

Особенности применения электролитических конденсаторов

10.2. Двухполупериодный выпрямитель

$$R = U^2/P,$$

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 в себя следующие действия:

- I выбирается номинал конденсатора, обеспечивающий необходимую мощность нагрузки или заданное минимальное выпрямленное напряжение;
- I найденное значение корректируется с учетом разброса номинала, временного и температурного изменения номинала;
- I из каталога выбирается ближайшее минимальное значение номинала конденсатора;
- I рассчитывается среднеквадратичное значение тока пульсаций для нового конденсатора, определяется температура нагрева ЭК и срок его службы.

Рассмотрим в качестве примера методику выбора ЭК для простейшей схемы двухполупериодного выпрямителя (рис. 8). 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. 10б. 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

где U – среднее значение выпрямленного напряжения.

Упрощенная методика расчета основана на том, что падение напряжения на ЭК начинается на максимуме и происходит линейно, т. к. используется начальный участок экспоненты разряда.

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

$$t_3 = 1/\omega \cdot \arcsin(250/310) = 134 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (10.1)$$

Максимум напряжения имеет место при

$$t_2 = 54 \cdot 10^{-3} \text{ с} + nT,$$

где T = 10 мс – период выпрямленного напряжения. Постоянная времени RC определяется по формуле:

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

Откуда C = 437 мкФ.

Учитывая допуск – 10%, мы должны увеличить номинал в 1,1 раза. В результате C = 480 мкФ.

Конденсатор должен быть рассчитан на постоянное напряжение 350 В и выше. RIFA приводит в своих характеристиках для таких конденсаторов так называемый фактор старения (aging factor) $g = 1 - 0,1 = 0,9$. 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 $kt = 0,94$. Следовательно, C = 564 мкФ. Таким образом, окончательное табличное значение номинала ЭК будет равным 560 мкФ. Естественно, что минимальное выпрямленное напряжение при этом конденсаторе будет больше, чем 250 В.

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

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

Используя формулы 10.1 и 10.2, 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, приведенными в 10.1.

$$I_{cпп} = CdU/dt = 760 \cdot 10^{-6} \cdot 310 \cdot (2\pi 50) \cdot \cos(2\pi 50 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}) = 33 \text{ А;}$$

$$I_d = 0,5 I_{cпп} (t_2 - t_1) / (t_3 - t_2) = 0,5 \cdot 4 \cdot 50 \cdot 4 / (5 - 3,5) / (13,5 - 5) = 3 \text{ А.}$$

Все приведенные выше формулы и расчеты предназначены, во-первых, для лучшего понимания, а во вторых, для людей, которые умеют и любят считать. Более простой способ получения значения I_{RMS} 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):

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

Температура ЭК определяется рассеиваемой мощностью, а она, в свою очередь зависит от I_{RMS} 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 560 мкФ мы включим в параллель два по 470 мкФ и снизим I_{RMS} до 5 А.

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

Мощность, рассеиваемая в конденсаторе P_c и перегрев DT определяются следующим образом:

$$P_c = I_{RMS}^2 \cdot ESR = 25 \cdot 0,19 = 4,7 \text{ Вт;}$$

$$DT = P_c \cdot R_{th} = 4,7 \cdot 10,6 = 50^\circ\text{C.}$$

Значит, максимальная температура окружающей среды T_a должна быть не выше $T_{max} = 105 - 50 = 55^\circ\text{C}$.

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} будет равна:

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

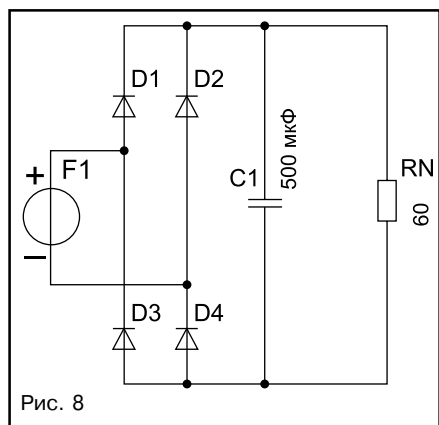


Рис. 8

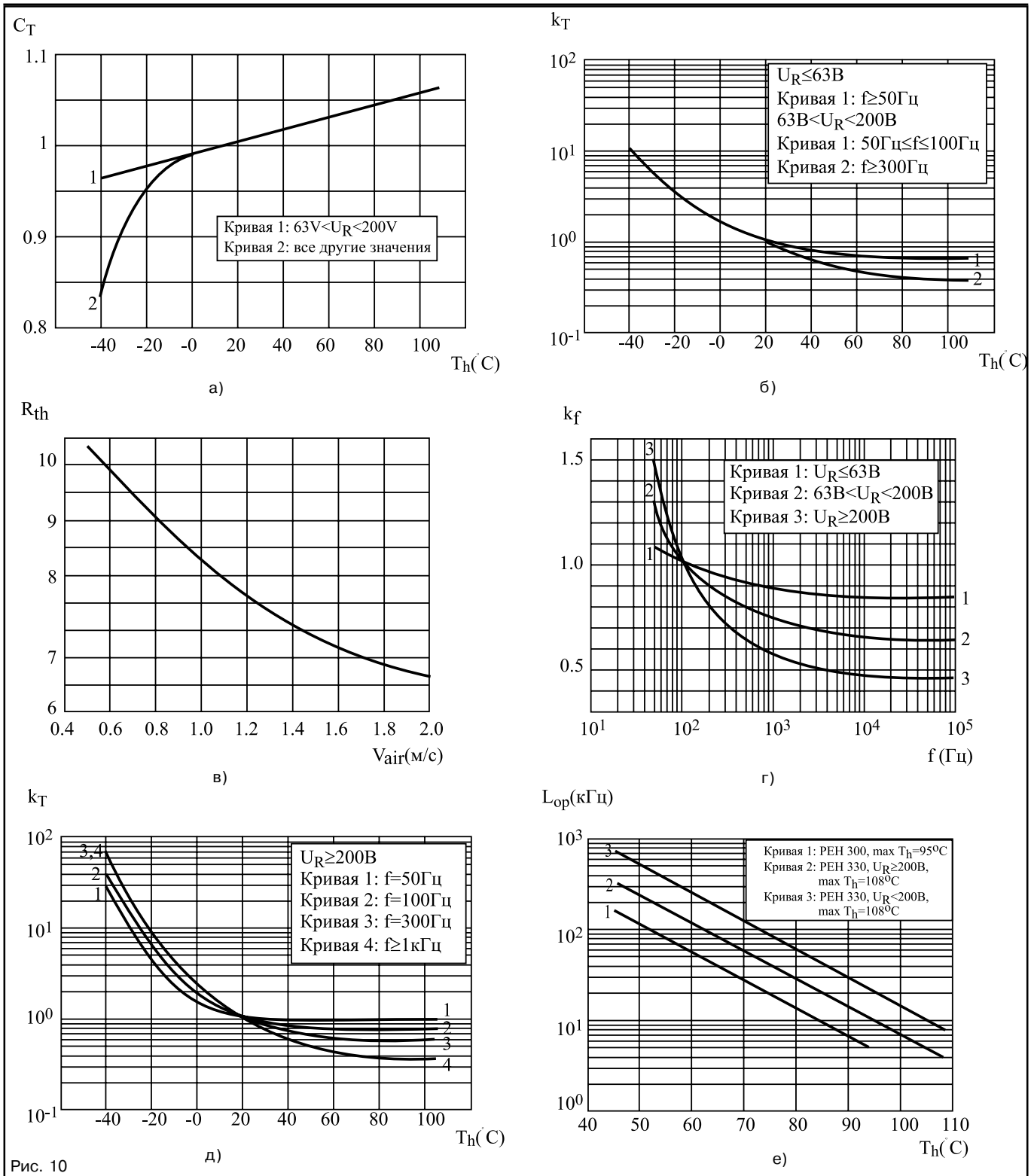


Рис. 10

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

В этом случае $I_{rms_{old}} = 4,8 A$;

$$\Delta T = P_c \cdot C \cdot R_{th} = 4,8^2 \cdot 4 \cdot 10,6 = 93^{\circ}C;$$

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

Значит, в конце срока службы температура окружающей среды не должна превышать $12^{\circ}C$! В противном случае срок службы ЭК будет много меньше паспортного значения. Таким образом, новый конденсатор может работать при $T_a = 55^{\circ}C$, и

температура перегрева будет $105^{\circ}C$, а срок службы $L_{op} = 30000$ часов. Если при такой же температуре будет работать "старый" ЭК, его температура перегрева будет $148^{\circ}C$. 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 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 (рис. 10).

