

## Электролитические конденсаторы.

### Особенности применения.

Электролитические конденсаторы (для краткости будем называть их **ЭК**) – неотъемлемая часть большинства электронных схем. Старые разработчики помнят те времена, когда надежность электронных устройств во многом зависела от надежности **ЭК**. Любой телемастер знает, что причиной отказа телевизора (особенно отечественного) чаще всего является конденсатор, потерявший емкость.

И причина, как правило, вовсе не в том, что **ЭК** плох, а в том, что при расчете схемы не были учтены особенности режимов работы **ЭК**. Сейчас многое изменилось. Срок службы **ЭК** ведущих фирм, таких как **EVOX-RIFA**, теперь уже не является определяющим фактором и может составлять немыслимые ранее величины. Например, некоторые конденсаторы фирмы **HITACHI** имеют ресурс 310 тыс. часов при номинальном токе пульсаций и температуре 40<sup>0</sup>С<sup>1</sup>.

Однако неграмотный выбор **ЭК** и неправильный расчет режимов его работы может заметно снизить надежность аппаратуры и явиться причиной неожиданных отказов. Особенности применения и методике выбора и расчета номиналов электролитических конденсаторов посвящена данная статья<sup>2</sup>.

### 1. Особенности конструкции

В обычном алюминиевом **ЭК** диэлектриком является окись алюминия. Окись алюминия подобно р-п переходу имеет одностороннюю проводимость и способна выдерживать напряжение только одной полярности. Соответственно, также как и у диода, при подаче обратного напряжения в **ЭК** возникают токи утечки.

Оксидный слой не может иметь равномерной толщины по всей поверхности. В точках наименьшей толщины ток утечки будет максимальным. Причиной увеличения тока утечки является также наличие примесей воды в электролите. Присутствие воды в электролите снижает соответственно и максимально допустимое напряжение **ЭК**.

На параметры **ЭК** сильное влияние оказывает температура. С ростом температуры увеличиваются емкость, проводимость электролита, ток утечки. Снижается надежность за счет ускорения коррозионных процессов.

Важное значение имеет временная стабильность параметров, определяющая время жизни **ЭК**. Одним из таких параметров является  $R_s$  или ESR (эквивалентное последовательное сопротивление) **ЭК**.

ESR состоит из:

$R_{Al}$  – сопротивление выводов и алюминиевой фольги;

$R_E$  – сопротивление электролита;

$R_{ox}$  – сопротивление диэлектрика.

### 2. 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**.

Общее омическое сопротивление  $R$  состоит из сопротивления металла и электролита.

Диэлектрические потери пропорциональны энергии, запасенной в конденсаторе –  $W_C = 1/2 C U^2$ . Мощность  $P_l$ , рассеиваемая в **ЭК**, может быть записана следующим образом:

<sup>1</sup> HITACHI AIC Compact Aluminium-Electrolytic Capacitors 1998/1999

<sup>2</sup>По материалам RIFA Electrolytic Capacitors. Theory and Application

$$P_i = fW_C + RI^2 \quad (2.1)$$

где  $f$  – частота, с которой конденсатор заряжается и разряжается.

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

$$P_i = fCU^2/2 + RI^2 \quad (2.2)$$

Поскольку  $I = \omega CU$ , а  $\omega = 2\pi f$ , то

$$P_i = UI(1/4\pi + 2\pi RCf) = UI(A+Bf) \quad (2.3)$$

Сомножитель  $(A+Bf)$  представляет собой известный всем  $\cos\phi$ . Однако пользоваться углом  $\phi$  неудобно, т.к. обычно он близок к  $90^\circ$ , поэтому при расчетах ЭК применяют угол  $\delta = 90 - \phi$ , называемый углом потерь.  $\tan\delta = \sin(90 - \phi)/\cos(90 - \phi) \cong \sin(90 - \phi)$  т.к.  $\cos(90 - \phi) \cong 1$ . Формула приобретает простой и понятный вид:

$$P_i = UI \tan\delta \quad (2.4)$$

Ошибка, возникающая из-за принятой аппроксимации незначительна 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 (2.2)  $U = I/\omega C$ , получаем:

$$P_i = I^2(R + k/(4\pi^2 fC)) \quad (2.5)$$

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

$$R_S = R + k/(4\pi^2 fC) \quad (2.6)$$

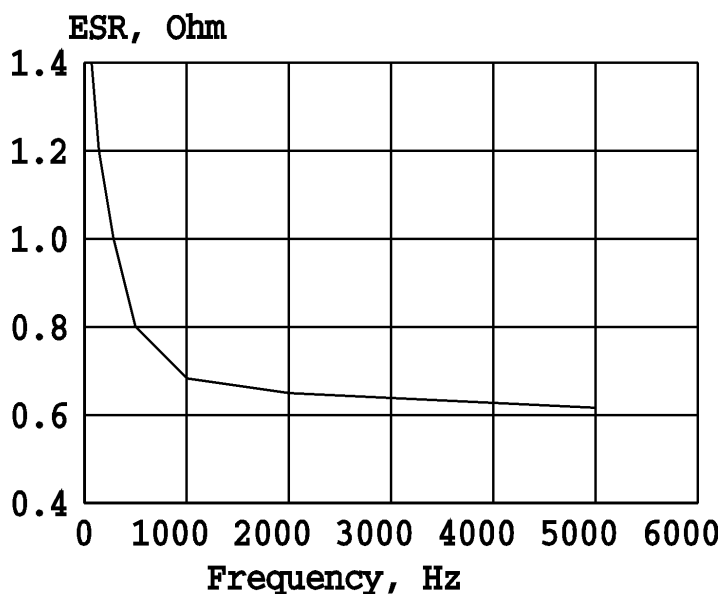


Рис. 2.1

Как видно из (2.6), параметр  $R_S$  является частотно зависимым. График зависимости  $R_S$  от частоты для ЭК RIFA - 450В-68мкФ-85<sup>0</sup> приведен на рисунке. Это несколько затрудняет расчеты потерь. Кроме того, если ток имеет сложный спектральный состав, необходимо знать 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 500Гц  $R_S$  практически не зависит от частоты.

$$P_i = I^2 R_S \quad (f > 500 \text{ Гц}) \quad (2.7)$$

### 3. Тепловой расчет

Температура перегрева ЭК зависит от  $R_S$  и среднеквадратичного значения переменного тока  $I$ . Назовем температуру в наиболее нагретой точке конденсатора (точке перегрева)  $T_{hs}$ , а температуру окружающей среды –  $T_a$ . В рабочем диапазоне перегрев является линейной функцией мощности потерь  $P$ . Тогда справедливы следующие соотношения:

$$P = R_S I^2 \quad (3.1)$$

$$T_{hs} = T_a + R_{th} P \quad (3.2)$$

где  $R_{th}$  – тепловое сопротивление «точка перегрева – окружающая среда».

