

Расчет конденсаторов шины питания мощных преобразовательных устройств

Одними из значимых элементов схемы и конструкции импульсного преобразователя являются конденсаторы шины питания. Неграмотный выбор ЭК и неправильный расчет режимов его работы может заметно снизить надежность аппаратуры и стать причиной неожиданных отказов. Компания RIFA предлагает методику расчета конденсаторов, позволяющую не только оценить мощность потерь в конкретных условиях эксплуатации, но и достаточно точно спрогнозировать срок их службы.

Андрей Колпаков

andrey.kolpakov@semikron.com

Особенностям топологии и конструкции преобразователей высокой мощности посвящено достаточно много литературы (см., например, [3, 4]). Технология выполнения соединений имеет решающее значение в устройствах, коммутирующих с высокими скоростями тока в десятки, сотни и даже тысячи ампер. Именно такие режимы работы характерны для современных мощных импульсных устройств, использующих в качестве силовых ключей транзисторы MOSFET или IGBT. Неправильно выполненная топология шин, высокое значение распределенных паразитных индуктивностей проводников приводит к появлению импульсных перенапряжений, что подчас является причиной отказа силовых полупроводников. Распределенные параметры шин достаточно сложно поддаются расчету или измерению, серьезной проблемой является анализ уровня переходных перенапряжений, особенно в предельных режимах, таких, как режим аварийного отключения транзисторов при коротком замыкании нагрузки.

Не менее значимыми элементами схемы и конструкции импульсного преобразователя являются конденсаторы шины питания. Как правило, мы не особо задумываемся о расчете режимов при вы-

боре электролитических конденсаторов (ЭК) для маломощных схем. Такая «невнимательность» совершенно недопустима при расчете конденсаторов силовой шины питания. Неграмотный выбор ЭК и неправильный расчет режимов его работы может заметно снизить надежность аппаратуры и стать причиной неожиданных отказов.

Как правило, производители ЭК в технической документации приводят минимальный набор параметров: предельное напряжение, допустимый ток пульсаций при заданной частоте, тангенс угла потерь, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), эквивалентная последовательная индуктивность (ESL). В спецификациях более «продвинутых» изготовителей ЭК можно найти таблицу поправочных коэффициентов для тока пульсаций и показатели надежности. Например, конденсаторы NU3/HU4 фирмы Hitachi имеют ресурс свыше 600 тыс. часов при номинальном токе пульсаций и температуре 50 °С. Этот же параметр не превышает 4 тыс. часов при предельной температуре. Однако при расчете схемы разработчику хотелось бы знать, сколько конкретно прослужат емкости при заданных рабочих режимах. Это необходимо и для определения минимального номинала ЭК, поскольку современные высоковольтные конденсаторы вносят значительный вклад в стоимость изделия и имеют существенные габариты.

Одним из мировых лидеров в производстве конденсаторов различного назначения, фирмой RIFA, разработана методика расчета, позволяющая не только оценить мощность потерь конденсаторов в конкретных условиях эксплуатации, но и достаточно точно спрогнозировать срок их службы. Подобный расчет может оказать неоценимую помощь разработчику силовой электронной техники.

Потери в ЭК

Суммарные потери проще всего оценить, зная ток утечки I_l , среднеквадратичное (RMS) значение переменного тока I , текущего через конденсатор, и значения эквивалентных сопротивлений ЭК.



Рис. 1. Инвертор для ветрогенератора фирмы SEMIKRON. На рисунке видны силовые модули SKiP IGBT и многослойные шины питания с установленными на них конденсаторами

Общее омическое сопротивление R состоит из сопротивления металла и электролита.

Диэлектрические потери пропорциональны энергии, запасенной в конденсаторе: $W_C = CU^2/2$. Мощность P_1 , рассеиваемая в ЭК, может быть записана следующим образом:

$$P_1 = f \times W_C + R \times I^2 \quad (1)$$

где f — частота перезаряда конденсатора.

Условимся, что ток через ЭК имеет синусоидальную форму. В этом случае потери будут составлять:

$$P_1 = f \times C \times U^2/2 + R \times I^2 \quad (2)$$

Поскольку $I = \omega \times C \times U$, а $\omega = 2\pi \times f$, то

$$P_1 = U \times I(1/4\pi + 2\pi \times R \times C \times f) = U \times I(A + B \times f) \quad (3)$$

Смножитель $(A + B \times f)$ представляет собой известный всем $\cos \phi$. Однако пользоваться углом ϕ неудобно, так как обычно он близок к 90° , поэтому при расчетах ЭК применяют угол $\delta = 90 - \phi$, называемый углом потерь. Таким образом, $\tan \delta = \sin(90 - \phi)/\cos(90 - \phi) \cong \sin(90 - \phi)$ так как $\cos(90 - \phi) \cong 1$. Формула приобретает простой и понятный вид:

$$P_1 = U \times I \times \tan \delta \quad (4)$$

Ошибка, возникающая из-за принятой аппроксимации, несущественна для расчетов потерь ЭК, а измерение $\tan \delta$ намного проще, чем $\cos \phi$. Этот параметр называется тангенсом угла потерь и приводится в данных на ЭК.

