы отказов и вероятность пробоя зависят от емкости испытываемого конденсатора. Например, конденсаторы малой емкости могут выходить из строя преимущественно из-за электрического пробоя пентоксида тантала, в то время как отказы конденсаторов большой емкости более вероятно обусловлены локальными перегревами слоя диоксида марганца или механическими напряжениями оксидного слоя в результате действия электромагнитных сил.

С другой стороны, на переходный процесс при испытаниях будет оказывать влияние разброс емкостей испытываемых конденсаторов. Результаты расчета переходных процессов при испытаниях конденсаторов емкостью $C = 6,8$ мкФ с внутренним сопротивлением $ESR = 0,1$ Ом, индуктивностью $ESL = 10$ нГн при индуктивности стенда $L_c = 400$ нГн, сопротивлении стенда $R_c = 0,6$ Ом и допуске на номинальную емкость $\Delta C = \pm 10\%$ представлены на рис. 12.

Рис. 12. Результаты расчета переходных процессов при $C \pm \Delta C$

Изменение амплитуды импульса тока при этом составляет $\Delta I_n \approx 3,6\%$.

Выводы

1. Существующие стандарты недостаточно точно определяют требования к характеристикам стенда для испытаний конденсаторов импульсным током. Это приводит к тому, что результаты испытаний, проведенных на разных установках, будут различны. Иными словами, результаты испытаний конденсаторов импульсным током на сегодняшний день не верифицируемы. Проблема может быть решена более точным определением требований к характеристикам стенда для испытаний.

2. При анализе переходных процессов, возникающих при импульсном тестировании конденсаторов, нельзя пренебрегать индуктивностью элементов схемы. По приближенным оценкам, индуктивность стенда может варьироваться в пределах $\sim 150\text{--}1500$ нГн.

3. Полученная математическая модель позволяет рассчитать переходные процессы в схеме импульсного теста и оценить влияние параметров схемы на результаты теста.

4. В результате влияния индуктивности стенда переходный процесс становится более затянутым, амплитуда тока уменьшается, а при определенных значениях индуктивности переходный процесс становится колебательным, что приводит к появлению перенапряжений на испытываемых конденсаторах. Необходимо ограничить максимально допустимое значение индуктивности стенда импульсного тестирования. Из анализа простой $R\text{-}L\text{-}C$ -модели испытаний можно определить критическую индуктивность стенда для испытаний, при которой возникает колебательный переходный процесс. С другой стороны, при аperiodическом переходном процессе индуктивность оказывает влияние на длительность переходного процесса, что может изменить условия испытаний. Особенно сильно это влияние проявляется при испытаниях конденсаторов малой емкости. Требуются дополнительные исследования влияния скорости нарастания тока и длительности переходного процесса на результаты испытаний.

5. С увеличением сопротивления стенда значения перенапряжений на испытываемом конденсаторе уменьшаются. Кроме того, смягчаются требования к максимально допустимой индуктивности стенда. Сопротивление стенда оказывает влияние на величину энергии, выделяемой в конденсаторе при испытаниях. С другой стороны, от сопротивления стенда зависит значение критической индуктивности стенда, при котором возникает колебательный переходный процесс. Стандарты определяют только верхний допустимый порог сопротивления стенда. Чтобы создать равные условия испытаний конденсаторов на разных стендах, необходимо ввести нижний порог допустимого сопротивления стенда.

6. Вследствие наличия индуктивности в цепи стенда емкость испытываемых конденсаторов оказывает влияние на амплитуду импульса тока и перенапряжения. Для малых емкостей характерно возникновение перенапряжений, для больших емкостей – протекание импульсов тока большой амплитуды. Это приводит к тому, что механизмы отказов конденсаторов малой и большой емкости различны. Кроме того, на переходный процесс оказывает влияние отклонение емкости испытываемых конденсаторов в пределах допуска.

Библиографические ссылки

1. Соломин А. В. Разработка стенда для тестирования танталовых чип-конденсаторов импульсным током : дис. ... магистра. – Ижевск, 2013. – 73 с.
2. ESA/SCC Generic Specification № 3012.
3. MIL-PRF-55365G, 2008.
4. Teverovsky A. Effect of inductance and requirements for surge current testing of tantalum capacitors // CARTS-CONFERENCE-. – COMPONENTS TECHNOLOGY INSTITUTE INC., 2006. – Т. 26. – С. 363.
5. Holland H. W. Effects of High Current Transients on Solid Tantalum Capacitors // Electronic Equipment News (March, 1976) pp. – 1976. – С. 20–21.
6. Teverovsky A. Op. cit.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М. : Высш. шк., 1996. – 623 с. : ил.

8. *Holland H. W.* Op. cit.
9. *Reed E. K. and Paulsen J. L.* Impact of circuit resistance on the breakdown voltage of tantalum chip capacitors, in Proceedings of the CARTS, 2001. P. 150–156.
10. Ibid.
11. *Gill J.* Surge in solid tantalum capacitors // AVX (July, 1994). – 1995.
12. *Reed E. K. and Paulsen J. L.* Op. cit.
13. *Teverovsky A.* Op. cit.
14. Ibid.
15. Ibid.
16. Ibid.
17. Ibid.

* * *

B. I. Sibgatullin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. K. Barsukov, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Influence of parameters of pulse testing stand on results of testing

The mathematical model describing the transient processes arising in pulse testing is developed. Influence of parameters of pulse testing stand on testing results is analyzed. Conclusions are made, tasks of further investigations are assigned.

Keywords: tantalum chip condenser, pulse current testing, transient processes.

Получено: 24.10.14