### 4. Ток утечки

Причиной возникновения тока утечки  $I_l$  является несовершенство оксидного слоя. Временная зависимость  $I_l$  после включения:

$$I_l = I_{l5} (5/t)^p \quad (4.1)$$

где  $I_{l5}$  – ток утечки через 5 минут после подачи постоянного напряжения на ЭК, а постоянная  $p$  имеет значение в диапазоне (0.5-1).

Общая формула в установившемся состоянии имеет следующий вид:

$$I_l = k \cdot C \cdot U_R, \text{ где константа } k = 3 \cdot 10^{-3} \quad (4.2)$$

### 5. 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:

$$L_{op} = L_{opR} (U_R / U_{op})^n \quad (5.1)$$

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  $U < 0.5U_R$ , срок службы практически не зависит от напряжения.

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

$$\ln(L_{op}) = A - B \cdot T \quad (5.2)$$

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

$$L_{opR} = f(D) 2^{(85 - T_{hs})/12} \quad (5.3)$$

(Для конденсаторов, рассчитанных на  $105^\circ$ , вместо 85 в показателе степени должно быть 105).

Значение  $f(D)$  для различных значений диаметра 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:

$$R(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5.4)$$

где  $\lambda$  – частота отказов.

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

$$F(t) = 1 - S(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (5.5)$$

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

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

$$L_{op} = 1/\lambda * \ln 1/(1-F) = m * \ln 1/(1-F) \quad (5.6)$$

где  $m$  – среднее время между отказами.

$L_{op}$  и  $\lambda$  экспоненциально зависят от температуры:  $\lambda$  – возрастает, а  $L_{op}$  – снижается.

Упрощенное выражение для  $\lambda$  выглядит следующим образом:

$$\lambda = 2.5 * 10^{-7} * 2^{(T_{hs}-85)/8} \quad (5.7)$$

Для  $105^\circ$  конденсаторов в показателе степени надо заменить 85 на 105.

*Пример: Рассчитать температуру нагрева ЭК диаметром 50мм при условии, что он работает на предельном напряжении ( $U=U_R$ ) и срок службы должен быть не менее 5 лет.*

Решая формулу 5.3 для  $T_{hs}$ , получим:

$$\bar{T}_{hs} = 85 - \frac{12 \ln \frac{5 * 24 * 365}{35000}}{\ln 2} = 81$$

## 6. Электрическая модель электролитического конденсатора

Упрощенная эквивалентная электрическая схема ЭК приведена на рис. 6.1.

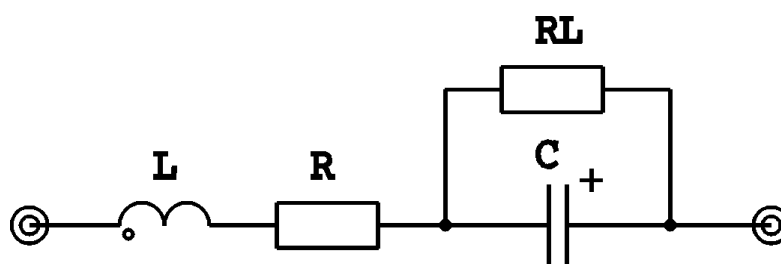


Рис. 6.1

$L$  – суммарная индуктивность выводов

$R$  – суммарное омическое сопротивление выводов, фольги и электролита

$R_l$  – сопротивление утечки

Ток утечки  $I_L$  может быть определен, как омический ток при рабочем напряжении, не превышающем предельного значения. Данная модель может быть использована при расчетах на PSPICE с достаточной степенью точности.

## 7. 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 -  $\Delta T$ , пропорциональном мощности потерь  $P$ .

$$\Delta T = R_{th} * P$$

где  $R_{th}$  – тепловое сопротивление конденсатора.

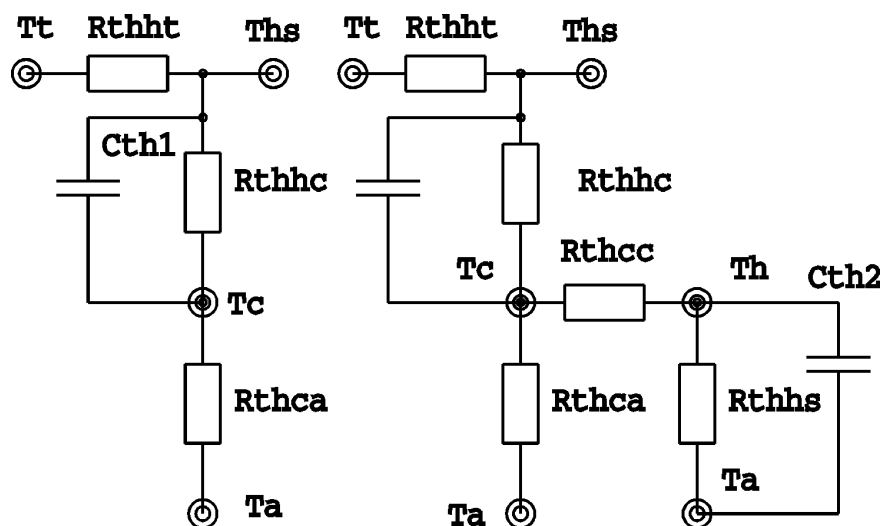


Рис. 7.1

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  $R_{thhc}$  – тепловое сопротивление «точка перегрева – 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 теплостока и конвекции воздуха.

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 благодаря низкой теплоемкости воздуха.

На рисунке (7.1) 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, приведенной ниже, даны значения тепловых сопротивлений для различных размеров ЭК фирмы RIFA при естественном охлаждении конденсатора.

| Размер корпуса | $R_{thhc}, ^\circ C/W$ | $R_{thca}, ^\circ C/W$ | $C_{th}, J/^\circ C$ |
|----------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| A/35x51        | 0.8                    | 9.8                    | 68                   |
| B/35x60        | 0.8                    | 9.0                    | 81                   |
| C/35x75        | 1.0                    | 8.2                    | 101                  |
| D/35x95        | 1.3                    | 7.6                    | 127                  |

| Размер корпуса | $R_{thhc}, ^\circ\text{C/W}$ | $R_{thca}, ^\circ\text{C/W}$ | $C_{th}, \text{J}/^\circ\text{C}$ |
|----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| H/50x75        | 0.6                          | 5.7                          | 205                               |
| J/50x95        | 0.6                          | 5.2                          | 260                               |
| K/50x105       | 0.7                          | 5.1                          | 287                               |
| O/65x105       | 0.4                          | 3.8                          | 486                               |
| R/65x145       | 0.7                          | 3.5                          | 671                               |
| L/75x78        | 0.5                          | 3.6                          | 482                               |
| T/75x105       | 0.4                          | 3.3                          | 647                               |
| U/75x115       | 0.5                          | 3.2                          | 708                               |
| V/75x145       | 0.7                          | 3.0                          | 893                               |
| X/75x220       | 0.5                          | 2.9                          | 1351                              |
| M/90x78        | 0.5                          | 2.9                          | 692                               |
| N/90x98        | 0.5                          | 2.6                          | 868                               |
| Y/90x145       | 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) мы не находим необходимых тепловых характеристик.

