

Трансформаторы и дроссели для импульсных источников питания

Потери в проводе обмотки

Рассмотренный в предыдущем номере журнала пример показывает, что введение зазора в сердечник дает возможность значительно увеличить максимальный ток через КИ. Чем больше зазор, тем больший ток сможет выдержать катушка. Чтобы сохранить при этом неизменной индуктивность, обмотка должна содержать больше витков. Однако, увеличивая число витков, мы увеличиваем сопротивление обмотки. Это ведет к дополнительным потерям мощности в проводах ("потери в меди"):

$$P_{\text{обм}} = R_{\text{обм}} \cdot I^2 \text{ (Вт)}, \quad (12)$$

где $R_{\text{обм}}$ - сопротивление обмотки, Ом;

I - ток через обмотку, А.

Для расчета потерь в обмотке требуется учитывать форму тока через КИ. Например, через дроссели в фильтрах питания и во многих понижающих преобразователях течет практически постоянный ток. Для них переменная составляющая тока через КИ относительно мала и составляет 10-20% от величины постоянного тока через обмотку. Для расчета потерь в меди переменной составляющей тока можно пренебречь и использовать формулу (12) непосредственно, подставляя в нее усредненное значение тока, протекающего через дроссель.

Форма тока в первичной обмотке трансформатора двухтактного преобразователя имеет форму, близкую прямоугольной. Если обмотка имеет две половины, то каждая из них будет рассеивать 1/2 часть мощности, найденной по формуле (12).

В ИИП с прерывистым током дросселя ток будет иметь треугольную форму с паузами. В таком случае потери в проводе надо рассчитывать по формуле:

$$R_{\text{обм}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\text{обм}} \cdot I_{\text{ампл}}^2 \cdot t}{t_0 + t_1} \text{ (Вт)}, \quad (13)$$

где $I_{\text{ампл}}$ - амплитудное значение тока, А;

t_1 - время в течении которого через обмотку протекает ток треугольной формы, мкс;

t_0 - время в течении которого ток через обмотку отсутствует, мкс.

Используя более толстый обмоточный провод можно уменьшить сопротивление обмотки. В таблице 6 приведены параметры обмоточных проводов. В частности, для толстых проводов указано их сопротивление на частоте 40 кГц, являющейся довольно типичной рабочей частотой ИИП. Увеличение сопротивления с ростом частоты обусловлено так называемым скин-эффектом: на высоких частотах протекающий ток вытесняется на наружную поверхность провода. Наиболее заметно скин-эффект проявляется именно для толстых проводов, имеющих высокое отношение площади поперечного сечения к длине наружной поверхности сечения провода. Для проводов диаметром менее 0,5 мм влияние скин-эффекта на частотах до 100 кГц пренебрежимо мало. В качестве практической меры борьбы со скин-эффектом можно рекомендовать намотку в несколько проводов, причем диаметр каждого проводника желательно выбирать не более 1мм. Одновременно это облегчит и процесс намотки, поскольку совладать с толстыми проводами не так-то просто. Но не следует впадать и в другую крайность, набирая очень много тонких проводников в пучок, так как при этом процесс намотки становится чрезмерно сложным, а выигрыш незначителен. В ИИП, работающих на частотах ниже 100 кГц, не дает практических преимуществ и использование лицендрата, то есть провода заводского изготовления, состоящего из пучка тонких изолированных проводников

в общей шелковой оплетке, который предназначен для радиочастотных цепей. Опять-таки, форма тока через обмотку должна приниматься во внимание, и для большинства дросселей влияние скин-эффекта можно игнорировать.

Невозможно увеличивать сечение обмоточных проводов беспреступно, иначе обмотку не удастся разместить на сердечнике. В таком случае необходимо использовать сердечник большего размера. Большой сердечник будет иметь больший размер окна для намотки провода и, как правило, большую величину A_L . Значит, надо будет намотать меньше витков, чтобы получить ту же индуктивность. Меньше витков - меньше поток магнитной индукции в сердечнике, значит, можно уменьшить и величину зазора (в случае, когда зазор необходим). Это увеличит эквивалентную магнитную проницаемость сердечника и даст еще большую величину A_L и т.д. Обратное тоже верно: если сердечник слишком велик, то провода потребуются немного, но габариты и стоимость КИ окажутся высокими.

Вообще, степень заполнения сердечника проводом может служить неплохим косвенным признаком качества конструирования трансформатора или дросселя. Если сердечник заполнен проводом менее, чем наполовину, то, скорее всего, это свидетельствует о том, что конструкция КИ далека от оптимальной.