Подставляя в (2) $U = I/(\omega \times C)$, получаем:

$$P_1 = I^2(R + k/(4\pi^2 \times f \times C)) \quad (5)$$

Таким образом можно определить R_S или ESR — эквивалентное последовательное сопротивление, значение которого также приводится в технических характеристиках (по крайней мере у серьезных производителей).

$$R_S = R + k/(4\pi^2 \times f \times C) \quad (6)$$

Как видно из уравнения (6), параметр R_S является частотно зависимым. Примерный вид графика зависимости R_S от частоты приведен на рис. 2. Это несколько затрудняет расчет потерь. Кроме того, если ток имеет сложный спектральный состав, необходимо знать

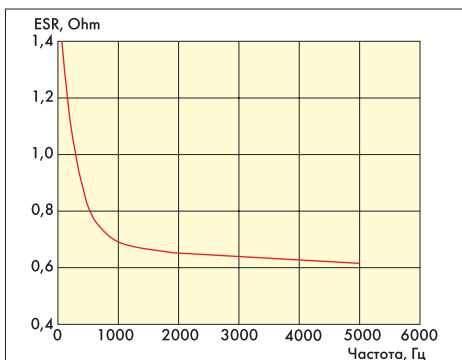


Рис. 2. Зависимость ESR от частоты

величину каждой гармоники. Однако, если низшие гармоники достаточно велики и частотно зависимый компонент мал по сравнению с омическим сопротивлением, расчет становится простым. Обычно на частотах свыше 500 Гц R_S практически не зависит от частоты.

$$P_1 = I^2 \times R_S \quad (\text{при } f > 500 \text{ Гц}) \quad (7)$$

Температура перегрева ЭК зависит от R_S и среднеквадратичного значения переменного тока I . Назовем температуру в наиболее горячей точке конденсатора (точке перегрева) T_{hs} , а температуру окружающей среды — T_a . В рабочем диапазоне перегрев является линейной функцией мощности потерь P . Тогда справедливо следующее соотношение:

$$T_{hs} = T_a + R_{th} \times P \quad (8)$$

где R_{th} — тепловое сопротивление «точка перегрева — окружающая среда». Некоторые дополнительные потери P_L создает и ток утечки I_L :

$$P_L = I_L \times U_{op} \quad (9)$$

Однако данными потерями, как правило, можно пренебречь, особенно в соотношении с мощностью, рассеиваемой как самими конденсаторами, так и балластными резисторами при последовательном соединении конденсаторов.

Срок службы и надежность

Два основных параметра, влияющих на ресурс и надежность ЭК, — это рабочее напряжение и температура. Для срока службы L_{op} можно записать соотношение:

$$L_{op} = L_{opR}(U_R/U_{op})^n \quad (10)$$

где U_{op} — рабочее напряжение, U_R — предельно допустимое напряжение, L_{opR} — срок службы ЭК при напряжении U_R .

Показатель степени $n = 5$ при $0,8U_R < U < U_R$; $n = 3$ при $0,5U_R < U < 0,8U_R$. Это означает, что снижение рабочего напряжения на 21% увеличивает срок службы вдвое. Если $U < 0,5 U_R$, срок службы практически не зависит от напряжения.

Срок службы имеет экспоненциальную температурную зависимость. График зависимости может быть описан выражением:

$$\ln(L_{op}) = A - B \times T \quad (11)$$

Надежность ЭК оказывается тем выше, чем выше его диаметр. Формула, учитывающая диаметр, имеет следующий вид:

$$L_{opR} = f(D) \times 2^{(85-T_{hs})/12} \quad (12)$$

(Для конденсаторов, рассчитанных на 105° вместо 85° в показателе степени должно быть 105).

Значение $f(D)$ для некоторых значений диаметра ЭК стандартной конструкции приведено ниже:

Диаметр (мм)	$f(D)$
35	30000
50	35000
65	45000
75	60000

L_{op} определяется, как время, в течение которого параметры ЭК находятся в пределах определенных допусков. У каждой фирмы-производителя значения допусков свои. RIFA так определяет предельное состояние ЭК:

- Изменение емкости более 15%.
- Увеличение $\tan \delta$ более чем в 1,3 раза.
- Увеличение ESR более чем в 2 раза.

Когда большое количество ЭК (назовем его N_0) испытывается при заданных условиях, то через определенное время некоторые параметры ЭК подойдут к своему предельному значению. Количество ЭК, сохраняющих свои параметры в пределах допусков, — $R(t)$ будет со временем становиться все меньше в соответствии с выражением:

$$R(t) = N_0 \times e^{-\lambda t} \quad (13)$$

где λ — частота отказов.

Вероятность отказа $F(t)$ можно определить как:

$$F(t) = 1 - S(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (14)$$

где $S(t)$ — вероятность, что 1 конденсатор прослужит время t .

Можно также определить зависимость срока службы L_{op} от вероятности отказа следующим образом:

$$L_{op} = 1/\lambda \times \ln(1/(1 - F)) = m \times \ln(1/(1 - F)) \quad (15)$$

где m — среднее время между отказами.

L_{op} и λ экспоненциально зависят от температуры: λ возрастает, а L_{op} — снижается.

Упрощенное выражение для выгядит следующим образом:

$$\lambda = 2,5 \times 10^{-7} \times 2^{(T_{hs}-85)/8} \quad (16)$$

Для 105° конденсаторов в показателе степени надо заменить 85 на 105.

Тепловая модель электролитического конденсатора

Токи перезаряда конденсатора вызывают потери на его омическом сопротивлении. Потери также создаются за счет тока утечки и изменения напряжения на диэлектрике. Эти потери проявляются в повышении температуры ЭК — ΔT , пропорциональном мощности потерь P .

$$\Delta T = R_{th} \times P \quad (17)$$

где R_{th} — тепловое сопротивление конденсатора.

Наиболее нагретая точка ЭК имеет температуру T_{hs} . Обычно эта точка расположена в геометрическом центре ЭК. Тепло распространяется во все стороны через электролит, фольгу, выводы, корпус и т. д. Обозначим

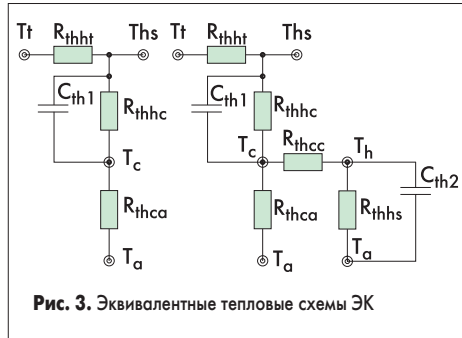


Рис. 3. Эквивалентные тепловые схемы ЭК

R_{thhc} — тепловое сопротивление «точка паяльника — корпус», а R_{thca} — тепловое сопротивление «корпус — окружающая среда». Если ЭК установлен на теплосток, появляется тепловое сопротивление «корпус — теплоотвод» R_{thcc} , зависящее от размера, формы теплоотвода и способа охлаждения.