## 8. Параллельное и последовательное соединение ЭК

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

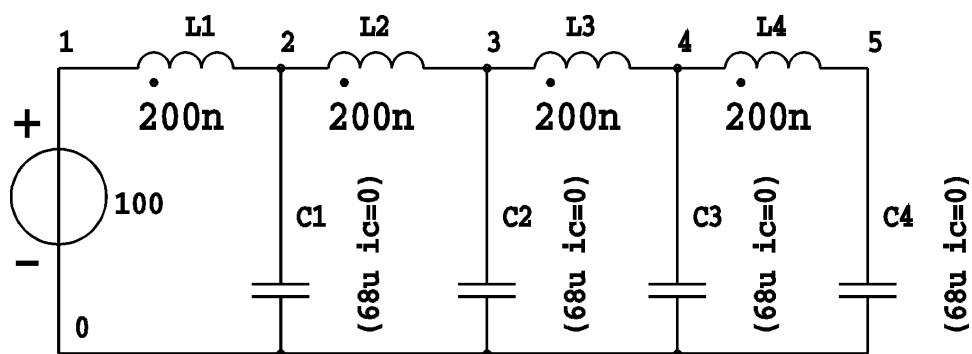


Рис. 8.1

На рис. 8.1 показано параллельное соединение 4 конденсаторов C1...C4 емкостью по 68мкФ. В схеме также присутствуют паразитные индуктивности проводов L1...L4 по 200нГ (вполне реальная величина, соответствующая примерно 5 см провода). Посмотрим с помощью программы PSPICE, как схема будет себя вести при подаче постоянного напряжения от источника 100В.

Эпюры напряжения во 2 и 5 точках схемы показаны на рис. 8.2. Обратите внимание, что амплитуда напряжения в точке 5 схемы более чем в 2 раза превышает напряжение питания. Кроме того, в точках минимума переходного процесса напряжение на ЭК становится отрицательным!

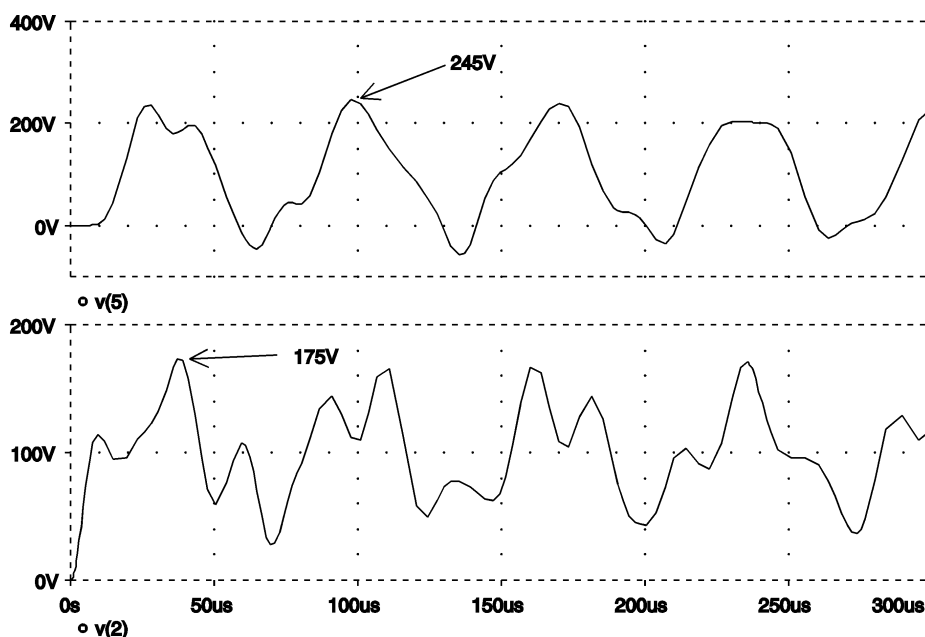


Рис. 8.2

Однако в жизни все оказывается не так плохо благодаря наличию активных распределенных сопротивлений в проводах и ЭК. Более реальная эквивалентная схема приведена на рис.8.3, а соответствующие ей эпюры – на рис.8.4.

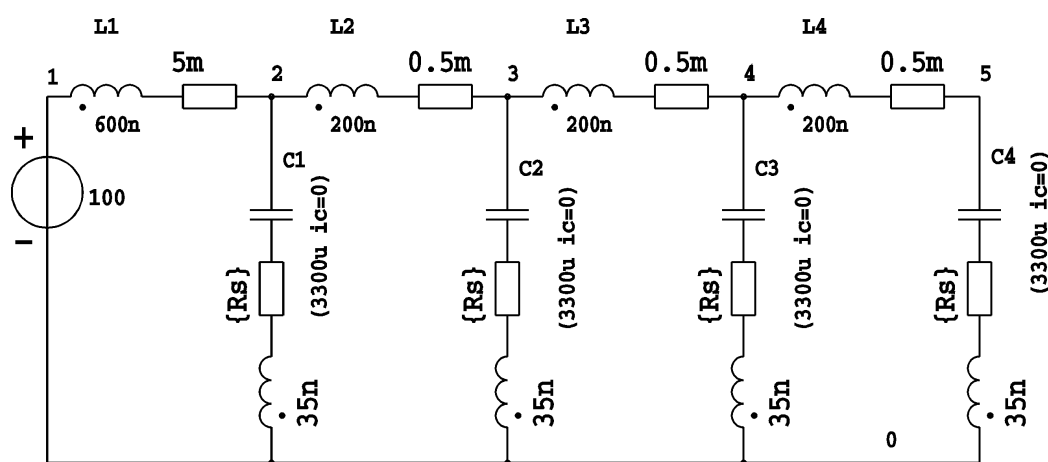


Рис.8.3

В схему включены сопротивления и индуктивности подводящих проводов, паразитные индуктивности ЭК и сопротивления  $R_s$  (ESR) о которых говорилось выше. Эпюры в точке 5 схемы даны для двух значений температуры –  $20^{\circ}\text{C}$  и  $85^{\circ}\text{C}$ . Разница в переходном напряжении (135В для  $20^{\circ}\text{C}$  и 165В для  $85^{\circ}\text{C}$ ) объясняется тем, что  $R_s$  изменяет свое значение от 22мОм при  $20^{\circ}\text{C}$  до 7мОм при  $85^{\circ}\text{C}$ . Величина перенапряжения зависит и от номинала конденсатора. Моделирование показывает, что для 100мкФ перенапряжение будет 135В, а для 1500мкФ – 160В и этот фактор необходимо учитывать при расчетах.

