

Оптимальная эффективность: расчет потерь ферритовых сердечников

В последнее время особую популярность приобрела новая программа, позволяющая разработчикам источников питания выбрать оптимальный ферритовый сердечник для специфических применений. Данная программа разработана инженерами компании EPCOS, она позволяет рассчитать реальные потери в сердечнике и разработать преобразователь с заданными параметрами эффективности. Такая оптимизация энергоэффективности источника питания для конкретных условий работы помогает снизить его себестоимость и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Пробал Мухеджи (Probal Mukherjee)

webmaster@epcos.com

Перевод: Олег Гнеушев

oleg.gneushev@siemens.com

Рассеиваемая мощность силовых сердечников определяется петлей гистерезиса ферритового материала, а также величиной магнитной индукции. Немалую роль также играет и рабочая температура. Как правило, большинство производителей силовых ферритов предоставляют подробные данные о потерях в сердечнике и о потерях, связанных с конкретным ферритовым материалом. Замеры потерь в сердечнике обычно даются исходя из синусоидальной формы индукции намагничивания при работе. Однако синусоидальная форма индукции при работе встречается довольно редко, особенно в таких применениях, как импульсные источники питания.

Таким образом, данные производителей ферритовых сердечников, основанные на идеальной синусоидальной форме магнитной индукции, едва ли можно использовать на практике.

Математическая модель, разработанная компанией EPCOS, позволяет в простой и понятной форме excel-нограмм рассчитать потери в сердечнике при работе с реальными формами сигналов, которые преобладают при данном применении. Такие номограммы могут быть использованы при расчетах и разработке источников питания и успешно послужат для выбора силового феррита, чье поведение наилучшим образом удовлетворяет заданным требованиям в реальных условиях.

Эквивалентные синусоидальные сигналы

Как правило, удельные потери p_{sin} в ферритовом сердечнике для индукции с амплитудой B и кривой намагничивания синусоидальной формы рассчитываются по уравнению Стейнмеца:

$$p_{\text{sin}} = C_m f^X B^Y (C_{12} T^2 - C_{11} T + C_{10}), \quad (1)$$

где f — частота, T — рабочая температура, C_m , C_{11} , C_{12} — константы материала, X — степень частоты Стейнмеца и Y — индукция Стейнмеца, определяемые конкретными рабочими условиями.

Для расчета потерь в случае индукции несинусоидальной формы Албах, Дурбаум и Брокмайер усовершенствовали вышеприведенную формулу:

$$p_{\text{gen}} = f C_m f_{\text{sin eq}}^{(X-1)} B^Y (C_{12} T^2 - C_{11} T + C_{10}). \quad (2)$$

Данное уравнение позволяет представить периодический произвольный сигнал $B(t)$ с двумя экстремумами (B_{max} и B_{min}) в виде эквивалентного синусоидального сигнала:

$$\frac{1}{f} \int_0^f \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt = \frac{\pi^2}{2} f_{\text{sin eq}} (B_{\text{max}} - B_{\text{min}})^2. \quad (3)$$

Для формы периодического сигнала с $k-1$ линейными сегментами интеграл может быть заменен на сумму:

$$f_{\text{sin eq}} = \frac{2}{\pi^2} \sum_{k=2}^k \left(\frac{B_k - B_{k-1}}{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}} \right)^2 \frac{1}{t_k - t_{k-1}}. \quad (4)$$

Переменная r — соотношение частоты эквивалентного синусоидального сигнала и частоты реального сигнала — равна:

$$r = f_{\text{sin eq}} / f. \quad (5)$$

Тогда из уравнений (1), (2) и (5) получаем:

$$p_{\text{gen}} = r^{(X-1)} p_{\text{sin}}, \quad (6)$$

где $r^{(X-1)}$ — это отношение реальных потерь в преобразователе к величине потерь при синусоидальной форме сигнала, имеющего ту же частоту и амплитуду индукции при той же температуре. При этом важно, чтобы реальный сигнал в течение одного