На тепловые режимы при импульсном характере работы влияние оказывает также тепловая емкость конденсатора C_{th} , которая зависит от массы и материала ЭК. В модели ЭК такую емкость можно было бы установить параллельно каждому сопротивлению. Однако емкостью, параллельной R_{thca} , можно пренебречь из-за низкой теплоемкости воздуха.

На рис. 3 приведены эквивалентные тепловые схемы для случая естественного охлаждения (слева) и установки ЭК на радиатор (справа). T_t — температура выводов конденсатора. Температура корпуса T_c измеряется в точке, противоположной выводам.

В таблице 1, приведенной ниже, приведены тепловые характеристики (при естественном охлаждении) некоторых типоразмеров ЭК фирмы RIFA.

Таблица 1. Тепловые сопротивления и тепловые емкости ЭК RIFA

Размер корпуса	R_{thhc} , °C/Вт	R_{thca} , °C/Вт	C_{th} , Дж/°C
A/35 × 51	0,8	9,8	68
B/35 × 60	0,8	9,0	81
C/35 × 75	1,0	8,2	101
D/35 × 95	1,3	7,6	127
H/50 × 75	0,6	5,7	205
J/50 × 95	0,6	5,2	260
K/50 × 105	0,7	5,1	287
O/65 × 105	0,4	3,8	486
R/65 × 145	0,7	3,5	671
L/75 × 78	0,5	3,6	482
T/75 × 105	0,4	3,3	647
U/75 × 115	0,5	3,2	708
V/75 × 145	0,7	3,0	893
X/75 × 220	0,5	2,9	1351
M/90 × 78	0,5	2,9	692
N/90 × 98	0,5	2,6	868
Y/90 × 145	0,4	2,3	1283

Приведенные цифры являются основными данными для расчета нагрева ЭК, в какой бы схеме он не работал. К сожалению, в каталогах большинства фирм-производителей (и в отечественных ТУ тоже) тепловые характеристики конденсаторов не приводятся.

Параллельное и последовательное соединение ЭК

Соединение ЭК используется для повышения емкости, увеличения допустимого напряжения или тока пульсаций и не вызывает,

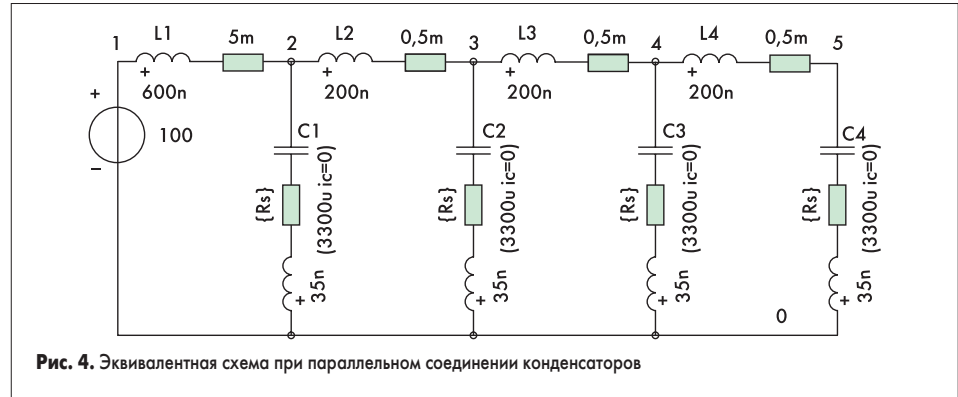


Рис. 4. Эквивалентная схема при параллельном соединении конденсаторов

на первый взгляд, никаких проблем. Однако проблемы существуют и связаны они в первую очередь с возникновением переходных помех при включении из-за паразитной индуктивности соединительных проводов.

На рис. 4 показано параллельное соединение 4 конденсаторов $C1...C4$ емкостью по 3300 мкФ.

В схему включены сопротивления и индуктивности подводящих проводов, паразитные индуктивности ЭК и сопротивления R_s (ESR). Эпюры напряжений в точке 5 схемы (см. рис. 5) даны для двух значений температуры — 20 и 85 °C. Разница в переходном напряжении (135 В для 20 °C и 165 В для 85 °C) объясняется тем, что R_s изменяет свое значение от 22 мОм при 20 °C до 7 мОм при 85 °C. Величина перенапряжения зависит и от номинала конденсатора. Интересно, что пик напряжения практически не зависит от величины нагрузки. Это объясняется тем, что импеданс схемы очень низок по сравнению с нагрузкой. Следует отметить, что в реальных схемах, как правило, используется режим «плавного» заряда, что необходимо для ограничения зарядного тока конденсаторов. В этом случае перенапряжения при включении не наблюдается.

Последовательное соединение ЭК используется для высоковольтных схем. При этом часто приходится включать конденсаторы последовательно — параллельно для получения необходимой величины емкости.

Анализ переходных искажений в комбинированной схеме производится аналогично описанному выше. Следует учесть паразитные параметры проводов между последовательно соединенными конденсаторами. Стоит по-

мнить и про разброс номиналов конденсаторов, который может привести к значительным перенапряжениям на некоторых из них.

Особенностью последовательного соединения ЭК является то, что параллельно каждому ЭК необходимо установить балластный резистор для устранения перекоса напряжения из-за разности токов утечки конденсаторов. Номиналы уравнивающих резисторов можно рассчитать по формуле:

$$R = 1000 / (0,015C) \quad (17)$$

где C — емкость в мкФ, R — сопротивление в кОм.