Интересно, что пик напряжения не зависит от величины нагрузки. Это объясняется тем, что импеданс схемы очень низок по сравнению с нагрузкой.

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

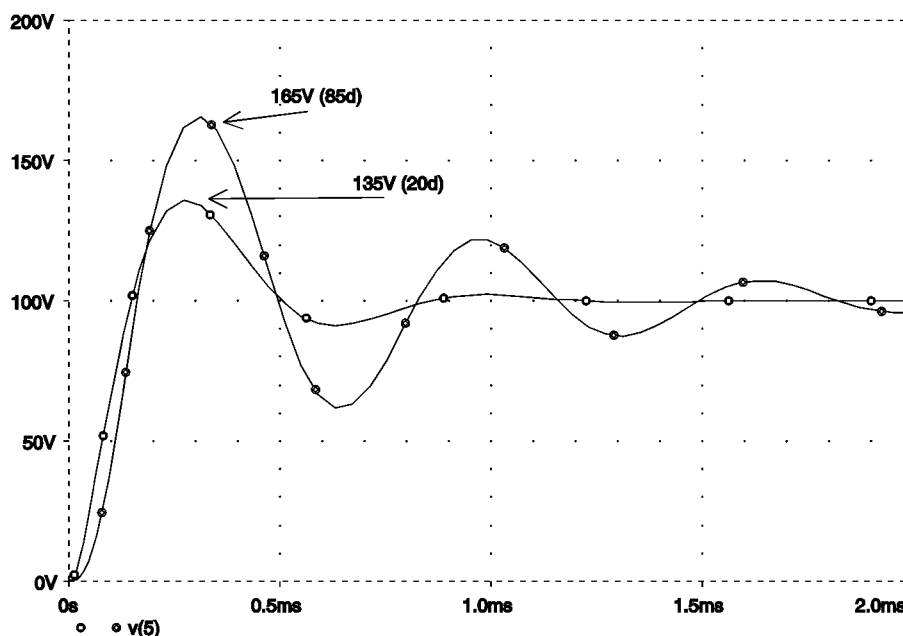


Рис.8.4

Анализ переходных искажений в комбинированной схеме производится аналогично описанному выше. Следует учесть паразитные параметры проводов между последовательно соединенными конденсаторами. Не забудьте 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 резистор для устранения перекаса напряжения из-за разности токов утечки конденсаторов. Номиналы уравнивающих резисторов можно рассчитать по формуле:

$$R = 1000 / (0.015 * C) \quad (8.1)$$

где  $C$  – емкость в мкФ,  $R$  – сопротивление в кОм.

Формула 8.1 выведена на основании известного соотношения для тока утечки  $I_L = k * C * U_R$ , где константа  $k = 3 * 10^{-3}$ . Ток резистора  $I_R$  должен быть больше тока утечки, который имеет большой разброс и сильно зависит от условий эксплуатации. 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 только для постоянного тока и низких частот. На частотах порядка сотен герц и выше коэффициент деления напряжения определяется только соотношением емкостей.

## 9. Причины отказов ЭК

Основная причина деградации и выхода из строя ЭК – это диффузия электролита через изолятор. Этот процесс ускоряется с ростом температуры и, в основном, определяет срок службы конденсатора.

Ниже приведены некоторые причины, способные привести к преждевременному отказу ЭК:

- Переохлаждение (обычно ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ ). 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. Может 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. Приводит к внутреннему короткому замыканию, увеличению тока утечки, потере емкости.

## 10. Выбор и расчет ЭК

### 10.1. Среднеквадратичное значение тока пульсаций $I_{\text{RMS}}$

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

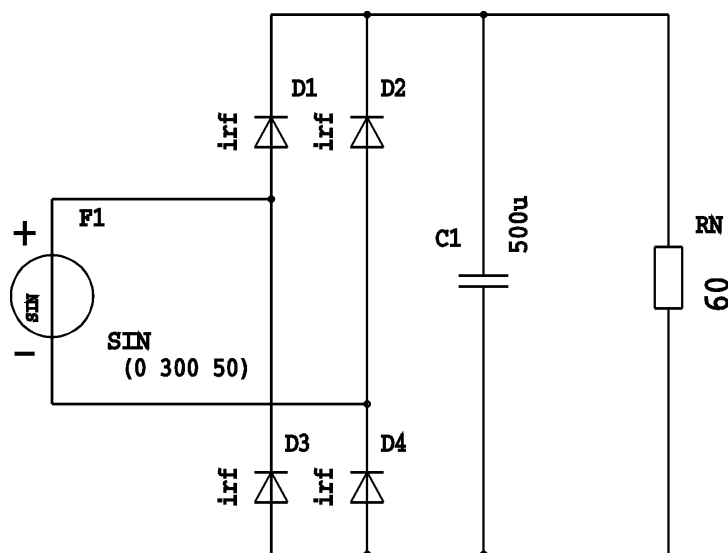


Рис.10.1

Рассмотрим работу двухполупериодного выпрямителя, схема которого приведена на рис. 10.1. Первичное напряжение – 50Гц, 220В. Сопротивление нагрузки – 80Ом, емкость конденсатора – 500мкФ.

