

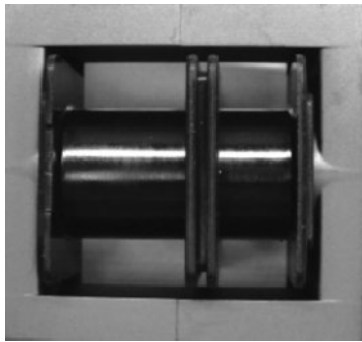


Рис. 6. Сердечник с двухсекционным каркасом

преобразователя на частоте ниже резонансной. Чтобы обеспечить работу преобразователя в режиме ПНН, необходимо рассчитать минимальное время, необходимое для полного заряда/разряда эквивалентной емкости средней точки.

Эквивалентная емкость заряжается/разряжается первичным током трансформатора, поэтому нулевая нагрузка и максимальное входное напряжение являются наихудшими условиями, т.к. при этом ток вторичной обмотки трансформатора равен нулю и в первичном контуре протекает только ток намагничивания. Пиковое значение этого тока равно:

$$I'_{pri}(pk) = \frac{n \cdot V_{out}}{4F_{max} \cdot (L_r + L_m)},$$

$$I'_{pri}(pk) = 0,53A.$$

Суммарная эквивалентная емкость средней точки C_{HB} показана на рисунке 11.

$$C_{HB} = 2 \cdot C_{oss_eff} + C_{rss_eff} + C_{well} + C_s.$$

C_{HB} включает:

- C_{oss} двух транзисторов;
- C_{rss} нижнего транзистора. C_{rss} обычно указывается для напряжения $V_{DS} = 25V$ и уменьшается с ростом этого напряжения, поэтому в качестве эффективного значения можно взять половину значения C_{rss} ;
- C_{well} — емкость утечки драйвера верхнего плеча IRS2795, равная примерно 5 пФ;
- демпфирующий конденсатор C_s (если используется).

Для примера рассчитаем время заряда/разряда C_{HB} при использовании транзистора STF13NM50N в схеме без демпфирующего конденсатора.

$$C_{oss_eff} = 110 \text{ пФ} \cdot C_{rss_eff} = 2,5 \text{ пФ} \cdot C_{well} = 5 \text{ пФ}, C_s = 0 \text{ пФ},$$

$$T_{ch} = \frac{C_{HB} \cdot V_{in_max}}{I'_{pri}(pk)},$$

$$T_{ch} = 185 \text{ нс}.$$

При расчете мертвого времени также необходимо учесть время спада выходного напряжения драйвера затвора IRS2795. Временные диаграммы выключения MOSFET-транзистора представлены на рисунке 12; для примера взят вывод LO и нижний транзистор.

В расчет мертвого времени должно быть включено только время t_1 , т.к. время заряда средней точки начинается с t_2 и уже включено в T_{ch} . На протяжении t_1 напряжение V_{DS} равно 0, и затвор транзистора является просто емкостной нагрузкой для драйвера. Поэтому время разряда t_1 можно рассчитать через постоянную времени RC-цепи затвора:

$$t_1 = -RC_{geq} \ln \frac{V'_m}{V_G},$$

где

$$R = R_{down_eff} + R_g + R_{gFET}$$

$$C_{geq} = \frac{(Q_q - Q_{gd} - Q_{gs})}{V_{gs} - V_m}$$

$$V'_m \approx V_{gs(th)}$$

$$V_G = V_{CC}.$$

R_{down_eff} — подтянутое к земле сопротивление драйвера IRS2795 (6 Ом);

R_g — токоограничивающий резистор затвора;

R_{gFET} — входное сопротивление затвора транзистора.

Эквивалентная емкость затвора для STF13NM50 равна 2,32 нФ, входное сопротивление затвора равно 5 Ом, $V_{gs(th)}$ равно 3 В. Если $V_{CC} = 15V$, $R_g = 10 \text{ Ом}$ получаем:

$$t_1 = 78,4 \text{ нс}.$$

Мертвое время должно быть больше суммы T_{ch} и t_1 , поэтому следует добавить 50 нс к рассчитанному значению. Минимальное мертвое время получается равным:

$$T_{DT} = T_{ch} + t_1 + 50 \text{ нс} = 313 \text{ нс}.$$

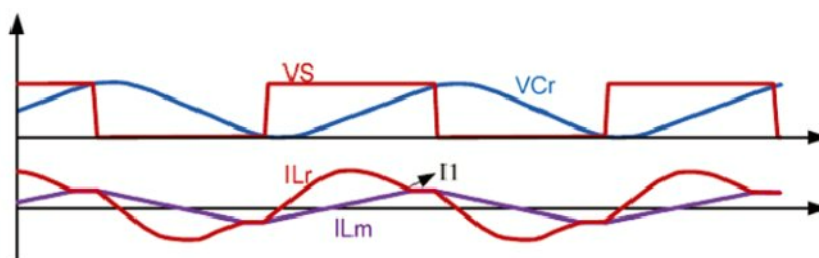


Рис. 7. Ток первичной обмотки трансформатора при полной нагрузке и минимальном входном напряжении