Формула 17 выведена на основании известного соотношения для тока утечки $I_L = k \times C \times U_R$, где константа $k = 3 \times 10^{-3}$. Ток резистора I_R должен быть значительно больше тока утечки ЭК, который имеет разброс и зависит от условий эксплуатации. Обычно ток балластного резистора превышает номинальное значение тока утечки ЭК в 10...20 раз. Часто оказывается, что правильно рассчитанный уравнивающий резистор рассеивает довольно большую мощность и с этим приходится мириться.

На ЭК присутствует также переменное напряжение пульсаций. Резисторы обеспечивают уравнивание для постоянного тока и низких частот. На частотах порядка сотен герц и выше коэффициент деления напряжения определяется только соотношением емкостей.

Причины отказов ЭК

Основная причина деградации и выхода из строя ЭК — диффузия электролита через

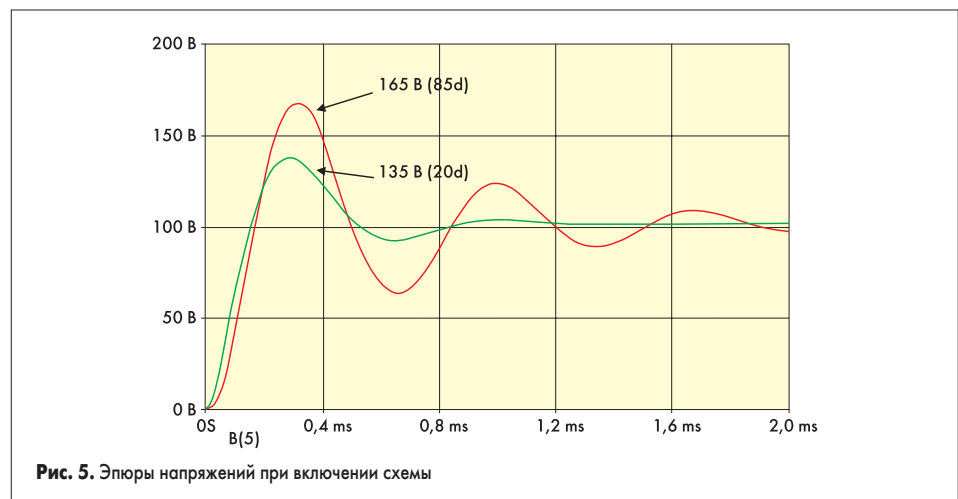


Рис. 5. Эпюры напряжений при включении схемы

изолятор. Этот процесс ускоряется с ростом температуры и в основном определяет срок службы конденсатора.

Ниже некоторые причины, способные привести к преждевременному отказу ЭК:

- Переохлаждение (обычно ниже $-30\text{ }^\circ\text{C}$). Приводит к резкому росту ESR и падению емкости.
- Перегрев (повышенная температура окружающей среды или превышение допустимого тока пульсаций). Приводит к росту ESR и тока утечки, падению емкости.
- Превышение рабочего напряжения. Приводит к росту ESR и падению емкости.
- Переходные перенапряжения. Могут привести к повышению тока утечки и внутреннему короткому замыканию ЭК.
- Воздействие высоких частот. Может привести к изменению емкости и ESR.
- Обратное напряжение. Может привести к повышению тока утечки, потере емкости, увеличению ESR, сокращению срока службы.
- Механические вибрации. Приводят к внутреннему короткому замыканию, увеличению тока утечки, потере емкости.

Выбор и расчет ЭК

Среднеквадратичное значение тока пульсаций I_{RMS}

Этот наиболее важный параметр, который приходится оценивать при анализе практически любой схемы, в состав которой входят ЭК. Именно значение I_{RMS} определяет в основном потери в ЭК. Поэтому ведущие производители конденсаторов приводят в своих технических данных предельное значение I_{RMS} , а не допустимую амплитуду напряжения пульсаций, как это принято в наших ТУ.

Рассмотрим для примера работу двухполупериодного выпрямителя, схема которого приведена на рис. 6. Первичное напряжение — 50 Гц, 220 В. Сопротивление нагрузки — 80 Ом, емкость конденсатора — 500 мкФ.

На рис. 7 показаны токи конденсатора — импульсный I_{cpp} и среднеквадратичный I_{rmsc} (вверху), напряжение на конденсаторе и выходное напряжение выпрямительного моста при отсутствии сглаживания (внизу). Предположим, что потерь в схеме нет. Заряд конденсатора начинается, когда выпрямленное напряжение превышает напряжение на ЭК. Разряд идет практически линейно. Пусть

t_1 — время начала заряда, t_2 — время начала разряда, t_3 — время начала следующего периода заряда, то есть $t_3 = t_1 + T$.

$$U = 310 \times \sin(\omega \times t) = 310 \times \sin(2\pi \times 50 \times t)$$

$$t_1 = 32,8 \text{ мс}, t_2 = 35 \text{ мс}, t_3 = 42,8 \text{ мс}$$

(310 В — амплитуда входного напряжения).

Пиковый ток конденсатора I_{cpp} (момент времени t_1):

$$I_{cpp} = C \times dU/dt = 500 \times 10^{-6} \times 310 \times (2\pi \times 50) \times \cos(2\pi \times 50 \times 32,8 \times 10^{-3}) = 28 \text{ А}$$

Ток разряда I_d определяется из соотношения:

$$I_d \times (t_3 - t_2) = I_{cpp} \times (t_2 - t_1) \times 0,5$$

$$I_d = 0,5 \times 28 \times (35 - 32,8) / (42,8 - 35) = 3,6 \text{ А}$$

Ток заряда ЭК имеет треугольную форму. Его среднеквадратичное значение I_{rms} :

$$I_{rms} = I_{cpp} \sqrt{\frac{t_2 - t_1}{3T}} = 28 \sqrt{\frac{35 - 32,8}{3 \times 10}} = 8,5 \text{ А}$$

Среднеквадратичное значение тока разряда I_{rmsd} :

$$I_{rmsd} = I_d \sqrt{\frac{t_3 - t_2}{T}} = 3,6 \sqrt{\frac{42,8 - 35}{10}} = 3,9 \text{ А}$$

Общее среднеквадратичное значение тока:

$$I_{rmsc} = \sqrt{I_{rms}^2 + I_{rmsd}^2} = \sqrt{8,5^2 + 3,9^2} = 9,3$$

При выборе номинала конденсатора мы должны учитывать не только требования, предъявляемые к схеме, в которой он установлен, но и требования, предъявляемые к режимам работы самого ЭК. Причем последние, как правило, оказываются строже. Необходимо также учитывать разброс номиналов, временные изменения параметров и помнить о том, что ЭК должен оставаться в пределах заданных допусков в течение всего срока службы.