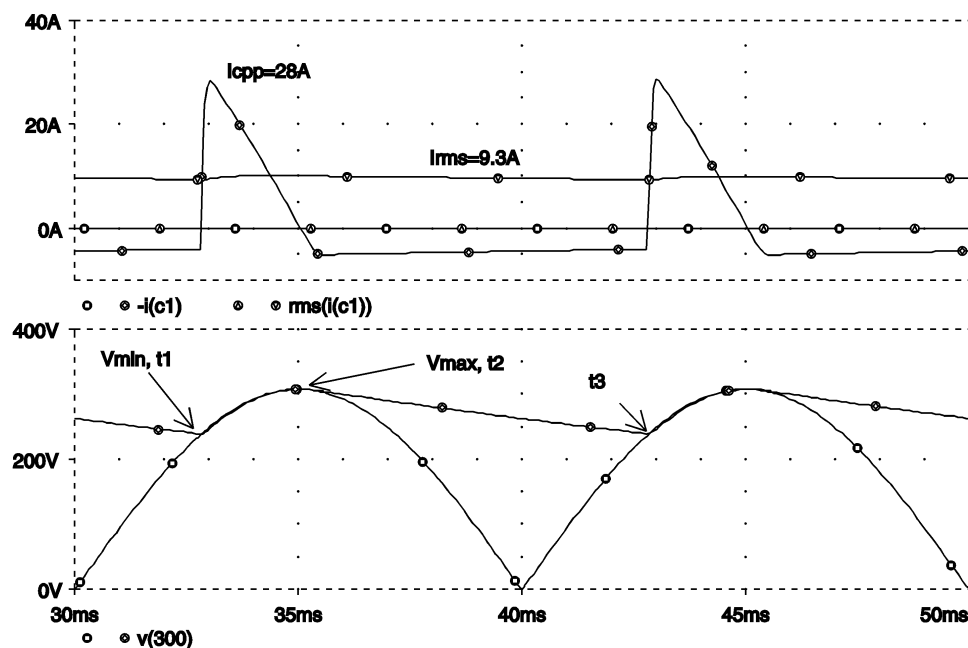


Рис. 10.2

На рис. 10.2 показаны ток конденсатора – импульсный  $I_{cpp}$  и среднеквадратичный  $I_{rms}$  (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  $t1$  – время начала заряда,  $t2$  – время начала разряда,  $t3$  – время начала следующего периода заряда, т.е.  $t3=t1 + T$ .

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

$$t1 = 32.8 \text{ ms} \quad t2 = 35 \text{ ms} \quad t3 = 42.8 \text{ ms}$$

где 310В – амплитуда входного напряжения.

Пиковый ток конденсатора  $I_{cpp}$  (при  $t1$ ):

$$I_{cpp} = CdU/dt = 500 \cdot 10^{-6} \cdot 310 \cdot (2\pi 50) \cdot \cos(2\pi 50 \cdot 32.8 \cdot 10^{-3}) = 28 \text{ A}$$

Ток разряда  $I_d$  определяется из соотношения:

$$I_d(t3 - t2) = I_{cpp}(t2 - t1) \cdot 0.5$$

$$I_d = 0.5 \cdot 28 \cdot (35 - 32.8) / (42.8 - 35) = 3.6 \text{ A}$$

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

$$I_{rms} = I_{cpp} \sqrt{\frac{t2 - t1}{3T}} = 28 \sqrt{\frac{35 - 32.8}{3 \cdot 10}} = 8.5 \text{ A}$$

Среднеквадратичное значение тока разряда  $I_{rmsd}$ :

$$I_{rmsd} = I_d \sqrt{\frac{t3 - t2}{T}} = 3.6 \sqrt{\frac{42.8 - 35}{10}} = 3.9 \text{ A}$$

Общее среднеквадратичное значение тока:

$$I_{rmse} = \sqrt{I_{rms}^2 + I_{rmsd}^2} = \sqrt{8.5^2 + 3.9^2} = 9.3$$

## 10.2. Двухполупериодный выпрямитель

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.

Как правило, 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 (см. рис.10.1). 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 310В. Форма напряжения на конденсаторе и токи через него приведены на эпюрах рис.10.2. 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, т.к. используется начальный участок экспоненты разряда;

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

$$t_3=1/\omega \cdot \arcsin(250/310)=13 \cdot 10^{-3}\text{с} \quad (10.1)$$

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

$$RC = \frac{t_3 - t_2}{\ln \frac{U_{\max}}{U_{\min}}} = 35 \cdot 10^{-3} \quad (10.2)$$

Откуда  $C=437\text{мкФ}$

Учитывая допуск  $-10\%$ , мы должны увеличить соответственно номинал в 1.1 раза,  $C=480\text{мкФ}$ .

Конденсатор должен быть рассчитан на постоянное напряжение 350В и выше. RIFA приводит в своих характеристиках для таких конденсаторов т.н. фактор старения (aging factor)  $\gamma=1-0.1=0.9$ . Коррекция значения емкости дает  $C=530\text{мкФ}$ .

Номинал ЭК необходимо также изменить с учетом снижения емкости при снижении температуры. Например, при  $-40^\circ\text{C}$ , температурный коэффициент  $kt=0.94$ . Следовательно,  $C=564\text{мкФ}$ . Таким образом, окончательное табличное значение номинала ЭК – 560мкф.

Естественно, что минимальное выпрямленное напряжение при этом конденсаторе будет больше, чем 250В.

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).

$$C_{new} = 560 * 1.3 * 1.05 = 760 \text{ мкФ}$$

Используя формулы 10.1 и 10.2, определим новые значения  $t_3$  и  $U_{min}$ :  $t_3 = 13.5 \text{ ms}$  и  $U_{min} = 270 \text{ V}$ . Исключив из  $t_3$  значение периода (10ms) получим  $t_3 = 3.5 \text{ ms}$ .

Воспользуемся выражениями, приведенными в 10.1.

$$I_{cpp} = CdU/dt = 760 * 10^{-6} * 310 * (2\pi 50) * \cos(2\pi 50 * 3.5 * 10^{-3}) = 33 \text{ A}$$

$$I_d = 0.5 I_{cpp} (t_2 - t_1) / (t_3 - t_2) = 0.5 * 50 * (5 - 3.5) / (13.5 - 5) = 3 \text{ A}$$

$$I_{rms} = I_{cpp} \sqrt{\frac{t_2 - t_1}{3T}} = 33 \sqrt{\frac{5 - 3.5}{3 * 10}} = 7.5 \text{ A}$$

$$I_{rmsd} = I_d \sqrt{\frac{t_3 - t_2}{T}} = 3 \sqrt{\frac{13.5 - 5}{10}} = 2.7 \text{ A}$$

$$I_{rmse} = \sqrt{I_{rms}^2 + I_{rmsd}^2} = \sqrt{7.5^2 + 2.7^2} = 8 \text{ A}$$

Все приведенные выше формулы и расчеты предназначены, во-первых, для лучшего понимания, а во вторых, для людей, которые умеют и любят считать. Более простой способ получения значения  $I_{rmse}$  (и, соответственно, более подходящий для инженеров) – моделирование схемы на PSPICE. Необходимо только учесть, что для получения достоверного значения среднеквадратичного тока число выводимых периодов тока должно быть как можно больше (как правило, более 10).