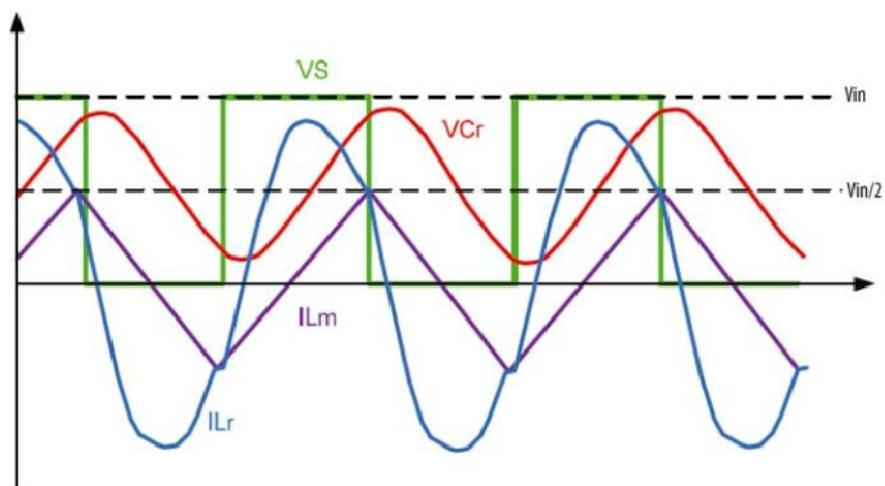


Рис. 8. Напряжения и токи в LLC-резонансном контуре

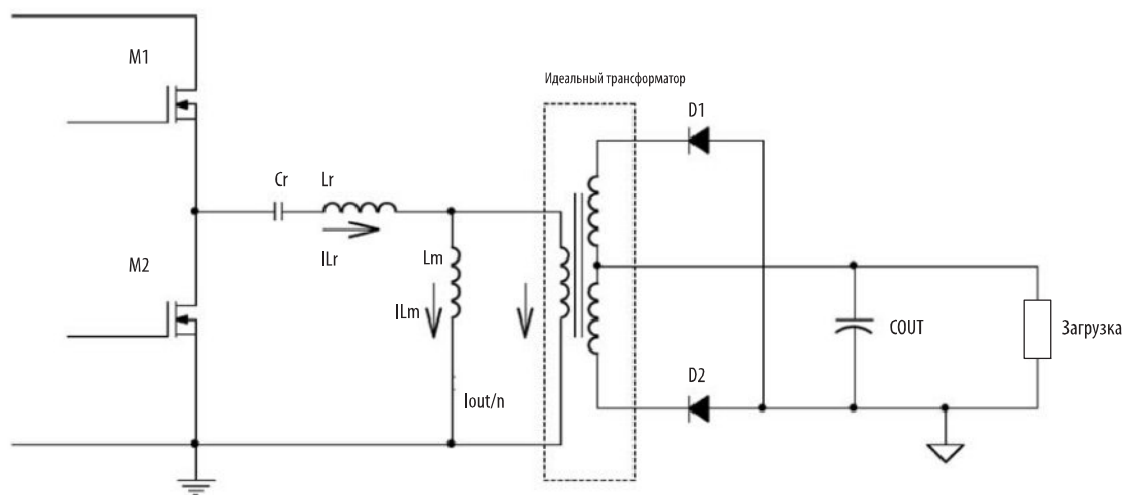


Рис. 9. Разделение трансформатора на идеальный и L_m

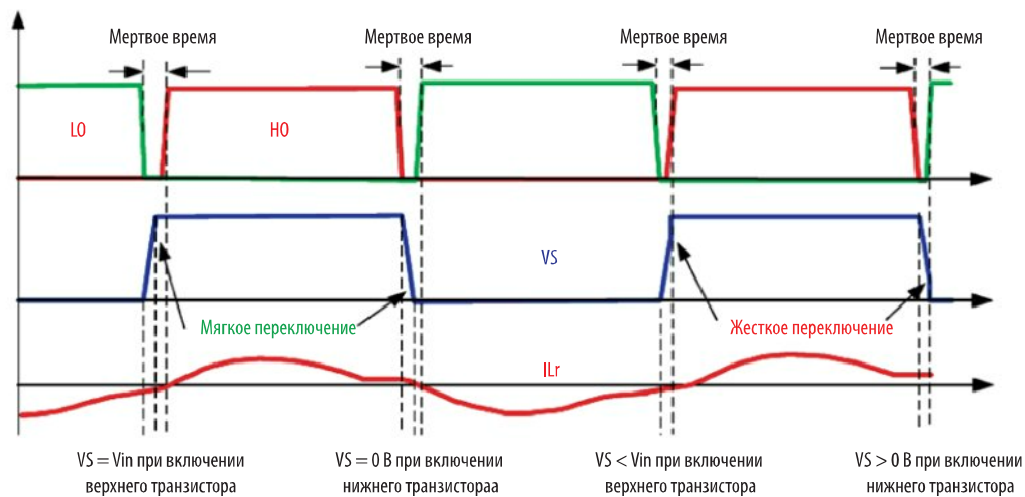


Рис. 10. Мягкое и жесткое переключение транзисторов на частоте ниже резонансной