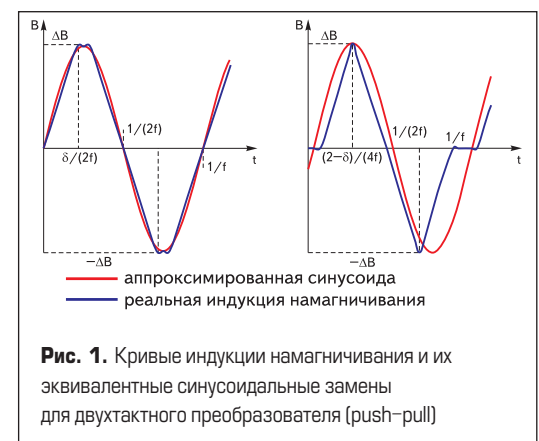
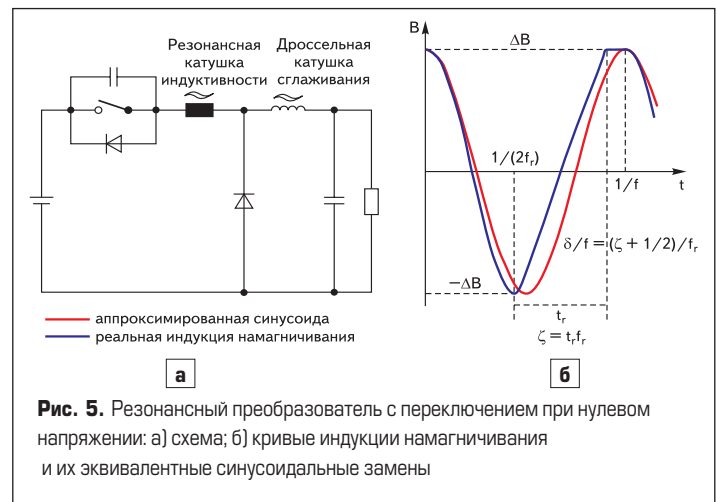
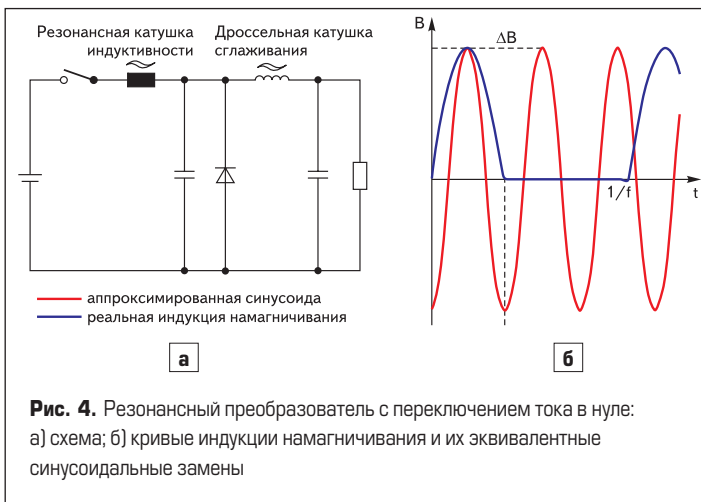
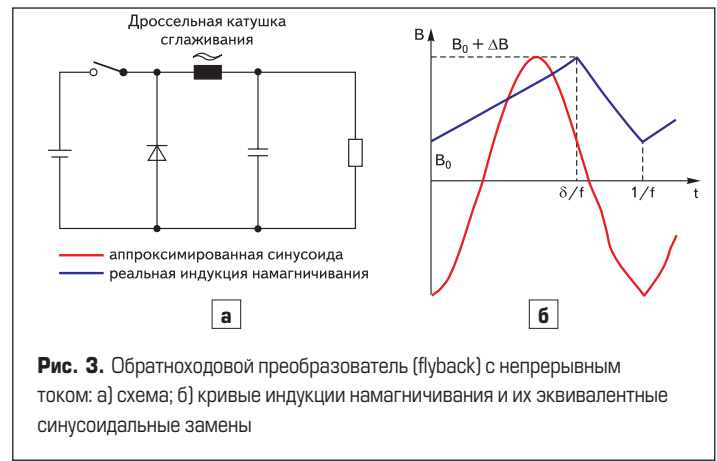
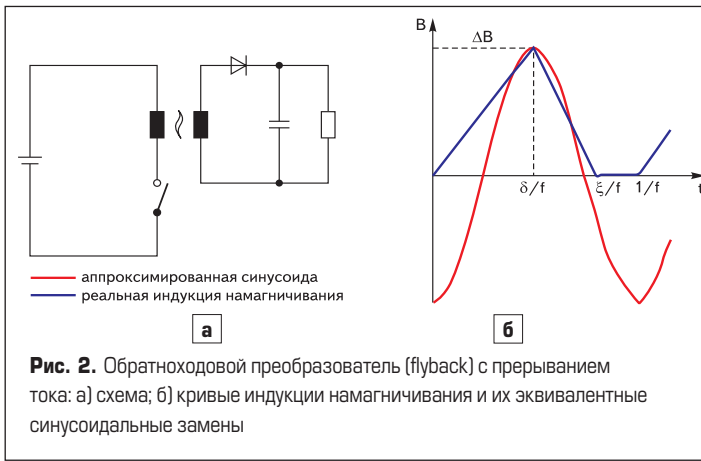


Рис. 1. Кривые индукции намагничивания и их эквивалентные синусоидальные замены для двухтактного преобразователя (push-pull)



цикла описывал только одну петлю гистерезиса и имел за цикл только один максимум и минимум.