Итак, мы нашли среднеквадратичный ток через конденсатор. Но гораздо важнее выяснить, способен ли ЭК выдержать такой ток. Мы уже приводили значения тепловых сопротивлений для ЭК, имеющих различные размеры. В нашем случае (размер A35/51):

$$R_{th} = R_{thca} + R_{thhc} = 9.8 + 0.8 = 10.6^\circ \text{C/W}$$

Температура ЭК определяется рассеиваемой мощностью, а она, в свою очередь зависит от  $I_{rmse}$  и ESR (эквивалентное последовательное сопротивление). 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 560мкФ мы включим в параллель два по 470мкФ и снизим  $I_{rmse}$  до 5А.

$$ESR(105^\circ \text{C}, 100 \text{ Hz}) = 0.19 \Omega$$

Мощность, рассеиваемая в конденсаторе  $P_c$  и перегрев  $\Delta T$ :

$$P_c = I_{rmsc}^2 * ESR = 25 * 0.19 = 4.7 \text{ Вт}$$

$$\Delta T = P_c * R_{th} = 4.7 * 10.6 = 50^\circ \text{C}$$

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 наихудшем случае конденсатор работает при предельной температуре. Тогда емкость  $C_{old}$ :

$$C_{old} = 0.9 * 0.9 * 1.05 * 470 = 400 \text{ мкФ}$$

где 1.05 – коэффициент коррекции емкости при высокой температуре.

В этом случае  $I_{rms_{old}} = 4.8 \text{ А}$

$$\Delta T = P_c * R_{th} = 4.8^2 * (2 * 0.19) * 10.6 = 93^\circ \text{C}$$

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

Значит, в конце срока службы температура окружающей среды не должна превышать  $12^\circ \text{C}$ ! В противном случае срок службы ЭК будет много меньше паспортного значения. Т.о. новый конденсатор может работать при  $T_a = 55^\circ \text{C}$  и температура перегрева будет  $105^\circ \text{C}$ , а срок службы  $L_{op} = 30000$  часов. Если при такой же температуре будет работать «старый» ЭК, его температура перегрева будет  $148^\circ \text{C}$ . Воспользовавшись формулой 5.3, 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 уравнивает эффект от роста ESR.

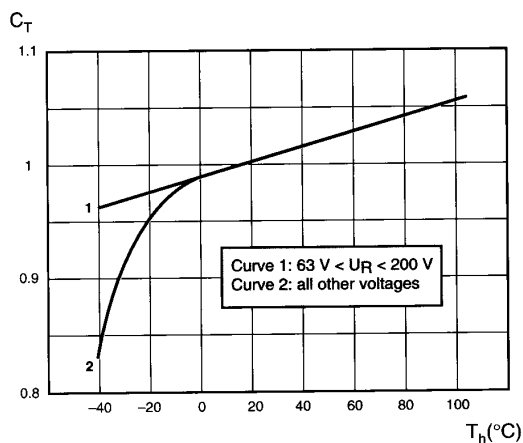
Расчет  $L_{op}$  с учетом всех факторов чрезвычайно сложен, поэтому фирма **EVOX RIFA** предложила упрощенную методику с использованием графиков, отражающих основные зависимости параметров ЭК (см. рис. 10.3).

*Пример: рассчитать для схемы рис.10.1 минимальный срок службы ЭК 470мкФ - 400В – 105°C, размером 35x50, при условии, что температура окружающего воздуха – 40°C.*

1. Из справочных данных берется ESR для  $20^\circ \text{C}$  и 100Гц и пересчитывается с учетом частотного коэффициента  $k_f$ . (график фиг.4) В нашем случае  $k_f = 1$ .  
 $ESR = 190 \text{ мОм}$
2. Рассчитывается среднеквадратичное значение тока пульсаций ( $I_{rmsc} = 5 \text{ А}$  при установке двух ЭК в параллель), мощность потерь (4.7Вт) и перегрев ( $50^\circ \text{C}$ ). 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 графика фиг.3
3. Найденное значение ESR изменяется с учетом температурного коэффициента  $k_t$  (график фиг.5, кривая 2) при температуре перегрева для нового конденсатора  $T_{hs} = T_a + \Delta T = 90^\circ \text{C}$ ,  $k_t = 0.8$   
 $ESR = 190 * 0.8 = 152 \text{ мОм}$  Теперь можно откорректировать значение температуры перегрева  $T_{hs} = T_a + \Delta T = 40^\circ + P_c * R_{th} = 40 + 25 * 0.152 * 10.6 = 80^\circ \text{C}$
4. По графику фиг.6 определяется срок службы  $L_{op}$  при температуре  $T_{hs} = 80^\circ \text{C}$   
 $L_{op} \cong 15000$ .
5. Уточняется значение срока службы с учетом коэффициента нагрузки по напряжению  $k_u = 310/400 = 0.78$  по формуле (5.1) при  $n=5$   
 $L_{op} = 15000 / (0.78)^5 = 50000$

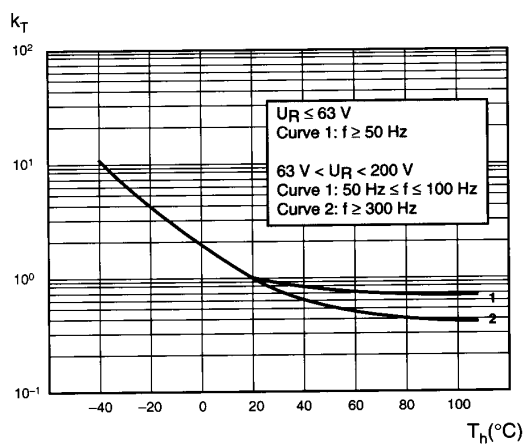
**Fig. 1**

$C_T = C(f=100 \text{ Hz}, T_h) / C(f=100 \text{ Hz}, T_h = 20^\circ\text{C})$  vs  $T_h$



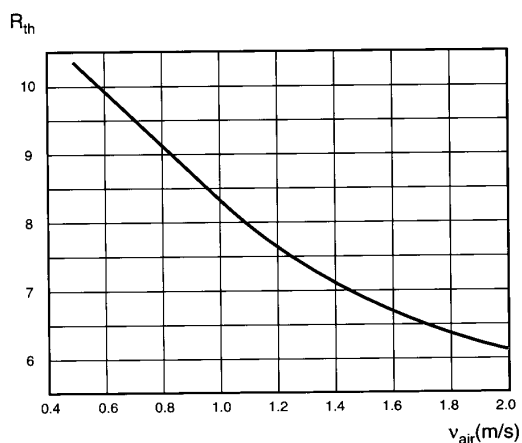
**Fig. 2**

$k_T = \text{ESR}(f, T_h) / \text{ESR}(f, T_h = 20^\circ\text{C})$  vs  $T_h$ ,  $U_R < 200 \text{ V}$



