

ЭТОТ СТРАШНЫЙ ЗВЕРЬ ТР

Евгений Карпов

В статье рассмотрены некоторые вопросы изготовления выходных трансформаторов для одноктных ламповых усилителей.

Наблюдается интересная тенденция: чем дальше мы отходим от ламповой эпохи, тем больше мифов и тумана создается вокруг выходного трансформатора лампового усилителя. Причем, не только в вопросах расчета, но и вокруг его изготовления. Производителей понять можно (кто же тебя похвалит, если не сам себя), расхваливание своей продукции – закон рекламы, но и во множестве статей независимых авторов процесс намотки трансформатора смахивает на описание тайного обряда.

Давайте разберемся, насколько это сложно, и как много времени на это требуется.

Разговор пойдет о выходных трансформаторах для одноконтурных схем и, вообще, о любых трансформаторах, где не требуется высокая симметрия полуобмоток и выполнение жестких требований по условиям эксплуатации. Предполагается, что у вас есть провод, сердечник и самый примитивный намоточный станок (имеется в виду любая конструкция - от ручной дрели, зажатой в тисках, до согнутой резьбовой шпильки, укрепленной в двух деревянных брусках), снабженный счетчиком.

Катушка

Изготовление катушки дело кропотливое, но не сложное. Чертеж деталей защелкивающейся катушки есть в любом справочнике радиолобителя. Лучшим материалом для ее изготовления можно считать стеклотекстолит (не фольгированный) толщиной $1.5 \div 2$ мм. При изготовлении деталей оставляйте припуск на окончательную доводку при сборке. Если попытаться сразу изготовить деталь по размеру, то велика вероятность, что ничего защелкнуться не будет, а катушка будет разваливаться. У собранной катушки сбейте острые углы надфилем и оберните одним - двумя слоями бумаги толщиной $0.1 \div 0.15$ мм. Кругом – бегом, на изготовление катушки потребуется часа два – три.

Вопрос изготовления трансформаторов галетной конструкции мы затрагивать вообще не будем, такая конструкция при относительно малом числе галет проигрывает классической конструкции с не глубоким секционированием и по коэффициенту заполнения, и по индуктивности рассеяния.

Намотка

Теперь начинается самое интересное: намотка. Большинство любителей использует рядовую намотку, то есть провод мотается виток к витку, и через каждый слой кладется прокладка. Наматывать таким образом без станка с укладчиком три - четыре тысячи витков тонким проводом - титанический труд. Возникает вопрос: а почему не наматывать в навал?

Если отбросить благородное возмущение истинных аудиофилов и обратиться к первоисточникам [1], [2], то выяснится следующее:

С коэффициентом заполнения для тонкого провода ($0.15 \div 0.4$ мм) все нормально, Цыкин приводит значения - $0.7 \div 0.75$, у меня получалось - $0.5 \div 0.53$.

Индуктивность рассеяния практически не зависит от способа и плотности намотки.

Собственная емкость обмотки (при намотке в навал) получается на $5 \div 10\%$ меньше.

Основной проблемой является низкая электрическая прочность.

Кстати, немного отвлекаясь от конструктивных вопросов, хочу обратить внимание читателей, что высокие коэффициенты заполнения (выше, чем при рядовой намотке) позволяют сделать трансформатор меньше или в тех же габаритах получить большую индуктивность намагничивания. Это важный момент, так как для высококачественных устройств следует стремиться реализовать трансформатор в минимальных габаритах при заданной индуктивности первичной обмотки. Во-первых, железо трансформатора, собственно говоря, и является генератором гармоник и чем его меньше, тем лучше; во-вторых, меньше трансформатор – меньше индуктивность рассеяния при заданном секционировании.

Вернемся к вопросу электрической прочности. В книгах все написано правильно, но! Большинство рекомендаций привязаны к серийному производству трансформаторов и соответствию их определенным стандартам. Выполнить трансформатор в соответствии с ними в домашних условиях нереально, нет ни соответствующих материалов, ни технологий. Поэтому давайте оставим рекомендации в покое и будем исходить из двух постулатов: первое - реальные условия эксплуатации, второе – то, что неприемлемо в производстве, вполне подходит при самостоятельном изготовлении единичных образцов.

