



# УМЕНЬШЕНИЕ ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Известно, что сетевой трансформатор может стать основной причиной неудовлетворительной работы радиолюбительского аппарата. Во время работы он гудит, создает магнитные наводки, особенно нежелательные в звуковоспроизводящей и другой аппаратуре, где имеются усилители НЧ с большим коэффициентом усиления. Опыт показывает, что напряжение наводки часто несинусоидально — оно содержит богатый спектр частот, кратных основной частоте 50 Гц. Поэтому установка в аппаратуру защитных фильтров на эту частоту для борьбы с фоном обычно неэффективна. Мало что дает, да к тому же и практически трудно выполнимо, магнитное экранирование трансформатора, поскольку на столь низкой частоте экранирующая коробка должна иметь значительную толщину стенок. Так что же — по-прежнему относится к этому, как к неизбежному злу или попытаться найти его корень? Попробуем разобраться в физике происходящих явлений.

При подключении к сети даже ненагруженного трансформатора в его первичной обмотке будет протекать некоторый ток холостого хода  $I_{xx}$ , который создаст в магнитопроводе магнитное поле. В соответствии с законом электромагнитной индукции М. Фарадея оно наведет в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $E_1$ , пропорциональную числу ее витков  $W_1$  и скорости изменения магнитного потока  $\Phi$ :

$$E_1 = W_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

ЭДС самоиндукции почти равна приложенному к первичной обмотке напряжению сети  $U_c$  и компенсирует его. Если бы не было компенсации, через обмотку протекал бы очень большой ток, поскольку ее активное сопротивление обычно невелико. Магнитный поток  $\Phi$  равен произведению магнитной индукции  $B$  на площадь  $S$  поперечного сечения магнитопровода трансформатора:

$$\Phi = BS \quad (2)$$

Магнитная индукция  $B$  зависит от магнитной проницаемости  $\mu$  материала магнитопровода и напряженности поля  $H$ :

$$B = \mu \mu_0 H \quad (3)$$

а напряженность поля связана с током  $I_{xx}$  в обмотке:

$$H = \frac{W_1 I_{xx}}{l} \quad \text{или} \quad I_{xx} = \frac{lH}{W_1} \quad (4)$$

В последних формулах  $\mu_0$  — магнитная константа, равная  $4\pi 10^{-7}$  Г/м и имеющая смысл магнитной проницаемости вакуума, а  $l$  — средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе.

Из приведенных формул следует, что напряжение на первичной обмотке пропорционально скорости изменения магнитной индукции:

$$\frac{d\Phi}{dt} = S \frac{dB}{dt}$$

а ток в обмотке пропорционален напряженности магнитного поля  $H$ . Если напряжение сети синусоидально  $U_c = E_1 = U_m \cdot \cos \omega t$ ,

то синусоидальной должна быть и величина  $\frac{dB}{dt}$ . Тогда и магнитная индукция  $B$  должна изменяться по синусоидальному закону, но со сдвигом фазы на  $90^\circ$ :

$$B = B_m \cdot \sin \omega t$$

Этого нельзя сказать об изменении напряженности магнитного поля  $H$ , поскольку зависимость  $B(H)$  для ферромагнитных материалов, в том числе и для трансформаторной стали, нелинейна (см. рис. 1). Для этой зависимости характерны явления гистерезиса и насыщения.

Рис. 1

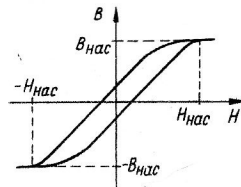
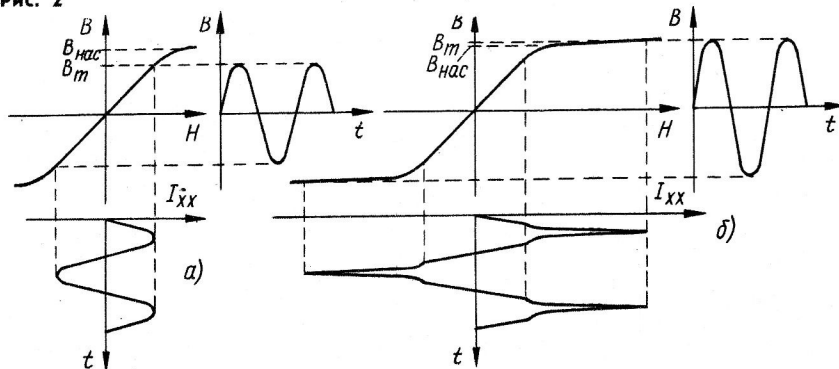