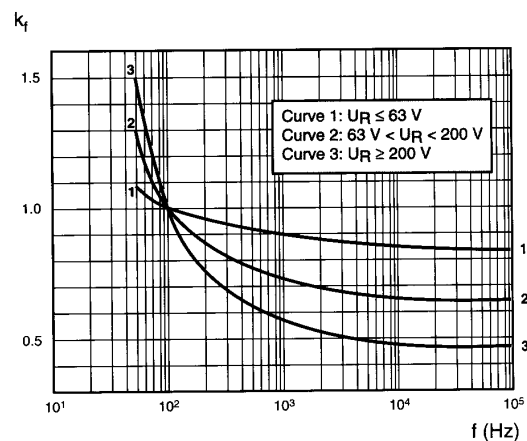
**Fig. 3**

$R_{th}$  vs  $v_{air}$



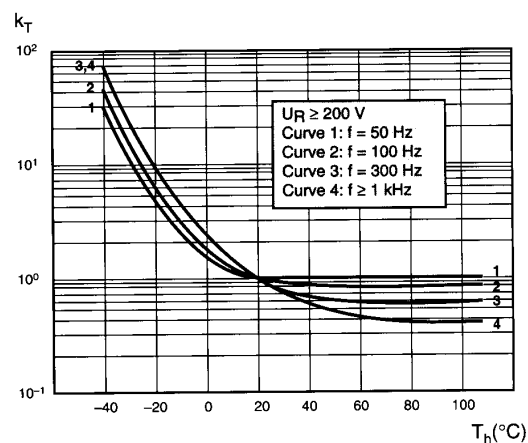
**Fig. 4**

$k_f = \text{ESR}(f, T_h = 20^\circ\text{C}) / \text{ESR}(f = 100 \text{ Hz}, T_h = 20^\circ\text{C})$  vs  $f$



**Fig. 5**

$k_T = \text{ESR}(f, T_h) / \text{ESR}(f, T_h = 20^\circ\text{C})$  vs  $T_h$ ,  $U_R \geq 200 \text{ V}$



**Fig. 6**

$L_{op}$  vs  $T_h$

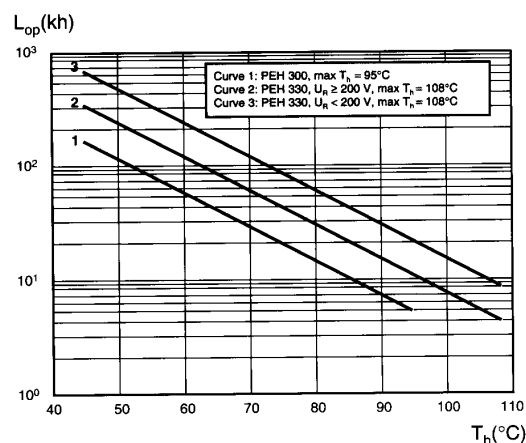


Рис. 10.3

## 10.2. Фильтр импульсного источника питания

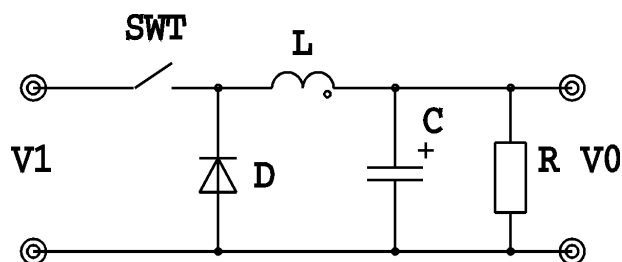


Рис. 10.4

Рассмотрим работу сглаживающего LC – фильтра импульсного источника питания, схема которого приведена на рис. 10.4. В данной схеме ЭК выполняет две задачи:

1. Вместе с индуктивностью L1 он образует сглаживающий фильтр, обеспечивающий требуемое значение амплитуды пульсаций.
2. Он не позволяет выходному напряжению выходить из допусков при изменении сопротивления нагрузки.

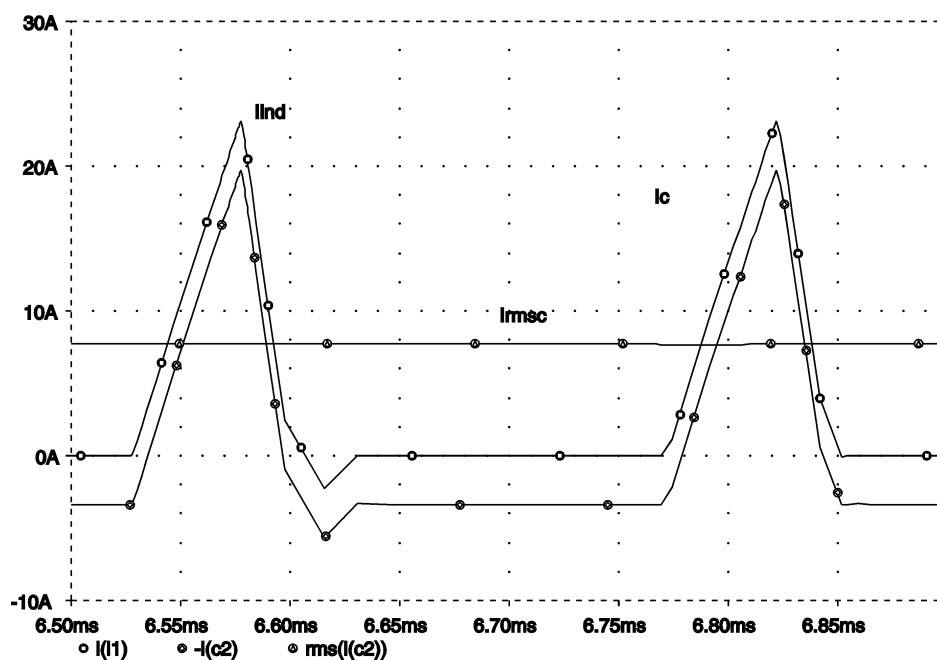


Рис. 10.5

*Пример: выбрать и рассчитать параметры ЭК для схемы рис. 10.4, работающей при следующих условиях:*

|                                                         |              |
|---------------------------------------------------------|--------------|
| <i>Выходное напряжение</i>                              | – 200В       |
| <i>Выходной ток</i>                                     | – 0.3...3А   |
| <i>Амплитуда пульсаций выходного напряжения</i>         | – 3В         |
| <i>Изменение напряжения при изменении тока нагрузки</i> | – 0.5В       |
| <i>Входное напряжение</i>                               | – 280±20В    |
| <i>Частота переключений</i>                             | – 5кГц       |
| <i>Диапазон рабочих температур</i>                      | – 0°C – 40°C |

Первый шаг при расчете подобной схемы – выбор индуктивности. Эпюры тока индуктивности  $I_{ind}$ , тока конденсатора  $I_C$  и среднеквадратичное значение тока конденсатора  $I_{RMS}$  показаны на рис. 10.5. Используя известное выражение  $U=LdI/dT$ , получим:

$$L=(V_1 - V_0)*D_{max}T/\Delta I_L \quad (10.3)$$

где  $V_1$  – входное напряжение;

$V_0$  – выходное напряжение;

$\Delta I_L$  – пиковый ток в индуктивности, его значение обычно ограничено характеристиками силового ключа,  $\Delta I_L=20A$ ;

$DT$  – длительность импульса включения

$D_{max}$  – максимальная скважность,  $D_{max}=0.2$

$T$  – период,  $T=200\mu s$

Отсюда  $L \approx 0.2 мГн$ .