Трансформаторы

Эквивалентная схема трансформатора приведена на рисунке 1:

Таблица 6. Характеристики медных обмоточных проводов

Примечание: предельно допустимый постоянный ток рассчитан для плотности тока 2,565 [А/мм²]

| Диаметр [мм] | Площадь сечения, [мм ²] | Сопротивление постоянному току, [Ом/м] | Сопротивление на частоте 40 кГц, [Ом/м] | Предельно допустимый постоянный ток, [А] |
|--------------|-------------------------------------|--|---|--|
| 0.05 | 0.00196 | 9.6 | | 0.005 |
| 0.08 | 0.00503 | 3.73 | | 0.0129 |
| 0.1 | 0.00785 | 2.35 | | 0.0201 |
| 0.125 | 0.01227 | 1.486 | | 0.0315 |
| 0.14 | 0.01539 | 1.178 | | 0.0395 |
| 0.15 | 0.02011 | 0.897 | | 0.0516 |
| 0.18 | 0.02545 | 0.706 | | 0.0653 |
| 0.2 | 0.03142 | 0.57 | | 0.0806 |
| 0.224 | 0.03941 | 0.452 | | 0.1011 |
| 0.25 | 0.0491 | 0.365 | | 0.1259 |
| 0.28 | 0.06158 | 0.29 | | 0.1579 |
| 0.315 | 0.07793 | 0.229 | | 0.1999 |
| 0.355 | 0.09898 | 0.179 | | 0.2539 |
| 0.4 | 0.1257 | 0.142 | | 0.3223 |
| 0.45 | 0.159 | 0.1117 | | 0.4079 |
| 0.5 | 0.1964 | 0.0903 | | 0.5036 |
| 0.56 | 0.2463 | 0.0721 | | 0.6318 |
| 0.63 | 0.3117 | 0.0568 | | 0.7996 |
| 0.71 | 0.3959 | 0.0448 | | 1.016 |
| 0.75 | 0.4418 | 0.0402 | | 1.133 |
| 0.8 | 0.5027 | 0.0353 | | 1.289 |
| 0.85 | 0.5675 | 0.0313 | 0.0339 | 1.456 |
| 0.9 | 0.6362 | 0.0279 | 0.032 | 1.632 |
| 1 | 0.7854 | 0.0226 | 0.0254 | 2.015 |
| 1.12 | 0.9852 | 0.018 | 0.021 | 2.527 |
| 1.25 | 1.227 | 0.0145 | 0.0176 | 3.148 |
| 1.4 | 1.539 | 0.0115 | 0.0151 | 3.949 |
| 1.5 | 1.767 | 0.01003 | 0.0141 | 4.533 |

Без учета омического сопротивления обмоток и потерь в сердечнике трансформатор может быть представлен в виде индуктивности первичной обмотки L, индуктивности рассеяния L_s, емкости первичной обмотки C1 и приведенной емкости вторичной обмотки

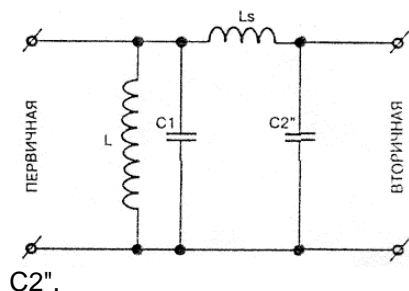


Рис.1 Эквивалентная схема трансформатора

Когда трансформатор используется для прямой передачи энергии

из первичной обмотки во вторичную, то его стремятся сконструировать таким образом, чтобы L имела максимально возможную величину. Вообще говоря, индуктивность L не играет никакой "положительной" роли в таких случаях. Увеличивая индуктивность, тем самым уменьшают собственный ток КИ, что делает ее "менее заметной" для схемы. Большая индуктивность имеет большее реактивное сопротивление и в меньшей степени шунтирует передаваемые через трансформатор импульсы. Намагничивание сердечника трансформатора происходит только тем током, который отвечает в индуктивность первичной обмотки. Электрическая энергия в трансформаторе передается из первичной обмотки во вторичную непосредственно, как бы минуя сердечник и не

намагничивая его. Соответственно, даже сравнительно малые трансформаторы способны передавать значительную мощность в нагрузку, если они имеют большую индуктивность первичной обмотки и малые потери в проводах.

