

(Окончание, начало № 2/2000)

## Особенности применения электролитических конденсаторов

### 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 из-за паразитной индуктивности соединительных проводов.

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

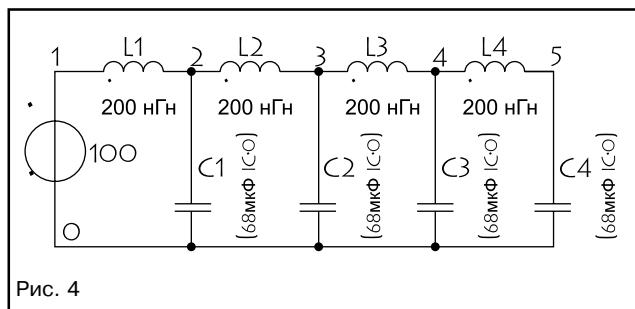


Рис. 4

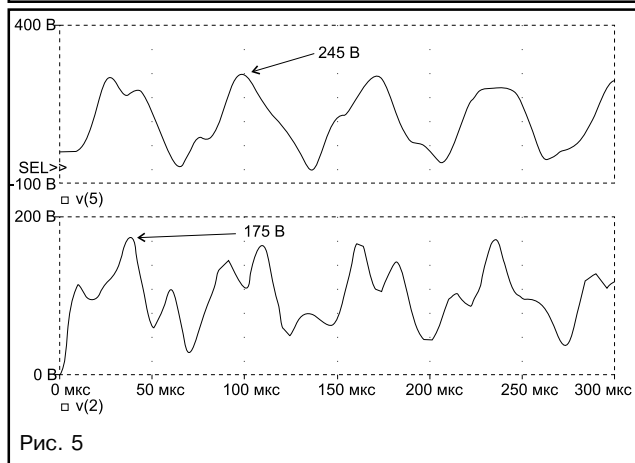


Рис. 5

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

Однако в жизни все оказывается не так плохо, благодаря наличию активных распределенных сопротивлений в про-

водах и ЭК. Более реальная эквивалентная схема приведена на рис. 6, а соответствующие ей эпюры – на рис. 7.

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 °С и 85 °С. Разница в переходном напряжении (135 В для 20 °С и 165 В для 85 °С) объясняется тем, что  $R_s$  изменяет свое значение от 22 мОм при 20°С до 7 мОм при 85°С. Величина перенапряжения зависит и от номинала конденсатора. Моделирование показывает, что для 100 мкФ перенапряжение будет 135 В, а для 1500 мкФ – 160 В, и этот фактор необходимо учитывать при расчетах.

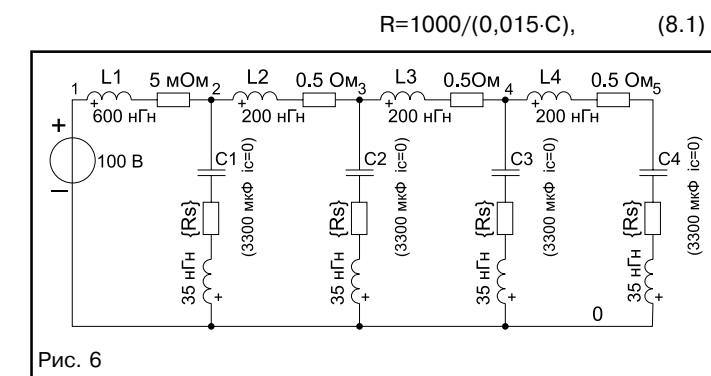


Рис. 6

тельно каждому из них необходимо установить резистор для устранения перекоса напряжения из-за разности токов утечки конденсаторов. Номиналы уравнивающих резисторов можно рассчитать по формуле:

$$R = 1000 / (0,015 \cdot C), \quad (8.1)$$

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

Формула (8.1) выведена на основании известного соотношения для тока утечки  $I_L = k \cdot C \cdot U_R$ , где константа  $k = 3 \cdot 10^{-3}$ . 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. 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°С), 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 в ЭК;
- воздействие высоких частот; может привести к изменению емкости и ESR;