Рис. 2



реза и насыщения. Явление насыщения, особенно важное для рассматриваемых процессов, состоит в том, что при достижении определенной напряженности магнитного поля  $H_{нас}$  индукция в магнитопроводе практически перестает увеличиваться. Физически это объясняется тем, что при  $H_{нас}$  все микроскопические намагниченные области материала магнитопровода (домены) уже повернулись вдоль линий магнитного поля и дальнейшее усиление поля не может увеличить намагниченности. Магнитная проницаемость материала при этом уменьшается от нескольких тысяч при слабом поле до единицы в сильном. При  $H > H_{нас}$  формула (3) приобретает вид:

$$B = \mu_0 H \quad (5)$$

т. е. как при отсутствии магнитопровода!

Найдем форму тока в первичной обмотке трансформатора, пользуясь кривой намагничивания (рис. 1). При большом числе витков обмотки для создания ЭДС самоиндукции  $E_1$ , равной напряжению сети  $U_c$ , требуется лишь небольшое изменение магнитного потока (1), и максимальная индукция  $B_m$  в магнитопроводе также невелика (рис. 2 а; для упрощения петля гистерезиса не показана). Напряженность поля  $H$ , а следовательно, и ток  $I_{xx}$  в первичной обмотке (4) невелики и носят синусоидальный характер. Ток сдвинут по фазе относительно напряжения на  $90^\circ$ , т. е. является реактивным током.

Положение резко изменится, если уменьшится число витков  $W_1$  первичной обмотки (и соответственно всех остальных). Для создания той же ЭДС самоиндукции  $E_1$  требуется уже значительно более глубокое изменение магнитного потока, а следовательно, должна увеличиться и максимальная индукция  $B_m$  в магнитопроводе, как показано на рис. 2, б. Но она практически не может превзойти индукцию насыщения  $B_{нас}$ . Магнитная проницаемость стали на пиках тока падает до единицы (3), (5), поэтому увеличение индукции  $B$  может происходить

лишь за счет значительного увеличения напряженности поля  $H$ , а следовательно, тока в первичной обмотке. Ток приобретает характер коротких импульсов с большой амплитудой. Амплитудное значение тока может достигать нескольких ампер даже у трансформатора средней мощности, тогда как эффективное значение тока остается приемлемым.

Более того, из-за резкого уменьшения магнитной проницаемости магнитопровод уже не будет в состоянии локализовать внутри себя все магнитные силовые линии, и они будут импульсами «выплескиваться» наружу. При этом резко возрастает интенсивность поля рассеяния трансформатора. Теперь становится объяснимым и широкий частотный спектр напряжения наводок: он тем шире, чем короче и круче импульсы тока, иными словами, чем глубже уход в область насыщения материала магнитопровода.

Что же касается гудения и вибрации трансформатора, то они обусловлены, главным образом, двумя причинами. Первая — это взаимодействие между намагниченными пластинами магнитопровода, тем большее, чем более магнитный поток в нем. Вторая — взаимодействие поля тока, текущего по обмоткам, а также токов Фуко, наводимых в пластинах, с магнитным полем. Как известно, сила, действующая на провод с током, находящийся в магнитном поле, пропорциональна произведению тока на магнитную индукцию. Очевидно, что все механические силы резко возрастают в случае, когда увеличиваются и ток и напряженность поля, т. е. в случае, соответствующем рис. 2 б.

Еще одна причина гудения трансформатора — явление магнитострикции, состоящее в изменении линейных размеров магнитопровода при намагничивании. Оно очень невелико ( $10^{-4} \dots 10^{-6}$ ) и при отсутствии постоянного подмагничивания происходит с удвоенной частотой переменного магнитного поля (100 Гц). Магнитострикционный эффект пропорционален квадрату магнитной индукции и поэтому также резко уменьшается с ее уменьшением.

Итак, одна и та же причина — недостаточное число витков обмоток трансформатора — приводит к чрезмерному увеличению магнитного поля магнитопровода и, как следствие, к описанным выше вредным последствиям: увеличению тока холостого хода, поля рассеяния и внутренних механических нагрузок в элементах трансформатора, причем все эти явления приобретают импульсный характер. Кроме этого, из-за увеличения реактивного тока в первичной обмотке и потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе увеличивается нагревание трансформатора.