Другой фактор, на который влияет величина индуктивности, это время  $t_s$  – время, в течение которого выходное напряжение остается в допуске при изменении выходного тока.

$$t_s = \frac{\Delta I_0 * L}{V_0 \left( \frac{D_s}{D_{max}} - 1 \right)} = \frac{2.7 * 0.2 * 10^{-3}}{200 \left( \frac{0.21}{0.2} - 1 \right)} = 50 * 10^{-6} \quad (10.4)$$

$D_s$  – это скважность, допустимая в течение времени  $t_s$ , например  $D_s=0.21$ .

Теперь можно определить минимальную величину емкости, исходя из соотношения:

$$C > t_s * \Delta I_0 / \Delta V_0 = 50 * 10^{-6} * 2.7 / 0.3 = 450 * 10^{-6} \quad (10.5)$$

Напряжение пульсаций имеет две основных составляющих. Первая – падение напряжения на паразитной индуктивности конденсатора  $V_{LC}$ . Практически весь ток пульсаций индуктивности  $\Delta I_L$  течет через конденсатор, что видно на рис. 10.5. Напряжение  $V_{LC}$ , создаваемое на паразитной индуктивности ЭК –  $L_C$ , имеет прямоугольную форму. Оно максимально при минимальной скважности импульсов.

$$V_{LC} = L_C * dI_C / dt = L_C * \Delta I_L / DT \quad (10.6)$$

Диапазон изменения скважности определяется диапазоном изменения входного напряжения. Поэтому минимальную скважность можно найти из соотношения:

$$D_{min} = D_{max} * V_{1min} / V_{1max} = 0.2 * 260 / 300 = 0.17 \quad (10.7)$$

Вторая составляющая  $V_{RC}$  – падение напряжения за счет омического сопротивления конденсатора  $R_C$ , которое, в основном, определяется ESR.

$$V_{RC} = \Delta I_L * R_C \quad (10.8)$$

Для нашей схемы используем конденсатор 470мкФ - 400В – 105<sup>0</sup>С. Он имеет ESR=150мОм (100Гц, 20<sup>0</sup>С) и  $L_C=8нГн$ .

Определим составляющие напряжения пульсаций:

$$V_{RC} = 20 * 0.15 = 3B, V_{LC} = 8 * 10^{-9} * 20 / 34 * 10^{-6} = 0.005B.$$

Форма напряжения за счет индуктивной составляющей  $V_{LC}$  показана на рис. 10.6. Как видно, ей можно пренебречь.

Т.о. основной составляющей напряжения пульсаций является активная составляющая. Если мы введем поправку ESR по температуре ( $k_T=2$  при  $0^0C$ ) то при  $ESR=0.3$  Ом,  $V_{RC} = 20 * 0.3 = 4.8B$ . Для уменьшения уровня пульсаций можно увеличить частоту. Однако это не всегда возможно, т.к. приводит к дополнительным динамическим потерям на силовом ключе. В этом случае для снижения уровня пульсаций можно увеличить емкость или установить два ЭК в параллель.

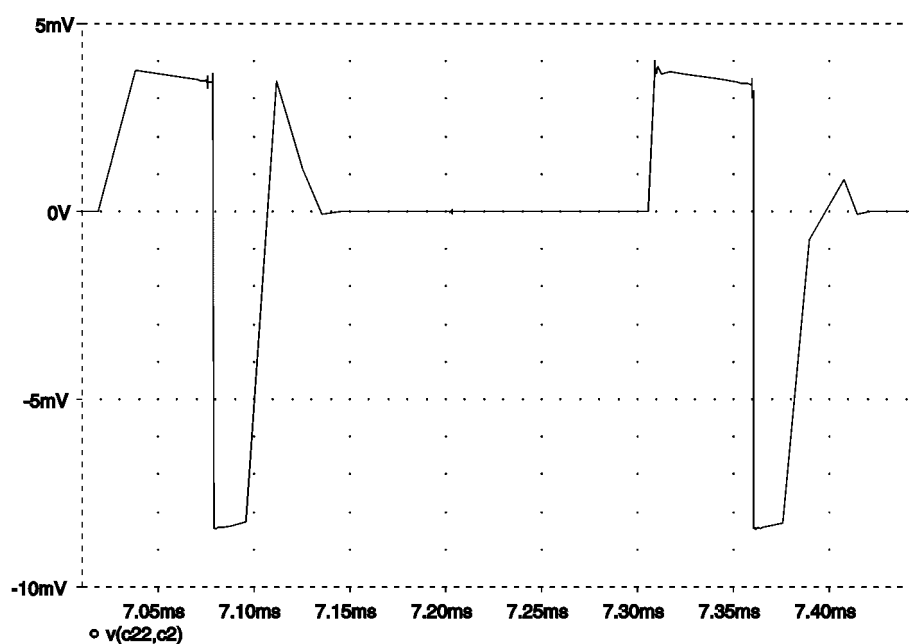


Рис. 10.6

В заключение произведем расчет срока службы ЭК для данной схемы по методике, описанной в 10.2.

1. Из справочных данных берется ESR для  $20^0C$  и 100Гц и пересчитывается с учетом частотного коэффициента  $k_f$ . (график 3 фиг.4) В нашем случае  $k_f=0.5$   $ESR=75мОм$
2. С помощью моделирования получаем  $I_{rmsc}=7A$ . Рассчитаем мощность потерь и температуру перегрева.  
 $P_c = I_{rmsc}^2 * ESR = 49 * 0.075 = 6Bт$      $\Delta T = P_c * R_{th} = 6 * 10.6 = 63^0C$
3. Найденное значение ESR изменяется с учетом температурного коэффициента  $k_t$  (график фиг.5, кривая 4) при температуре перегрева для нового конденсатора  $T_{hs} = T_a + \Delta T = 100^0C$ ,  $k_t=0.4$   
 $ESR=75 * 0.4 = 30мОм$  Теперь можно откорректировать значение температуры перегрева  $T_{hs} = T_a + \Delta T = 40^0 + P_c * R_{th} = 40 + 49 * 0.03 * 10.6 = 56^0C$ . Обратите внимание, что коэффициент  $k_t$  практически не изменяется в диапазоне 60-100<sup>0</sup>, поэтому ошибка расчета из-за снижения температуры со 100<sup>0</sup> до 56<sup>0</sup> невелика.
4. По графику фиг.6 определяется срок службы  $L_{op}$  при температуре  $T_{hs} = 80^0C$   
 $L_{op} \cong 50000$ .