Обычно расчет номинала ЭК включает следующие действия:

- выбирается номинал конденсатора, обеспечивающий необходимую мощность нагрузки или заданное минимальное выпрямленное напряжение;
- найденное значение корректируется с учетом разброса номинала, временного и температурного изменения номинала;

- из каталога выбирается ближайшее минимальное значение номинала конденсатора;
- рассчитывается среднеквадратичное значение тока пульсаций для нового конденсатора, определяется температура нагрева ЭК и срок его службы.

Рассмотрим для примера методику выбора ЭК для простейшей схемы двухполупериодного выпрямителя, приведенной на рис. 6. Для упрощения расчета предположим, что диоды и сглаживающая емкость идеальные и схема не содержит паразитных сопротивлений. ЭК заряжается до амплитудного значения питающего напряжения, равного примерно 310 В. Форма напряжения на конденсаторе и токи через него приведены на эпюрах рис. 7. Для выбора номинала ЭК прежде всего необходимо знать параметры нагрузки. Иногда вместо сопротивления нагрузки задается потребляемая мощность P . Сопротивление нагрузки в этом случае можно определить из соотношения $R = U^2/P$, где U — среднее значение выпрямленного напряжения.

Упрощенная методика расчета основана на положении, что падение напряжения на ЭК начинается на максимуме и происходит линейно, так как используется начальный участок экспоненты разряда.

Зададимся минимальным значением выпрямленного напряжения $U_{min} = 250 \text{ В}$, что соответствует мощности примерно 750 Вт на сопротивлении нагрузки 80 Ом. Минимальное напряжение U_{min} присутствует на ЭК в момент времени

$$t_3 = 1/\omega \times \arcsin(250/310) = 13 \times 10^{-3} \text{ с} \quad (18)$$

Максимум напряжения имеет место при $t_2 = 5 \times 10^{-3} + n \times T$, где $T = 10 \text{ мс}$ — период выпрямленного напряжения. Постоянная времени RC определяется по формуле:

$$RC = \frac{t_3 - t_2}{\ln \frac{U_{max}}{U_{min}}} = 35 \times 10^{-3} \quad (19)$$

Откуда $C = 437 \text{ мкФ}$.

Учитывая допуск (10%), мы должны соответственно увеличить номинал в 1,1 раза ($C = 480 \text{ мкФ}$).

Конденсатор должен быть рассчитан на постоянное напряжение 350 В и выше. RIFA приводит в своих характеристиках для таких конденсаторов так называемый фактор

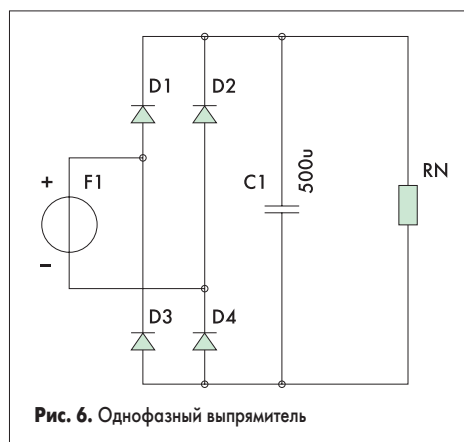


Рис. 6. Однофазный выпрямитель

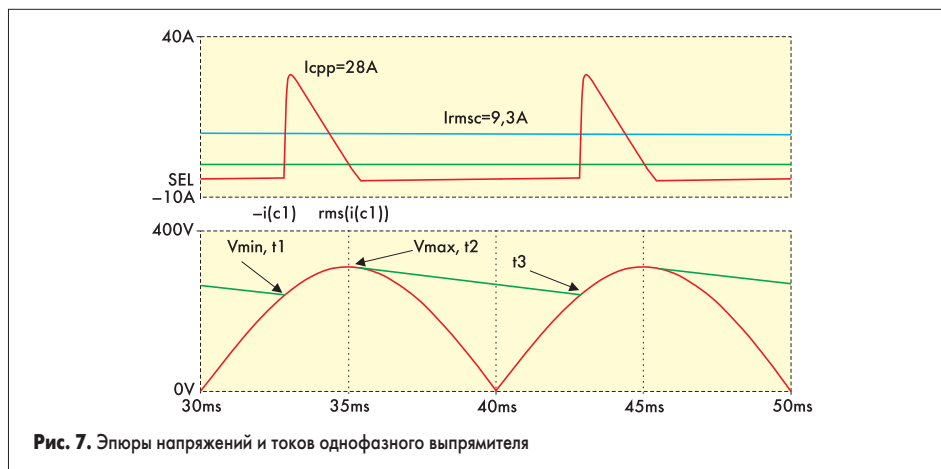


Рис. 7. Эпюры напряжений и токов однофазного выпрямителя

старения (aging factor) $\gamma = 1 - 0,1 = 0,9$. Коррекция значения емкости дает $C = 530$ мкФ.

Номинал ЭК необходимо также изменить с учетом уменьшения емкости при снижении температуры. Например, при -40°C температурный коэффициент $k_t = 0,94$. Следовательно, $C = 564$ мкФ. Таким образом, окончательное табличное значение номинала ЭК — 560 мкФ. Естественно, что минимальное выпрямленное напряжение при этом конденсаторе будет больше, чем 250 В.