Пример: рассчитать для схемы (рис. 8) минимальный срок службы ЭК 470 мкФ/400 В/105 $^{\circ}C$, размером 35 г 50, при условии, что температура окружающего воздуха — $40^{\circ}C$.

1. Из справочных данных берется ESR для $20^{\circ}C$ и 100 Гц и пересчитывается с учетом частотного коэффициента k_f (график на рис. 10г). В нашем случае $k_f = 1$. ESR = 190 мОм.

- Рассчитывается среднеквадратичное значение тока пульсаций $I_{rmsc} = 5$ А при параллельной установке двух ЭК, 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 графика на рис. 10в.
- Найденное значение ESR изменяется с учетом температурного коэффициента k_t (график на рис. 10д, кривая 2) при температуре перегрева для нового конденсатора $T_{hs} = T_a + DT = 90^\circ\text{C}$, $k_t = 0,8$. $ESR = 190 \cdot 0,8 = 152$ мОм. Теперь можно откорректировать значение температуры перегрева $T_{hs} = T_a + DT = 40^\circ + R_c \cdot I_{th} = 40 + 25 \cdot 0,152 \cdot 4 \cdot 10,6 = 80^\circ\text{C}$.
- По графику на рис. 10е определяется срок службы L_{op} при температуре $T_{hs} = 80^\circ\text{C}$ $L_{op} @ 15000$.
- Уточняется значение срока службы с учетом коэффициента нагрузки по напряжению $k_u = 310/400 = 0,78$ по формуле (5.1) при $n = 5$, $L_{op} = 15000/(0,78)^5 = 50000$.

10.3. Фильтр импульсного источника питания

Рассмотрим работу сглаживающего LC-фильтра импульсного источника питания, схема которого приведена на рис. 11. В данной схеме ЭК выполняет две задачи – вместе с индуктивностью $L1$ образует сглаживающий фильтр, обеспечивающий требуемое значение амплитуды пульсаций; не позволяет выходному напряжению выходить из допуска при изменении сопротивления нагрузки.

Пример: выбрать и рассчитать параметры ЭК для схемы (рис. 11), работающей при следующих условиях:

- | выходное напряжение – 200 В;
- | выходной ток – 0,3...3 А;
- | амплитуда пульсаций выходного напряжения – 3 В;
- | изменение напряжения при измене-

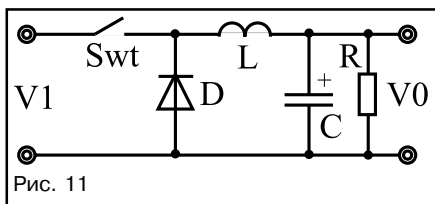


Рис. 11

- нии тока нагрузки – 0,5 В;
- | входное напряжение – 280 (20 В);
- | частота переключений – 5 кГц;
- | диапазон рабочих температур – 0–40°C.

Первый шаг при расчете подобной схемы – выбор индуктивности. Эпюры тока индуктивности i_{ind} , тока конденсатора I_c и среднеквадратичное значение тока конденсатора I_{rmsc} показаны на рисунке 12. Используя известное выражение $U = L di/dt$, получим:

$$L = (V1 - V0) \cdot C \cdot D_{max} T / DI_L \quad (10.3)$$

где $V1$ – входное напряжение; $V0$ – выходное напряжение; DI_L – пиковый ток в индуктивности, его значение обычно ограничено характеристиками силового ключа, ($I_L = 20$ А; DT – длительность импульса включения; D_{max} – максимальная скважность, $D_{max} = 0,2$; T – период, $T = 200$ мкс. Отсюда $L @ 0,2$ мГн.

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

$$t_s = \frac{\Delta I_0 \cdot L}{V_0 \left(\frac{D_S}{D_{max}} - 1 \right)} = \frac{2,7 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{200 \left(\frac{0,21}{0,2} - 1 \right)} = 50 \cdot 10^{-6} \quad (10.4)$$

D_S – скважность, допустимая в течение

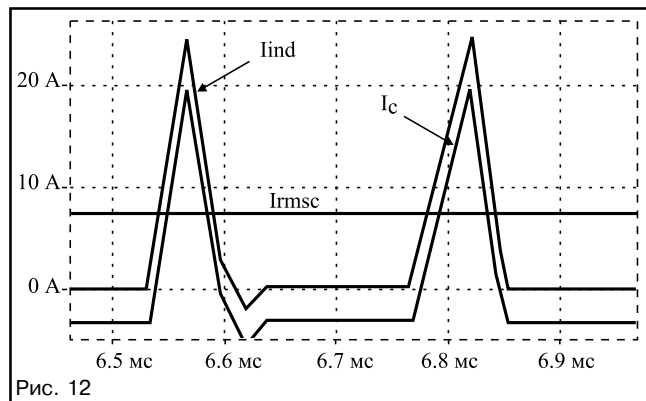


Рис. 12

времени t_s , например $D_S = 0,21$.