На рис. 1–5 приведены основные схемы импульсных источников питания, а также кривые индукции намагничивания в таких схемах и их эквивалентные синусоидальные замены. Значение r рассчитано для трех конкретных случаев с использованием значений коэффициента заполнения рабочего цикла δ , фазы затухания ξ и резонансной частоты (для резонансных преобразователей).

Коэффициент заполнения $0 < \delta \leq 1$, для обоих случаев из уравнения (4) следует:

$$r = 8 / (\pi^2 \delta). \quad (7)$$

Частотное соотношение при $0 < \delta < \xi \leq 1$ с фазой затухания ξ из уравнения (4) равно:

$$r = 2 / \pi^2 \times \xi / \delta (\xi - \delta). \quad (8)$$

Частотное соотношение при $0 < \delta \leq 1$ из уравнения (4) равно:

$$r = \frac{2}{\pi^2} \times \frac{1}{\delta(1-\delta)}. \quad (9)$$

Частотное соотношение при $0 < \delta \leq 1$, из уравнения 3 для резонансной частоты получаем:

$$2fr = f\delta \text{ und } r = 1/\delta. \quad (10)$$

Значение r определяется исходя из резонансной частоты f_r , времени заряда индуктивности t_r и уравнения (3):

$$r = \frac{2}{\pi^2} \left(\frac{1}{2} + \zeta \right) \left(\frac{\pi^2}{4} + \frac{1}{\zeta} \right), \quad (11)$$

где $\zeta = t_r \times f_r$.

Соотношение реальных и синусоидальных потерь в сердечнике

Величина r зависит от топологии преобразователя и показана на рис. 6 и 7.

Таким образом, видно, что для двухтактного преобразователя и для обоих типов ре-

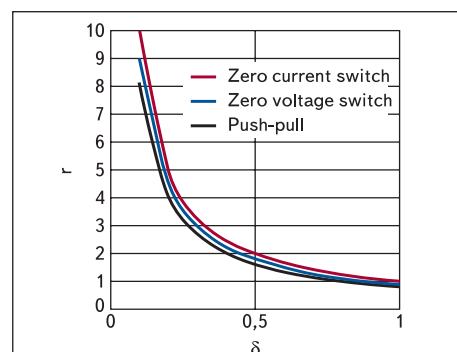


Рис. 6. График зависимости r от δ для различных топологий преобразователей

зонансных преобразователей при увеличении коэффициента заполнения рабочего цикла значение r уменьшается, а для обратногоходовых преобразователей значение r растет вместе с ростом асимметрии рабочего цикла.

Соотношение между реальными потерями и потерями на синусоиде $r^{(X-1)}$ увеличивается вместе с ростом индукции и приближением рабочего цикла к 1 для двухтактного преобразователя (приближение к симметрии для обратногоходового преобразователя), но уменьшается с ростом индукции для малого коэффициента заполнения (при асимметрии для flyback-преобразователя). Этот эффект показан на рис. 8 и 9.

Однако $r^{(X-1)}$ уменьшается с понижением температуры при рабочем цикле, близком к 1, для двухтактного преобразователя (приближение к симметрии для обратногоходового пре-