Наконец мы приступаем к самому главному — к нахождению среднеквадратичного тока I_{RMS} . Он максимален при максимальном значении номинала ЭК, который будет у нового конденсатора C_{new} определяться допуском (+30%) и температурным коэффициентом (1,05 при 105°C).

$$C_{new} = 560 \times 1,3 \times 1,05 = 760 \text{ мкФ}$$

Используя формулы 18 и 19, определим новые значения t_3 и U_{min} : $t_3 = 13,5$ мс и $U_{min} = 270$ В. Исключив из t_3 значение периода (10 мс), получим $t_3 = 3,5$ мс.

Воспользуемся выражениями для I_{cpp} и I_d , приведенными выше, и найдем среднеквадратичные значения токов.

$$I_{cpp} = C \, dU/dt = 760 \times 10^{-6} \times 310 \times (2\pi \times 50) \times \cos(2\pi \times 50 \times 3,5 \times 10^{-3}) = 33 \text{ А}$$

$$I_d = 0,5 I_{cpp} \times (t_2 - t_1)/(t_3 - t_2) = 0,5 \times 50 \times (5 - 3,5)/(13,5 - 5) = 3 \text{ А}$$

$$I_{rms} = I_{cpp} \sqrt{\frac{t_2 - t_1}{3T}} = 33 \sqrt{\frac{5 - 3,5}{3 \times 10}} = 7,5 \text{ А}$$

$$I_{rmsd} = I_d \sqrt{\frac{t_3 - t_2}{T}} = 3 \sqrt{\frac{13,5 - 5}{10}} = 2,7 \text{ А}$$

$$I_{rmsc} = \sqrt{I_{rms}^2 + I_{rmsd}^2} = \sqrt{7,5^2 + 2,7^2} = 8 \text{ А}$$

Все приведенные выше формулы и расчеты предназначены, во-первых, для лучшего понимания, а во-вторых, для людей, которые умеют и любят считать.

Более простой и быстрый способ получения значения I_{rmsc} (и, соответственно, более подходящий для инженеров) — моделирование схемы на PSPICE. Нарисовав с помощью схемного редактора свою схему и задав соответствующие значения сопротивления нагрузки и сглаживающей емкости, вы можете мгновенно получить график среднеквадратичного значения тока конденсатора: RMS(Ic). Необходимо только учесть, что для быстрого получения установившегося значения среднеквадратичного тока следует задать соответствующее начальное напряжение на конденсаторе.

Однако мало найти среднеквадратичный ток через конденсатор, гораздо важнее выяснить, способен ли ЭК выдержать такой ток. Мы уже приводили значения тепловых сопротивлений для ЭК, имеющих различные размеры. В нашем случае (размер А35/51):

$$R_{th} = R_{thca} + R_{thhc} = 9,8 + 0,8 = 10,6^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

Температура ЭК определяется рассеиваемой мощностью, а она, в свою очередь, зависит от I_{rmsc} и ESR. Мы хотим, чтобы температура в самой нагретой точке ЭК составляла не более 105°C . Если мы продолжим расчеты, то увидим, что перегрев ЭК оказывается совершенно недопустимым. Это наглядный пример того, как номинал конденсатора, удовлетворяющий техническим требованиям, предъявляемым к схеме, оказывается совершенно непригодным с точки зрения параметров ЭК. Поэтому для снижения тока вместо одного конденсатора 560 мкФ мы включим параллельно два по 470 мкФ и снизим тем самым I_{rmsc} до 5 А.

$$ESR(105^\circ\text{C}, 100 \text{ Гц}) = 0,19 \text{ Ом}$$

Мощность, рассеиваемая в конденсаторе P_c и перегрев ΔT :

$$P_c = I_{rmsc}^2 \times ESR = 25 \times 0,19 = 4,7 \text{ Вт}$$

$$\Delta T = P_c \times R_{th} = 4,7 \times 10,6 = 50^\circ\text{C}$$

Значит, максимальная температура окружающей среды T_a должна быть не выше

$$T_{amax} = 105 - 50 = 55^\circ\text{C}$$

Предельное состояние конденсатора наступает, когда ESR возрастает более чем в 2 раза по сравнению с начальным значением. Предположим, что это случится, когда емкость ЭК будет иметь минимальное значение. В худшем случае конденсатор работает при предельной температуре. Тогда емкость C_{old} :

$$C_{old} = 0,9 \times 0,9 \times 1,05 \times 470 = 400 \text{ мкФ}$$

где $1,05$ — коэффициент коррекции емкости при высокой температуре.

$$\text{В этом случае } I_{rmsold} = 4,8 \text{ А}$$

$$\Delta T = P_c \times R_{th} = 4,8^2 \times (2 \times 0,19) \times 10,6 = 93^\circ\text{C}$$

$$T_{amax} = 105 - 93 = 12^\circ\text{C}$$

Значит, в конце срока службы температура окружающей среды не должна превышать 12°C . В противном случае срок службы ЭК будет много меньше паспортного значения. Таким образом, новый конденсатор может работать при $T_a = 55^\circ\text{C}$ и температура перегрева будет 105°C , а срок службы $L_{op} = 30000$ часов. Если при такой же температуре будет работать «старый» ЭК, его температура перегрева будет 148°C . Воспользовавшись формулой для срока службы, мы получим, что $L_{op} = 2500$ часов. ESR увеличивается со временем, что приводит к росту температуры ЭК и сокращению срока службы. Однако одновременное снижение емкости уменьшает I_{rmsc} , что несколько уравновешивает эффект от роста ESR.

Расчет L_{op} с учетом всех факторов чрезвычайно сложен, поэтому фирма **EVOX RIFA** предложила упрощенную методику с использованием графиков, отражающих основные зависимости параметров ЭК (см. рис. 8).

Пример: рассчитать для схемы однофазного выпрямителя минимальный срок службы ЭК с параметрами 470 мкФ, 400 В, 105°C , размером 35×50 , при условии, что температура окружающего воздуха — 40°C .

