

Приложение Tube TransCalc

Appendix 2

Пример методики расчета выходного трансформатора

“... я хочу превратить расчет трансформатора в детскую забаву.”

Из письма Андрея Шевченко Евгению Карпову.

Приложение Tube TransCalc представляет собой скорее не программу, а набор процедур для расчета трансформатора. Процедура предварительного расчета из них самая простая, так как имеет однозначный порядок вычислений и поэтому в дополнительных пояснениях практически не нуждается. Другое дело – процедура конструктивного расчета, которую лучше было бы назвать набором средств моделирования трансформатора. Так же, как и в деле сборки игрушки-конструктора, здесь возможны разные пути достижения поставленной цели, что может сбить с толку неискушенного пользователя. Далее будет показана последовательность шагов, которую можно использовать для расчета выходного трансформатора. Описание шагов сопровождается демонстрацией реальных расчетов при помощи Tube TransCalc, для чего используется набор .trf файлов, поставляемых в комплекте с данным документом.

1. Постановка задачи

Требуется рассчитать выходной трансформатор для работы в составе однотактного выходного каскада с параметрами:

$$P_1 = 7,5W ;$$

$$I_0 = 120mA ;$$

$$R_i = 750\Omega ;$$

$$R_{\Sigma} = 3000\Omega ;$$

Вид нагрузки – активная при $R_2 = 8\Omega$;

$$f_l = 20Hz \text{ при } M_{dbl} = -3dB ;$$

$$f_h = 30000Hz \text{ при } M_{dbh} = -3dB .$$

2. Предварительный расчет

Демонстрационный файл – Exec00.trf.

Перечисленные выше параметры вводим в соответствующие окна.

Так как каскад однотактный, задаем вариант симметрии А/І.

На ближайшем базаре лежит большая куча стержневых сердечников, поэтому попробуем рассчитать трансформатор на таком сердечнике. Поскольку стержневой сердечник имеет две катушки, нужно определиться, каким способом будут соединены их обмотки. Соединять параллельно половинки первичной обмотки нет резона, так как для получения такой же индуктивности L_1 придется на каждой катушке уложить в два раза больше витков первичной обмотки. Вторичная же обмотка работает на весьма низкоомную нагрузку, поэтому ее половинки лучше соединить параллельно. Итак, устанавливаем конструктивный вариант “Стержневой 3”.

Весьма вероятно, что материал сердечника – сталь Э310.

КПД трансформатора сильно влияет на выходное сопротивление, которое при низкоомной нагрузке $R_2 = 8\Omega$ желательно иметь поменьше, поэтому задаем $\eta = 0,98$.

Вопреки заданию, оставляем без изменений значение $f_h = 20000\text{Hz}$. Если задать $f_h = 30000\text{Hz}$, то программа просто вычислит для нас какое-то рекомендуемое значение индуктивности рассеяния, на которое мы все равно не будем обращать внимания в последующей процедуре конструктивного расчета, так как нам непременно захочется сделать эту индуктивность поменьше...

Как видно, допустимая индукция выбрана весьма большой: $B_{adm} = 10000\text{Gs}$. Это сделано для того, чтобы программа вычислила количество витков первичной обмотки по необходимой индуктивности. Такое количество витков обеспечивает заданный спад на нижней рабочей частоте и вместе с тем оно меньше, чем при ограниченной индукции. С такого значения удобнее начинать процедуру конструктивного расчета, так как вычисленное количество витков наверняка поместится в катушке трансформатора. Впоследствии мы все равно будем прилагать все усилия для увеличения числа витков с целью уменьшения индукции и увеличения индуктивности. Если же кого-то не устраивает слишком большое вычисленное значение индукции на нижней рабочей частоте, то можно прямо здесь увеличить размеры сердечника.

Итак, все обошлось благополучно. Автоматически выбранный программой сердечник 32x64x100 дает не такое уж большое максимальное значение индукции $B_{max} = 5425\text{Gs}$.

3. Конструктивный расчет

3.1. Шаг 1

Демонстрационный файл – Exec01.trf.

Задаем магнитные и электрические параметры:

$$f_l = 20 \text{ Hz}$$

$$P_1 = 7,5 \text{ W} ;$$

$$I_0 = 120 \text{ mA} ;$$

$$R_l = 750 \Omega ;$$

$$R_2 = 8 \Omega .$$

Пусть Вас не смущает сообщение “Нет начальной эквивалентной магнитной проницаемости” – мы еще не сообщили процедуре конструктивного расчета, с каким материалом она должна иметь дело.

3.2. Шаг 2

Демонстрационный файл – Exec02.trf.

Как и в предварительном расчете, задаем вариант симметрии А/І и конструктивный вариант “Стержневой 3”.

Первичная обмотка здесь явно простая, а выбор схемы соединения слоев вторичной обмотки оставим на потом, так как эти хлопоты нам пока ни к чему.

