

ШАГ 4. Расчет минимальной частоты переключения

Минимальная частота переключения получается при максимальной нагрузке и минимальном входном напряжении, т.е. при максимальной добротности $Q_{\max}$ и при $\text{Im}(Z_{\text{in}}) = 0$:

$$\left(x - \frac{1}{x} + \frac{x \cdot k}{1 + k^2 \cdot x^2 \cdot Q_{\max}^2} \right) = 0.$$

Рассчитать $F_{\min}$ можно, исходя из $X_{\min}$:

$$X_{\min} = \frac{1}{\sqrt{1 + k \cdot \left(1 - \frac{1}{M_{\max}^2} \right)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + k \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{2n \cdot V_{\text{out}}}{V_{\text{in}_{\min}}} \right)^2} \right]}}.$$

$$X_{\min} = 0,607$$

$$F_{\min} = x_{\min} \cdot F_{\text{rl}} = 60,7 \text{ КГц}$$

ШАГ 5. Расчет L_r , C_r и L_m

Значения L_r , C_r и L_m рассчитываются, исходя из $Q_{\max}$:

$$R_{\text{LOAD}} = \frac{V_{\text{out}}}{I_{\text{out}}} = \frac{24 \text{ В}}{10 \text{ А}} = 2,4 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{ac}} = \frac{8 \cdot n^2 \cdot R_{\text{LOAD}}}{\pi^2} = \frac{8 \cdot 9^2 \cdot 2,4}{\pi^2} = 157,57 \text{ Ом}$$

$$L_r = \frac{Q_{\max} \cdot R_{\text{ac}}}{2 \cdot \pi \cdot F_{\text{rl}}} = \frac{0,456 \cdot 157,57}{2 \cdot \pi \cdot 100 \text{ К}} = 114 \text{ мкГн},$$

$$C_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_{\text{rl}} \cdot Q_{\max} \cdot R_{\text{ac}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \text{ К} \cdot 0,456 \cdot 157,7} = 22,2 \text{ нФ}.$$

Выберем ближайшее значение из ряда $C_r = 22 \text{ нФ}$.

Пересчитаем значение F_{rl} , чтобы сохранить $Q_{\max}$ при выбранном значении C_r :

$$F_{\text{rl}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_r \cdot Q_{\max} \cdot R_{\text{ac}}} = 100,7 \text{ КГц}.$$

Пересчитаем L_r :

$$L_r = \frac{Q_{\max} \cdot R_{\text{ac}}}{2 \cdot \pi \cdot F_{\text{rl}}} = 113 \text{ мкГн}.$$

Чтобы оставаться в режиме ПНН, реальное значение L_r должно быть меньше рассчитанного. Теперь рассчитаем L_m из L_r и k :

$$L_m = L_r \cdot k = 113 \cdot 5 = 565 \text{ мкГн}.$$

Следует помнить, что суммарное значение индуктивности первичной стороны равно:

$$L_p = L_m + L_r = 678 \text{ мкГн}.$$

Для упрощения мощной части преобразователя резонансный дроссель часто совмещают с трансформатором,

используя для этого каркас с двумя секциями (см. рис. 6).

Связь между первичной и вторичной обмотками гораздо хуже, когда они намотаны на такой каркас, чем при намотке на одиночный. Из-за этого индуктивность утечки достаточно велика и может использоваться в качестве резонансной. При этом используется меньше элементов, и уменьшаются потери на проводимость. Индуктивность первичной обмотки L_p измеряется при разомкнутых вторичных обмотках, а индуктивность утечки — при замкнутых.

ШАГ 6. Расчет количества витков первичной и вторичной обмоток

Используем стандартное выражение для расчета количества витков первичной обмотки трансформатора полумостового преобразователя:

$$N_p = \frac{V_{\text{in}_{\min}} \cdot D_{\max}}{2 \cdot \Delta B \cdot A_e \cdot F_{\min}},$$

где $\Delta B = 0,2 \text{ Тл}$, $A_e = 2,11 \text{ см}^2$ (для сердечника ETD49), $F_{\min} = 60 \text{ КГц}$, $V_{\text{in}_{\min}} = 350 \text{ В}$, $D_{\max} = 0,5$.

Получаем:

$$N_p = \frac{350 \cdot 0,5}{2 \cdot 0,2 \cdot 2,11 \cdot 60} \times 10 = 35,$$

$$N_s = \frac{N_p}{n} = \frac{35}{9} = 3,89.$$

Выбираем $N_s = 4$.

Пересчитываем N_p :

$$N_p = N_s \cdot n = 4 \cdot 9 = 36.$$

ШАГ 7. Расчет токов первичной и вторичной обмоток трансформатора

Большинство резонансных LLC-преобразователей разрабатывается таким образом, чтобы минимальная частота переключения была ниже резонансной частоты F_{rl} . Это делается для того, чтобы обеспечить возможность регулирования выходного напряжения при пониженном входном напряжении и максимальной нагрузке. В этом режиме временные диаграммы тока первичной обмотки трансформатора выглядят так, как показано на рисунке 7.