1. Из справочных данных берется ESR для 20°C и 100 Гц и пересчитывается с учетом частотного коэффициента k_f (рис. 8.4).

В нашем случае $k_f = 1$.

$ESR = 190$ мОм.

2. Рассчитывается среднеквадратичное значение тока пульсаций ($I_{rmsc} = 5$ А при установке двух ЭК в параллель), мощность потерь (4,7 Вт) и перегрев (50°C). Эти цифры уже были получены в данной главе. При расчете мощности в том случае, если используется принудительное охлаждение, необходимо исправить значение теплового сопротивления с учетом (рис. 8.3).

3. Найденное значение ESR изменяется с учетом температурного коэффициента k_t (рис. 8.5, кривая 2) при температуре перегрева для нового конденсатора $T_{hs} = T_a + \Delta T = 90^\circ\text{C}$, $k_t = 0,8 - ESR = 190 \times 0,8 = 152$ мОм. Теперь можно откорректировать значение температуры перегрева: $T_{hs} = T_a + \Delta T = 40^\circ\text{C} + P_c \times R_{th} = 40 + 25 \times 0,152 \times 10,6 = 80^\circ\text{C}$

4. По (рис. 8.6) определяется срок службы L_{op} при температуре $T_{hs} = 80^\circ\text{C} - L_{op} \approx 15000$.

5. Уточняется значение срока службы с учетом коэффициента нагрузки по напряжению $k_u = 310/400 = 0,78$ по формуле (10) при $n = 5 - L_{op} = 15000/(0,78)^5 = 50000$.

Заключение

Отметим, что электролитические конденсаторы долгое время не имели альтернативы для применения в силовых преобразователях благодаря высокой удельной емкости. В последнее время ситуация изменяется благодаря созданию принципиально новых технологий производства конденсаторов MPP, SMKP и MKP. Данные технологии были разработаны в компании ELECTRONICON Kondensatoren — одном из ведущих европейских предприятий, изготавливающих конденсаторы для силовых применений.

Конденсаторы MKP содержат металлизированные с двух сторон бумажные электроды с полипропиленовым диэлектриком, пропитанные маслом. Этот тип емкостей имеет низкое значение эквивалентной последовательной индуктивности (ESL), он специально разработан для использования в силовых шинах питания. Конденсаторы рассчитаны на работу при напряжении до 1300 В и имеют максимальную емкость 1500 мкФ. По сравнению с обычными ЭК с алюминиевой фольгой, SMKP способны работать при гораздо большем значении тока пульсаций. Основой почти всех конденсаторов ELECTRONICON является так называемый самовосстанавливающийся диэлектрик. На месте электрического пробоя в течение нескольких микросекунд испаряется слой металла и удаляется из центра пробоя. В результате образуется свободная от металла изолированная