Чтобы получить наибольшую индуктивность первичной обмотки, для трансформаторов используют сердечники без зазора и магнитные материалы с высокой проницаемостью. Это обеспечивает максимальные величины A_l сердечника. Кроме того, трансформаторы, как правило, должны иметь сравнительно большое число витков в первичной обмотке. Однако некоторые схемы управления ИИП работают в режиме "жесткого старта" в момент включения питания, при этом длительность импульсов может быть намного больше, чем в рабочем режиме. В результате, при запуске ИИП сердечник без зазора входит в насыщение, силовые транзисторы могут выйти из строя, а работа цепей обратной связи ИИП нарушается. Простым решением проблемы "жесткого старта" может служить введение небольшого зазора в сердечник трансформатора. Однако ни в коем случае не следует рассматривать такое решение как универсальное, поскольку зазор, помогая при старте, в нормальном режиме вызывает дополнительные потери в меди обмоток и в силовых ключах ИИП. Хорошо сконструированная схема управления обеспечит "мягкий старт" и позволит ИИП надежно работать без зазоров в сердечнике.

Исходные стадии расчета трансформаторов подробно освещены в литературных источниках. Полученное в результате таких расчетов значение минимальной необходимой индуктивности первичной обмотки следует использовать при создании трансформатора на основе изложенной выше для КИ методики, то есть выбрать из таблицы сердечник, рассчитать требуемое количество витков по формуле (7) и выбрать намоточные провода для первичной и вторичной обмоток.

После этого следует проверить, не входит ли сердечник в на-

сыщение. Зная величину индуктивности, максимальную длительность импульса и максимальное рабочее

$$I_{\text{макс}} = \frac{U \cdot t}{L} \text{ (A)}, \quad (14)$$

где U - напряжение на первичной обмотке, В;
 t - длительность импульса, мкс;
 L - индуктивность первичной обмотки, мкГн.

Подставляя полученное значение в выражение (8), находим величину плотности потока магнитной индукции в сердечнике. Как отмечалось выше, для ферритов она не должна превышать 300...500 мТ.

Выражение (14) можно преобразовать таким образом, чтобы определить требуемую величину индуктивности первичной обмотки при заданном токе магнетизации:

$$L = \frac{U \cdot t}{I} \text{ (мкГн)}, \quad (15)$$

где U - напряжение на КИ, В;
 t - длительность импульса, мкс;
 I - ток через КИ, А.

Потери в сердечнике

Однако недостаточно всего лишь избежать насыщения сердечника. Это необходимое условие

напряжение первичной обмотки, можно вычислить максимальный

нормальной работоспособности КИ, но, кроме этого, следует обеспечить приемлемый уровень потерь в материале сердечника ("потери в железе").

Никакой магнитный материал не является идеальным. Некоторые ферриты имеют относительно низкое удельное сопротивление, что вызывает потери за счет вихревых токов в сердечнике. Кроме того, при перемагничивании магнитный материал не возвращается точно в исходное состояние, кривая намагниченности всегда имеет петлю гистерезиса. Поэтому в каждом цикле работы сердечник отбирает часть энергии ИИП и превращает ее в тепло. Чем меньше ширина петли гистерезиса, тем меньше потери в магнитном

Одновременно, чем меньше частота работы ИИП, тем меньше циклов перемагничивания и меньше потерь. Кроме того, чем меньше объем сердечника тем, меньше сумма потерь в нем при той же амплитуде изменения магнитного поля.

Ширина петли гистерезиса зависит от марки материала, а также от амплитуды изменения потока магнитной индукции в сердечнике. Для дросселей, работающих при больших, но преимущественно постоян-

ток через индуктивность первичной обмотки ИИП (ток магнетизации):

ных токах обмотки, потерями в сердечнике часто можно пренебречь. Магнитное поле сердечника у таких дросселей почти постоянное, а перемагничивание происходит по так называемой частной петле гистерезиса, имеющей малую площадь и, соответственно, малые потери.

Однако это верно не всегда и, например, некоторые простейшие схемы понижающих преобразователей перемагничивают сердечник своего дросселя по большому циклу, от нуля до амплитудного значения. Для трансформаторов поток магнитной индукции меняется или от нуля до амплитудного значения (однотактные преобразователи), или от отрицательного до положительного амплитудного значения (двухтактные преобразователи). В таких случаях потери в феррите могут быть очень велики. Мне встречались неудачные конструкции трансформаторов, в которых при длительной работе пластиковый каркас обмотки расплавлялся из-за нагрева феррита.

Алексей Кузнецов

akouz@senet.com.au

Продолжение следует