I_1 — значение тока, когда резонансный ток через L_r равен току намагничивания через L_m , также — это точка конца первой резонансной полуволны. В этой точке энергия перестает передаваться в нагрузку, и выходные диоды выключаются, C_r начинает резонировать с $L_r + L_m$ до тех пор, пока транзисторы полумоста не сменят свое состояние и не начнется вторая полуволна. I_1 может быть рассчитан как:

$$I_1 = \frac{n \cdot V_{\text{out}}}{2 \cdot L_m \cdot 2 \cdot F_{\text{rl}}} = 0,95 \text{ А}.$$

Пиковое и среднеквадратичное значения тока соответственно равны:

$$I_{\text{pri(pk)}} = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{out}} \cdot \pi}{2 \cdot n} \right)^2 + I_1^2} = 1,99 \text{ А},$$

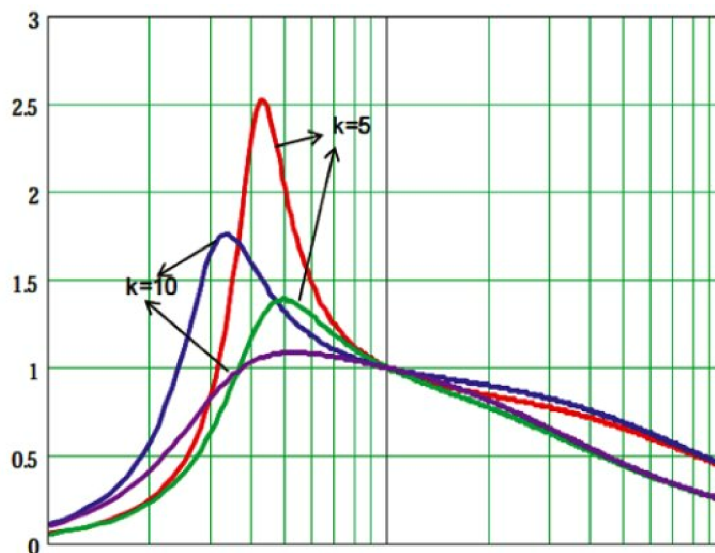


Рис. 5. Влияние k на вид передаточных характеристик

$$I_{priRMS} = \frac{I_{pri(pk)}}{\sqrt{2}} = 1,4A.$$

Среднеквадратичное значение тока рассчитывается для случая, когда ток имеет форму чистого синуса, поэтому его реальное значение будет немного выше. Форма тока в каждой из вторичных обмоток очень близка к полусинусоиде, поэтому пиковое и среднеквадратичное значения тока вторичных обмоток могут быть рассчитаны по формулам:

$$I_{spk} = \frac{I_{out} \cdot \pi}{2} = 15,7A$$

$$I_{srms} = \frac{I_{out} \cdot \pi}{4} = 7,85A.$$

Диаметры проводов первичной и вторичной обмоток должны быть выбраны с учетом рассчитанных среднеквадратичных значений токов.

ШАГ 8. Расчет напряжения на резонансном конденсаторе

Временные диаграммы напряжения и тока через конденсатор C_r представлены на рисунке 8. I_{Lm} — ток намагничивания первичной обмотки трансформатора, не включающий ток, который передается в нагрузку через идеальный трансформатор, включенный параллельно L_m (см. рис. 9). Разница между током I_L и I_{Lm} является током нагрузки.

Напряжение на конденсаторе V_{C_r} достигает максимума, когда ток через индуктивность L_r пересекает ноль, V_{C_r} равно половине входного напряжения, когда ток через L_r имеет максимальное значение. При этом напряжение на C_r максимально, когда напряжение на средней точке (VS) равно нулю и минимально, когда напряжение на VS равно входному, поэтому они могут быть рассчитаны так:

$$V_{C_{rmax}} = n \cdot V_{out} + I_{pri(pk)} \times \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

$$V_{C_{rmin}} = V_{in} - n \cdot V_{out} - I_{pri(pk)} \times \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}.$$

Размах напряжения V_{C_r} равен $V_{C_{rmax}} - V_{C_{rmin}}$:

$$V_{C_{rp_pk}} = 2n \cdot V_{out} + 2 \cdot I_{pri(pk)} \times \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} - V_{in}.$$

Максимальный размах напряжения на конденсаторе получается при максимальной нагрузке и минимальном входном напряжении, т.е. при минимальной частоте переключения F_{min} . В нашем примере:

$$V_{C_{rp_pk}} = 2n \cdot V_{out} + 2 \cdot I_{pri(pk)} \times \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} - V_{in}.$$

Резонансный конденсатор C_r выбирается, исходя из значения рассчитанной емкости, напряжения и тока через конденсатор. Для снижения потерь в качестве C_r рекомендуется использовать полипропиленовый пленочный конденсатор. При выборе конденсатора следует учитывать, что характеристики по напряжению этого типа конденсаторов даны для работы на постоянном напряжении либо на переменном напряжении частотой 50 Гц, т.е. конденсатор имеет дополнительное ограничение по напряжению при работе на высоких частотах. Способность конденсатора выдерживать напряжение высокой частоты ограничена значениями максимальной рассеиваемой мощности и пикового тока. Поэтому, если даже по результатам расчетов максимальное среднеквадратичное напряжение на конденсаторе равно 130 В, следует выбрать конденсатор с более высокими характеристиками по напряжению с учетом зависимости максимально допустимого напряжения от частоты.

РАСЧЕТ ПАСИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОБВЯЗКИ IRS2795

ШАГ 9. Расчет минимального мертвого времени для режима ПНН при максимальном входном напряжении и на холостом ходу

В резонансном полумостовом преобразователе частота переключения максимальна на холостом ходу и при максимальном напряжении на входе. Теоретически, при частоте переключения ниже резонансной преобразователь должен находиться в режиме ПНН, однако в реальности это только одно из необходимых условий режима ПНН. Второе условие требует, чтобы эквивалентная паразитная емкость средней точки (VS) была полностью заряжена/разряжена в течение длительности мертвого времени.

На рисунке 10 показано, что при недостаточной длительности мертвого времени транзисторы переключаются в жестком режиме, даже при условии работы