Теперь можно определить минимальную величину емкости, исходя из соотношения:

$$C > t_s \cdot DI_0 / (V_0 = 50 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 2,7 / 0,3 = 450 \cdot 4 \cdot 10^{-6}$$

напряжение пульсаций имеет две основных составляющих. Первая – падение напряжения на паразитной индуктивности конденсатора V_{LC} . Практически весь ток пульсаций на индуктивности DI_L течет через конденсатор (рис. 12). Напряжение V_{LC} , создаваемое на паразитной индуктивности ЭК – L_C , имеет прямоугольную форму. Оно максимально при минимальной скважности импульсов.

$$V_{LC} = L_C \cdot C \cdot di_c/dt = L_C \cdot C \cdot DI_L / DT \quad (10.6)$$

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

$$D_{min} = D_{max} \cdot V1_{min} / V1_{max} = 0,2 \cdot 260 / 300 = 0,17 \quad (10.7)$$

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

$$V_{RC} = DI_L \cdot R_C \quad (10.8)$$

Для нашей схемы используем конденсатор 470 мкФ/400 В/105°C. Он имеет ESR = 150 мОм (100 Гц, 20°C) и $L_C = 8$ нГн. Определим составляющие напряжения пульсаций:

$$V_{RC} = 20 \cdot 0,15 = 3 \text{ В}, V_{LC} = 8 \cdot 4 \cdot 10^{-9} \cdot C \cdot 20 / 34 \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 0,005 \text{ В}.$$

Форма напряжения за счет индуктивной составляющей V_{LC} показана на рис. 13. Как видно, ей можно пренебречь.

Таким образом, основной составляющей напряжения пульсаций является активная. Если мы введем поправку ESR по температуре ($k_T = 2$ при 0°C), то при ESR = 0,3 Ом, $V_{RC} = 20 \cdot 0,3 = 4,8$ В. 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.

Расчет срока службы ЭК для данной схемы по методике, описанной в 10б, производится следующим образом:

1. Из справочных данных берется ESR для 20°C и 100 Гц и пересчитывается с учетом частотного коэффициента k_f (кривая 3 на рис.

10г). В нашем случае $k_f = 0,5$, ESR = 75 мОм.

2. С помощью моделирования получа-

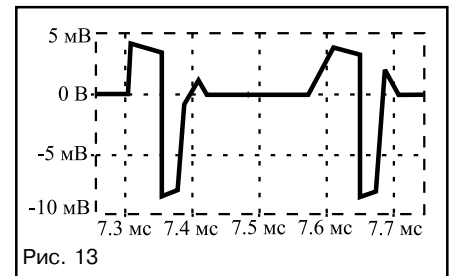


Рис. 13

ем $I_{rmsc} = 7$ А. Рассчитываем мощность потерь и температуру перегрева $R_c = I_{rmsc}^2 \cdot C \cdot ESR = 49 \cdot 0,075 = 6$ Вт, $DT = R_c \cdot I_{th} = 6 \cdot 4 \cdot 10,6 = 63^\circ\text{C}$.

3. Найденное значение ESR изменяется с учетом температурного коэффициента k_t (кривая 4 на рис. 10д) при температуре перегрева для нового конденсатора $T_{hs} = T_a + DT = 100^\circ\text{C}$, $k_t = 0,4$, ESR = 75 $\cdot 0,4 = 30$ мОм. Теперь можно откорректировать значение температуры перегрева $T_{hs} = T_a + DT = 40^\circ + R_c \cdot I_{th} = 40 + 49 \cdot 0,03 \cdot 4 \cdot 10,6 = 56^\circ\text{C}$. Обратите внимание, что коэффициент k_t практически не изменяется в диапазоне 60–100°C, поэтому ошибка расчета из-за снижения температуры со 100°C до 56°C невелика.

4. По рис. 10е определяется срок службы L_{op} при температуре $T_{hs} = 80^\circ\text{C}$: $L_{op} @ 50000$ часов.

Андрей Колпаков,
kai@megachip.ru