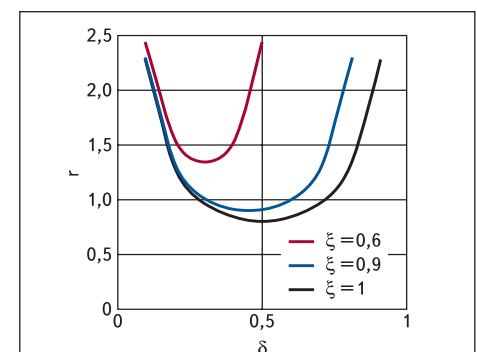


Рис. 7. График зависимости r от δ для различных значений ζ

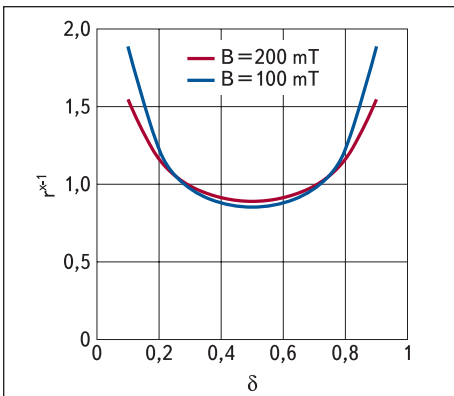


Рис. 8. Зависимость $r^{(X-1)}$ от δ для обратноходового преобразователя на примере материала N97 при 100 °C

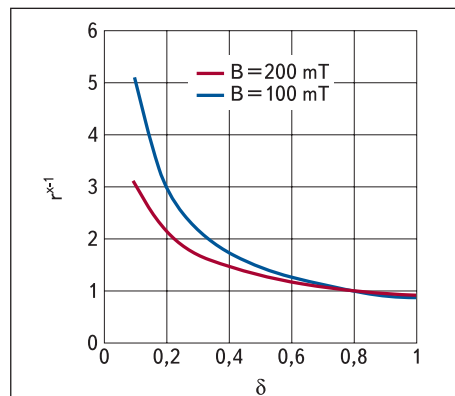


Рис. 9. Зависимость $r^{(X-1)}$ от δ для двухтактного преобразователя на примере материала N97 при 100 °C

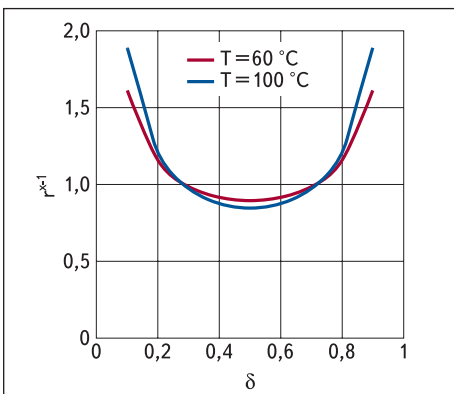


Рис. 10. Зависимость $r^{(X-1)}$ от δ для обратноходового преобразователя на примере материала N97 при $B = 100$ мТл

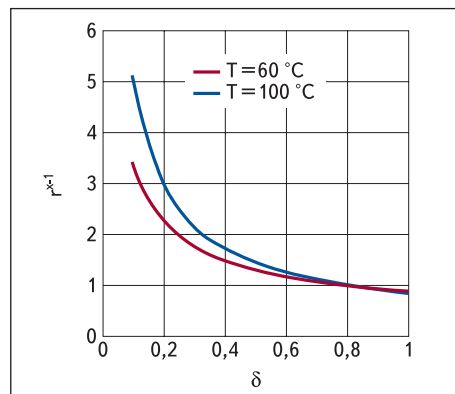


Рис. 11. Зависимость $r^{(X-1)}$ от δ для двухтактного преобразователя на примере материала N97 при $B = 100$ мТл

образователя) и, наоборот, растет при низком коэффициенте заполнения (при увеличении асимметричности) (рис. 10 и 11).

Следовательно, при низком коэффициенте заполнения для двухтактного преобразователя (или сильной асимметрии для обратноходового преобразователя) следует проектировать работу при относительно низкой температуре и достаточно высокой индукции намагничивания.

Для рабочего цикла со значениями $r < 1$, $r^{(X-1)} < 1$ реальные потери в сердечнике будут ниже, чем при синусоидальном сигнале.

В помощь разработчикам

Компания EPCOS разработала простую и удобную в использовании программу для расчетов режимов работы ферритовых сердечников из материалов N49, N87, N92, N95 и N97 для преобразователей различных типов на основе приведенных выше формул. Данная программа обеспечивает расчеты в диапазоне рабочих частот от 25 до 1000 кГц, индукции намагничивания от 25 до 300 мТл, рабочих температур от 25 до 120 °C для различных значений коэффициента заполнения рабочего цикла. Программа строит графики зависимости r , $r^{(X-1)}$ от коэффициента заполнения, удельных потерь в зависимости от температуры, индукции намагничивания и частоты. Эти диаграммы помогают не только выбрать правильный материал сердечника, но также рассчитать реальные потери в преобразователе и оптимизировать их. Данную программу можно скачать на сайте компании EPCOS AG: <http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/DesignTools/Ferrites/Page,locale=en.html>.