Так какое же напряжение может быть на первичной обмотке трансформатора? Допустим, выходная мощность усилителя $P = 5$ ватт (это довольно много для однотактной схемы), приведенное сопротивление первичной обмотки $R = 2000$ Ом, напряжение питания $U_a = 300$ вольт и КПД трансформатора $\eta = 0.85$. Чтобы получить такую мощность, действующее напряжение на первичной обмотке должно быть равно –

$$U_{rms} = \frac{\sqrt{P \cdot R}}{\eta} = 117(V)$$

Соответственно, его амплитуда будет равна –

$$U = U_{rms} \cdot \sqrt{2} = 166(V)$$

С учетом напряжения питания максимальное напряжение на первичной обмотке относительно корпуса усилителя будет равно –

$$U_w = U + U_a = 466(V)$$

Это и определяет требования к межобмоточной изоляции (как правило, один конец вторичной обмотки заземлен) и изоляционным свойствам каркаса. Для кабельной бумаги толщиной 0.12мм, достаточно два слоя, можно использовать конденсаторную бумагу в 4÷5 слоев, на крайний случай – комбинация из слоя сантехнической фторопластовой ленты и слоя писчей бумаги. Стеклотекстолитовый каркас с лихвой обеспечивает необходимую электрическую прочность.

Выходные трансформаторы всегда выполняются секционированными, иначе не удастся получить приемлемые значения индуктивности рассеяния. В простейшем случае первичная обмотка делится на две части, более часто первичная обмотка делится на три части, между которыми расположены вторичные обмотки. Возможно и более глубокое секционирование, но при этом значительно снижается коэффициент заполнения окна сердечника и растет емкость. Глубокое секционирование используется довольно редко.

Поэтому остановимся на трех секциях первичной обмотки. Минимум индуктивности рассеяния достигается при неравномерном разделении числа витков – крайние секции имеют число витков меньше в два раза, чем средняя секция. В отсутствие сигнала, если пренебречь активным сопротивлением обмотки, все витки первичной обмотки эквипотенциальны, и переменное напряжение на ней равно нулю; при максимальной мощности напряжение на частях обмотки будет пропорционально их индуктивности. Следовательно, максимальное переменное напряжение будет на средней части обмотки, и его амплитуда равна 83V. Для нормального провода диаметром более 0.15мм (ПЭТВ, ПЭВ, ПВТЛ и др.) пробивное напряжение изоляции составляет не менее 600V, а число микродефектов не более 5÷7 на 15 метров (для провода диаметром более 0.35мм микродефекты вообще не допускаются). Поэтому обмотку можно мотать в навал вообще без всяких прокладок, вероятность появления короткозамкнутых витков очень мала. Для повышения надежности трансформатора и лучшей укладки витков обмотки целесообразно через 300÷500 витков укладывать прокладку из конденсаторной бумаги толщиной 0.022мм в два слоя (бумага называется конденсаторной потому, что ее добывают из старых бумажных конденсаторов, но не металлобумажных ☺).

Поэтому, основная задача при намотке трансформатора – исключить западание витков. Для межобмоточной изоляции это решается стандартным способом – прокладка делается шире каркаса на 4÷5мм и по ее краям делается насечка (насечку делать удобно следующим образом: прокладка сворачивается в трубочку, и ее край по контуру прокусывается острыми кусачками). Так как в этом случае используется более толстая и жесткая изоляция (как из условий электрической прочности, так и для возможности нормальной укладки следующей обмотки), западание витков исключено, если вы достаточно внимательны. Желательно исключить западание витков и при укладке межслоевой изоляции. Тут возникают сложности. Так как поверхность обмотки имеет неровности, то даже при наличии насечки на краях прокладки исключить западания витков не удастся - провод ее стягивает. Решается этот вопрос следующим образом. На края прокладки накладывается бандаж из узкой полоски тонкой липкой бумаги (можно использовать «малярную ленту») с насечкой по краю, она удерживает прокладку от сползания (или закрывает витки, с которых прокладка уже благополучно сползла).

Итак, подводя итог вышесказанному.

Порядок намотки трансформатора следующий – секции первичной обмотки мотаются в навал с межслоевыми прокладками через 300÷500 витков, секции вторичной обмотки мотаются виток к

витку без прокладок (при диаметре провода более 0.6мм этот процесс сложности не вызывает). Напоминаю еще раз: межобмоточная изоляция должна быть достаточно жесткой – витки вторичной обмотки должны ложиться ровно. При намотке секций первичной обмотки следует обеспечивать достаточное натяжение провода и стараться, чтобы поверхность обмотки была как можно ровнее. Кстати, при намотке желательно не касаться провода руками, а удерживать провод кусочком тонкого фетра или мягкой замши. Намотка ведется от края до края катушки. Выводы обмоток выполняются непосредственно обмоточным проводом с надетой на него фторопластовой трубкой (тонкая трубка прекрасно тянется; растягивая миллиметровую трубочку, можно получить трубку меньшего диаметра). Если провод слишком тонкий, то для повышения механической прочности вывода провод складывают в три-четыре раза и плотно свивают. Эта косичка используется как вывод обмотки, естественно, начало косички должно быть изолировано и надежно закреплено на обмотке. Выводы из цветных проводов, конечно, красивее, но такой вариант практичнее. Конечная изоляция обмоток выполняется из двух слоев кабельной бумаги (можно и писчей).