Может быть положение изменяется, когда трансформатор нагружают? Оказывается, нет. ЭДС, наводимые в обмотках, по-прежнему определяются формулой (1), а следовательно, и магнитный поток в магнитопроводе должен оставаться практически прежним. Активные токи обмоток направлены так, что взаимно компенсируют магнитные поля. Если напряжение на вторичной обмотке в  $w_1/w_{II}$  раз меньше, чем на первичной, то и ток в ней при номинальной нагрузке во столько же раз больше и произведение  $I_1 w_1$ , определяющее напряженность магнитного поля от тока  $I_1$ , равно произведению  $I_{II} w_{II}$ . Следовательно, активный ток в обмотках, если не учитывать потери, мало изменяет общий магнитный поток магнитопровода.

Пики тока  $I_{xx}$  в первичной обмотке, показанные на рис. 2, б, также не сглаживаются при нагрузке трансформатора, поскольку активный ток сдвинут по фазе на  $90^\circ$  относительно реактивного, пики которого совпадают с моментами перехода активного тока через нуль. Суммарный ток приобретает вид несимметричных пилообразных импульсов с крутым фронтом.

Устранить перечисленные недостатки очень просто. Чтобы сетевой трансформатор не создавал больших наводок, следует после расчета по общезвестной методике увеличить число витков всех обмоток на 15...20%. Число витков на вольт  $p$  обычно рассчитывают по эмпирической формуле:

$$p = \frac{40 \dots 60}{S} \quad (6)$$

(где  $S$  — в  $см^2$ ), причем для трансформаторной стали низкого качества рекомендуют брать коэффициент в числителе в пределах 50...60, а для высококачественной — 40...45. Для устранения описанных нежелательных явлений этот коэффициент в любом случае надо выбирать не менее 60. Разумеется, при этом потребуются большее обмоточного провода и несколько увеличатся потери в нагруженном трансформаторе из-за возрастания активного сопротивления обмоток — с этим приходится примириться.

Однако повышенные потери в обмотках частично компенсируют уменьшение потерь в магнитопроводе. Это особенно полезно в тех случаях, когда мощность трансформатора не использована полностью, например, в блоке питания мощного усилителя НЧ, поскольку он редко работает с максимальной громкостью. При малом потреблении токе невелики и потери «в меди» трансформатора. В то же время уровень потерь «в стали», не зависящий от нагрузки, снижен увеличением числа витков или сечения магнитопровода (6).

Изготовленный таким образом транс-

форматор не только не будет гудеть и создавать наводок, но и останется холодным в течение большей части времени работы аппарата. Для проверки этих рекомендаций был изготовлен трансформатор питания для малогабаритного осциллографа. При расчете число витков на вольт было определено по формуле  $p = 65/S$ . Трансформатор оказался «тихим» и не создавал наводок даже при размещении его вблизи горловины неэкранированной электронно-лучевой трубки. Слабое гудение легко устранить пропиткой разогретого трансформатора горячим парафином.

Трансформаторы заводского изготовления в некоторых случаях тоже можно модифицировать. Установлено, например, что переключение обмотки лабораторного автотрансформатора ЛАТР-2 с 220 на 250 В (подача напряжения сети на крайние выводы обмотки) уменьшает ток холостого хода примерно в 4 раза! У некоторых серийных сетевых трансформаторов есть возможность переключить первичную обмотку на большее напряжение, например, 237 или 250 В. Если напряжение на вторичных обмотках строго регламентировано (например, 6,3 В), нужно домотать к ним требуемое число витков. Уменьшенное напряжение повышающей обмотки обычно вполне допустимо.

Стремление к экономии обмоточного провода, к уменьшению массы и габаритов привело к чрезмерному уменьшению числа витков у современных трансформаторов заводского изготовления. Например, у серийного трансформатора ТС-65 (паспорт 4.704.027-ПС) от радиопы «ВЭФ-Радио» при включении на номинальное напряжение сети 220 В импульсы тока в первичной обмотке достигают 0,7 А. Импульсные помехи от реактивного тока могут распространяться далеко по электросети, создавая помехи другой радиоэлектронной аппаратуре.

Хотя непосредственно реактивный ток и не вращает диск электросчетчика, он оборачивается реальными потерями в проводах обмоток и линиях электропередачи. Если учесть огромное количество эксплуатируемых в быту и промышленности трансформаторов, эти потери могут оказаться существенными и даже перекрыть эффект от вышеупомянутой экономии. Кроме того, из-за механической вибрации элементов трансформатора разрушается изоляция обмоток и пластин магнитопровода, что сокращает срок службы самого трансформатора. Это особенно верно для многих типов современных трансформаторов, не пропитываемых изолирующим составом.

**В. ПОЛЯКОВ**

г. Москва