3.3. Шаг 3

Демонстрационный файл – Exec03.trf.

Как и в предварительном расчете, выбираем из таблицы материал сердечника Э310, а из другой таблицы – его размеры 32x64x100.

Так как сердечника и катушек для него у нас еще нет, то придется пока согласиться с автоматически установленными размерами сердечника и катушки. Единственное, что сейчас можно предвидеть, так это малую вероятность того, что автоматически рассчитанное программой количество витков в одном слое поместится между щечками реальной катушки. Поэтому зададим для нашего большого сердечника $\Delta_h = 3 \text{ mm}$.

В предварительном расчете получено значение $d_1 = 0,6715...$, поэтому из таблицы для первичной обмотки выбираем $d_1 = 0,67$.

Подобно штукатуру, который знает, что потом он все равно выровняет стенку, “набросаем” в таблицу столько слоев, чтобы полученное значение числа витков первичной обмотки $\dot{w} = 910$ стало больше рассчитанного в предварительном расчете $\dot{w} = 819,868\dots$.

Мы уже можем видеть индуктивность первичной обмотки, но индукция в сердечнике и вид частотной характеристики для нас пока тайна. Все дело в том, что еще нет вторичной обмотки.

3.4. Шаг 4

Демонстрационный файл – Exec04.trf.

Помещаем в таблицу единственный слой вторичной обмотки. Манипулируя толщиной провода вторичной обмотки, добиваемся, чтобы импеданс первичной обмотки приблизился к заданному значению $R_{\sim} = 3000\Omega$. Как видно, при $d_2 = 0,9$ $R_{\sim} \approx 2926\Omega$.

Полученная индукция $B_{\max} \approx 4835Gs$ вполне вписывается в существующие ограничения, однако наша катушка почти пуста, поэтому у нас есть запас для улучшения частотной характеристики на низких частотах.

3.5. Шаг 5

Демонстрационный файл – Exec05.trf.

Количество слоев первичной обмотки увеличиваем до 10. В результате изменился импеданс первичной обмотки, поэтому снова подбираем диаметр провода вторичной обмотки. Получаем $d_2 = 0,62$, $R_{\sim} \approx 3070\Omega$.

3.6. Шаг 6

Демонстрационный файл – Exec06.trf.

Итак, нужное число витков вторичной обмотки укладывается в один слой, поэтому уменьшение активного сопротивления возможно только при параллельном соединении нескольких слоев. Для вторичной обмотки указываем, что она будет состоять из последовательно соединенных групп. При таком подходе слои единственной группы будут иметь один и тот же номер 0 (меньше забот при нумерации слоев). В данном случае, когда все слои обмотки соединяются параллельно, тип сложной обмотки на ее результирующее сопротивление и индуктивность рассеяния влияния не оказывает.

3.7. Шаг 7

Демонстрационный файл – Exec07.trf.

Добавляем слои вторичной обмотки до тех пор, пока КПД трансформатора не вырастет до значения 0,98. Хотя в катушке еще есть пустое место, увеличивать их количество дальше не имеет смысла, так как КПД растет незначительно, а емкость обмоток трансформатора растет, надо полагать, существенно. (Эту емкость никто не видел, но нужно помнить, что она есть!)

Частотная характеристика трансформатора на высоких частотах пока оставляет желать лучшего, однако мы еще не занимались чередованием слоев. Также видно, что несколько уменьшился импеданс первичной обмотки.

3.8. Шаг 8

Демонстрационный файл – Exec08.trf.

Путем увеличения диаметра провода вторичной обмотки от прежнего значения $d_2 = 0,62$ до $d_2 = 0,64$, получаем $R_2 \approx 2979\Omega$. При этом также несколько увеличился КПД трансформатора и улучшился коэффициент демпфирования. Теперь настало время заняться высокими частотами.

3.9. Шаг 9

Демонстрационный файл – Exec09.trf.

При таком чередовании слоев индуктивность рассеяния минимальна: $L_s \approx 0,0013H$, а частотная характеристика просто великолепна. Первым со стороны катушки уложен слой вторичной обмотки. Потенциал этого слоя относительно сердечника трансформатора меньше, чем у слоя первичной обмотки, поэтому емкость между первым слоем и сердечником будет меньшей. Однако еще не задана толщина изоляции между слоями.

3.10. Шаг 10

Демонстрационный файл – Exec10.trf.

Так как в катушке еще много места, не будем скупиться и установим $\delta_{12} = 0,3mm$. Как видно, индуктивность рассеяния теперь увеличилась в два раза: $L_s \approx 0,0026H$. Однако, во-первых, изоляция между слоями все-таки нужна, во-вторых, увеличивая расстояние между слоями, мы уменьшаем емкость трансформатора, а в третьих, если кому-то покажется, что полученный спад частотной характеристики $-0,73dB$ на частоте $100000Hz$ не так уж хорош, пусть покупает трансформаторы у фирмы Plitron.