Коэффициент заполнения окна сердечника при двух секциях первичной обмотки находится около 0.45, при трех секциях первичной обмотки – около 0.4. Это усредненные данные по результатам намотки нескольких десятков трансформаторов разной мощности.

Управиться с такой работой в зависимости от имеющегося опыта вполне можно за пару вечеров.

Пропитка

Для чего пропитывают катушку трансформатора? Основная цель - повышение электрической прочности при неблагоприятных внешних условиях, также пропитка улучшает отвод тепла из внутренних слоев катушки и повышает ее механическую прочность. Конечно, есть и обратная сторона медали, любая пропитка увеличивает собственную емкость трансформатора.

В 99.9% случаев любительский усилитель стоит на почетном месте в комнате, заметьте, при практически нормальных условиях, и улаживает взгляд, а иногда и слух своего создателя. Тепловая нагрузка на выходной трансформатор высококачественного усилителя тоже не велика. Во-первых, проектируются такие трансформаторы по несколько иным критериям, чем силовые, во-вторых, при прослушивании музыки, даже если усилитель имеет значительную выходную мощность, средняя мощность на выходе составляет всего несколько ватт. Поэтому я не советую использовать какую-либо пропитку и ухудшать, даже незначительно, электрические параметры трансформатора.

Конечно, если вы изготавливаете магистральный трансляционный усилитель мощностью пару киловатт, планируете отправлять усилитель в космос, слушать музыку в тропических лесах Амазонки, или сплавить его популярной рок - группе, тогда надо задуматься над пропиточным составом и способом пропитки.

Другое дело: сердечник. В любительской практике часто используются витые сердечники от серийных трансформаторов, которые при разборке имеют тенденцию расслаиваться. Это не смертельно, но отслоившиеся пластинки будут играть вместе с акустикой. По возможности, пластинки следует подклеить, но это мало что дает. Эффективный способ утихомирить трансформатор (клеить все равно надо) - перед окончательной сборкой окунуть подковы сердечника в масляный лак. Шихтованный сердечник тоже целесообразно покрасить лаком.

Заключение

Беру на себя смелость утверждать, что изготовленный таким образом трансформатор будет иметь электрические параметры не хуже, а возможно и лучше, чем изготовленный в заводских условиях (были прецеденты, когда на заводе свято придерживались всех правил намотки, и обмотка просто не лезла в окно сердечника). В условиях близких к нормальным такие трансформаторы работают безотказно (это не теоретические размышления, а практический результат).

Как вы видите, страшность зверя сильно преувеличена. Основные хлопоты будут связаны с поиском сердечника, провода и сопутствующих материалов, а не с намоткой. Залогом хороших результатов является обычная аккуратность и внимательность. Даже не имея опыта, вполне реально за неделю изготовить комплект выходных трансформаторов. Конечно, не все может получиться сразу, но под лежащий камень вода не течет, поэтому смело беритесь за работу и стройте свой, самый лучший усилитель.

P.S.

- Сейчас появилась масса современных изоляционных материалов, так что использование бумаги совсем не обязательно. Использование полиэтилентерефталатной пленки, лавсановой пленки, армированного фторопласта, стеклоткани – приветствуется. Смотрите по обстановке, что легче достать.
- У мощных усилителей возможно появление значительных перенапряжений на выходном трансформаторе при резком сбросе нагрузки. Если вы любите делать коммутации на ходу, то не стоит увеличивать электрическую прочность трансформатора, проще зашунтировать его первичную обмотку подходящим варистором или разрядником.
- Естественно, качество трансформатора зависит и от применяемого сердечника, но не следует возводить это в абсолют. В трансформаторах питания бытовой аппаратуры наиболее часто использовалась сталь 3411. Она уступает по своим магнитным свойствам современным сталям (производители часто используют сталь 3408), но эти отличия не настолько огромны, что их нельзя было бы частично компенсировать на этапе проектирования трансформатора. На витом сердечнике от силового трансформатора можно изготовить отличный выходной трансформатор. И вообще, наблюдается любопытная вещь. Многие производители предлагают выходные трансформаторы, но ограничиваются приведением только их основных параметров – чистый кот в мешке (а трансформатор с сердечником из стали 3408 и аморфного сплава – две большие разницы).

Литература

1. [Г.С. Цыкин, Трансформаторы низкой частоты, М., Связьиздат, 1955.](#)
2. А. Н. Горский, Ю.С. Русин и др., Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания, М., Радио и связь, 1988.