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 парал-

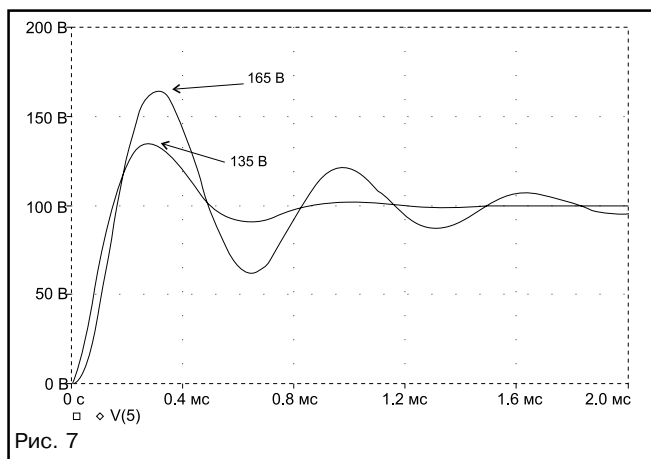


Рис. 7

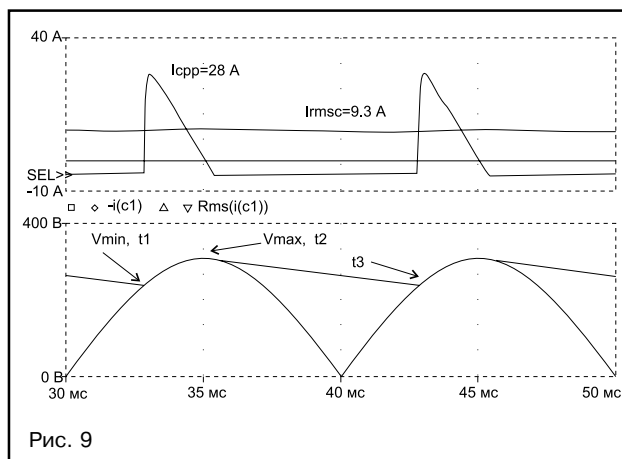


Рис. 9

- 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.

## 10. 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 пульсаций, как это принято в наших ТУ.

Рассмотрим работу двухполупериодного выпрямителя, схема которого приведена на рис. 8. Первичное напряжение – 50 Гц, 220 В. Сопротивление нагрузки – 80 Ом, емкость конденсатора – 500 мкФ.

На рис. 9 показаны: ток 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, т.е.  $t_3 = t_1 + T$ .

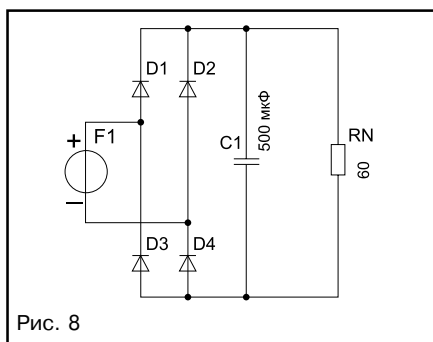


Рис. 8

Ток разряда  $I_d$  определяется из соотношения:

$$I_d(t_3 - t_2) = I_{cpp}(t_2 - t_1) \cdot 0.5;$$

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

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

$$I_{rms} = I_{cpp} \sqrt{\frac{t_2 - t_1}{3T}} = 28 \sqrt{\frac{35 - 32.8}{3 \cdot 10}} = 8.5 \text{ А.}$$

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:

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

**Андрей Колпаков**  
kai@megachip.ru

(Продолжение следует).

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

$$t_1 = 32.8 \text{ мс} \cdot t_2 = 35 \text{ мс} \cdot t_3 = 42.8 \text{ мс},$$

где 310 В – амплитуда входного напряжения.

Пиковый ток конденсатора  $I_{cpp}$  (при  $t_1$ ):

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