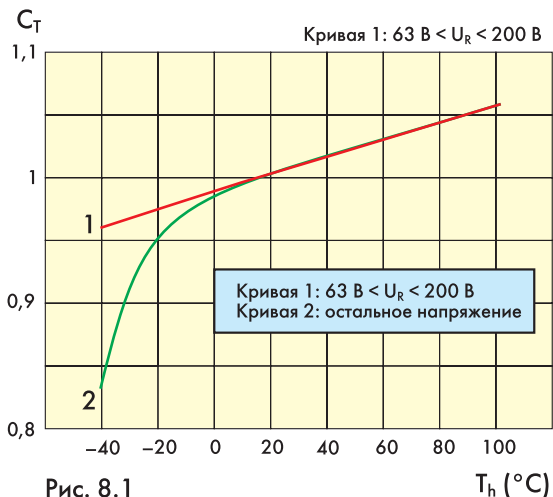


Рис. 8.1

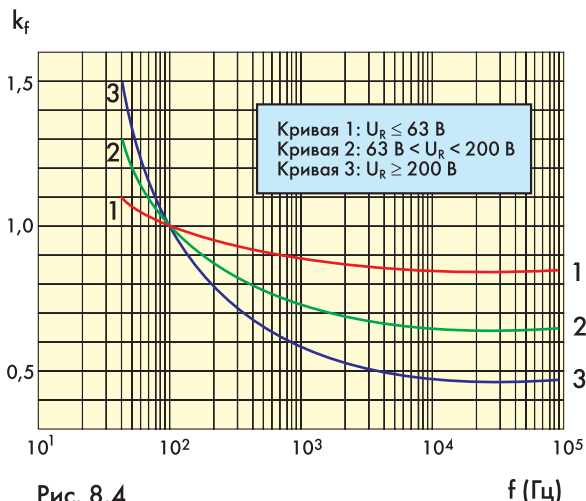


Рис. 8.4

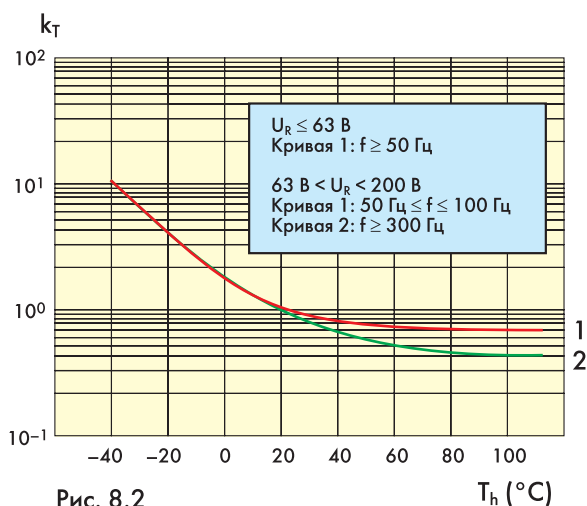


Рис. 8.2

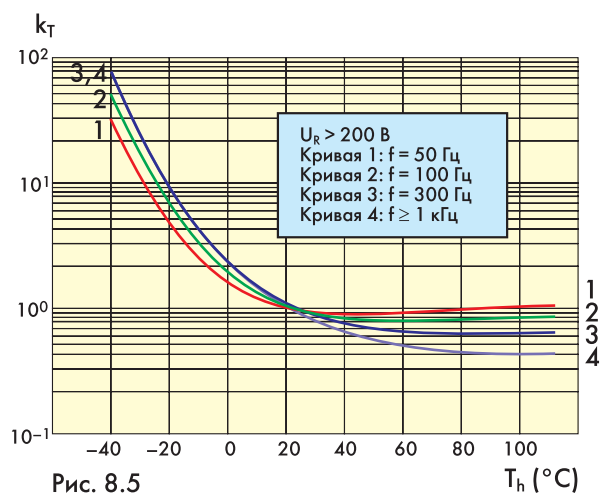


Рис. 8.5

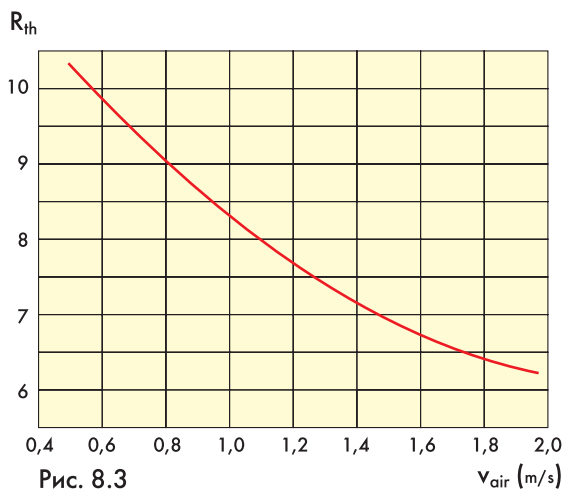


Рис. 8.3

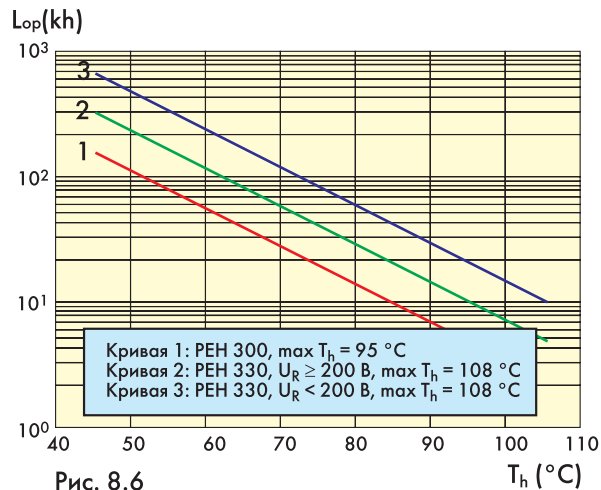


Рис. 8.6

Рис. 8. Графики для расчета режимов ЭК

зона, предохраняющая от пробоя. В процессе и после пробоя конденсатор остается полностью работоспособным.

В таблице 2 приведены основные сравнительные характеристики стандартных ЭК с алюминиевой фольгой и конденсаторов МКР с полипропиленовым диэлектриком. Отметим, для того чтобы набрать аналогичный номинал (1100 мкФ) и обеспечить рабочее напряжение более 1100 В, необходимо соединить параллельно-последовательно 9 емкостей НРЗ! Таким образом, разница в цене (конденсаторы МКР, конечно, пока еще гораздо дороже стандартных) для высоковольтных применений может оказаться несущественной.

На рис. 1 показан модуль SEMISTACK разработанный фирмой SEMIKRON и предназначенный для применения в ветрогенераторе мощностью свыше 1 МВт. Модуль содержит конвертор и инвертор на интеллектуальных силовых модулях Trench IGBT SKiiP2403GB172 с рабочим напряжением 1700 В, размещен-

ных на теплоотводе с жидкостным охлаждением и блок конденсаторов $2 \times [3 \times (4 \times 3 \text{ последовательно})]$ емкостью 3300 мкФ. Номинальные емкости и количество конденсаторов в сборке рассчитаны для получения уровня тока пульсаций, обеспечивающего высокую надежность изделия. На рисунке

Таблица 2. Сравнительные характеристики стандартных ЭК Hitachi и конденсаторов МКР Electronicon

Тип	$U_R, \text{ В}$	$R_{ES}, \text{ мОм}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$)	$R_{th}, \text{ C/Вт}$	$I_R, \text{ А (RMS)}$	$W_C, \text{ Вт с}$	$L_{\sigma}, \text{ нГн}$	Размер, мм	Срок службы, тыс. ч ($75 \text{ }^\circ\text{C}, I_{Rnom}$)
НРЗ-1000 мкФ Hitachi	450	110	8,9	4,35		20	40 × 81	19
МКР-1100 мкФ Electronicon	1100	0,4	1,7	100	665	50	116 × 230	100



видны полумостовые модули SKiiP, снабженные емкостями и многослойные силовые шины питания с установленными на них электролитическими конденсаторами. Непосредственно на выводах конденсаторов размещены балластные резисторы, имеющие специальные полосковые выводы. Такая конструкция обеспечивает высокую стойкость к механическим воздействиям и минимальные габариты.

На рис. 9 приведены сборки SEMISTACK, разработанные для стандартных применений. Разработка и изготовление таких модулей, а также модулей на заказ является одним из приоритетных направлений работы SEMIKRON. В новейших сборках, разработанных в последние годы, стандартные ЭК практически полностью заменены на МКР. Это позволило повысить надежность изделий, уменьшить их габариты. ■

Литература

1. Hitachi AIC Compact Aluminium-Electrolytic Capacitors.
2. RIFA Electrolytic Capacitors. Theory and Application.
3. А. Колпаков. Топология частотных преобразователей средней и большой мощности // Компоненты и Технологии. 2002. № 2.
4. А. Колпаков. Особенности проектирования частотных преобразователей средней и большой мощности // Электронные компоненты. 2003. № 6.