

Приложение Tube TransCalc

Описание применения

Предисловие

Данный документ содержит перечень формул, описание последовательности расчетов, используемых приложением Tube TransCalc, а также идеи, лежащие в его основе.

Приложение Tube TransCalc создано с целью облегчения процесса расчета самых распространенных трансформаторов однотактных и двухтактных ламповых УНЧ, работающих в режимах А и АВ. Проектирование трансформатора является сложной инженерной задачей, для успешного решения которой требуется понимание происходящих в нем физических процессов, навыки обращения с формулами, а также определенная доля творческого вдохновения, без которого грамотно спроектированные дома иногда не вызывают желания в них жить, а грамотно спроектированные усилители иногда не хочется слушать. Расчет трансформаторов чрезвычайно насыщен разнообразными расчетными процедурами и логическими условиями типа “если-то-иначе”, способными у многих людей остудить желание заниматься этим делом. По замыслу автора приложение Tube TransCalc должно взять на себя как можно большую часть вычислительной работы, чтобы освободить интеллект для решения других важных проблем. Приложение реализует полную схему расчета трансформатора, поэтому для его успешного использования желательно ознакомиться, например, с работой Г.С. Цыкина “Трансформаторы низкой частоты”, Связьиздат, 1955. Настоящий документ поначалу представлял собой конспект формул и идей, найденных у Цыкина, Войшвилло и у современных авторов в Интернете. В процессе переработки в нем были оставлены примечания, цель которых состоит в том, чтобы обратить внимание на явления и закономерности, имеющие место в ламповых усилителях.

Список литературы

- Г.С. Цыкин [Трансформаторы низкой частоты](#), Связьиздат, 1955
- Г.С. Цыкин [Усилители электрических сигналов](#) М., Энергия, 1969
- Г.В. Войшвилло [Усилители низкой частоты](#). Связьиздат, 1939
- Г.В. Войшвилло [Руководство по проектированию усилителей низкой частоты](#). Ленинград, 1958
- [Расчет индуктивности рассеяния трансформаторов](#)
- [Материалы по сердечникам](#)
- А.Н. Шевченко [Вычисление индуктивности рассеяния трансформатора с произвольным расположением концентрических секций](#)

1. Общие сведения по расчету трансформатора низкой частоты

1.1. Классификация трансформаторов

Для работы программы Tube TransCalc ей требуется сообщить параметры, которым должен удовлетворять трансформатор. Одна часть этих параметров выражается в численном виде (сопротивление обмотки переменному току, граничные частоты диапазона, КПД трансформатора и т.д.). Другая часть параметров представляет собой сведения, которые нельзя выразить в численном виде – например вид нагрузки (активная или индуктивная) или режим работы каскада, к которому подключен трансформатор. Такие параметры являются категориями, определяющими логический выбор тех или иных формул в процессе расчета. Ниже приводится классификация трансформаторов по признакам, соответствующим вариантам расчетов, обеспечиваемых программой Tube TransCalc.

Классификация по виду нагрузки

При подключении вторичной обмотки входного или промежуточного трансформатора к сетке лампы без параллельного шунта, сопротивление нагрузки переменному току (для каскада без тока сетки) определяется входной емкостью лампы. Такое подключение соответствует модели трансформатора с емкостной нагрузкой. Его достоинством является большой коэффициент передачи напряжения, что позволяет построить каскад предварительного усиления маломощного сигнала (например, ММ или МС головки звукоснимателя). Однако существенными недостатками такого каскада является большая вероятность возбуждения и сложность изготовления трансформатора (большое количество витков очень тонкого провода). С целью предотвращения возбуждения вторичную обмотку такого трансформатора рекомендуется шунтировать параллельно подключаемым сопротивлением. Однако это снижает коэффициент усиления и, тем самым, уменьшает ценность такого технического решения. В то же время шунтирование вторичной обмотки сопротивлением, величина которого соответствует [условию активности нагрузки](#), позволяет использовать трансформатор с активной нагрузкой. По изложенным причинам модель с емкостной нагрузкой здесь не рассматривается.

Разновидности трансформаторов в зависимости от вида нагрузки:

- с активной нагрузкой:
- с индуктивной нагрузкой при компенсации частотных искажений:
 - с корректирующей цепочкой параллельно первичной обмотке;
 - без корректирующей цепочки параллельно первичной обмотке.

Конструирование трансформатора с индуктивной нагрузкой требует применения некоторых специфических приемов, описанных в разделе [Индуктивность рассеяния при индуктивной нагрузке](#).

Классификация по мощности

- малой мощности: $P_1 \leq 0,1W$;
- средней мощности: $P_1 > 0,1W$.

Примечание: По Г.С. Цыкину средняя мощность ограничена сверху величиной 1000W.

Классификация по вариантам симметрии обмоток

Описана в разделе [Варианты симметрии обмоток](#).

Классификация по конструктивным вариантам обмоток

Описана в разделе [Конструктивные варианты обмоток](#).

1.2. Виды расчетов

Предварительный расчет

Представляет собой последовательность расчетных процедур, целью которых является получение параметров трансформатора заданного типа по данным устройств, подключенных к входу и выходу трансформатора. Предварительный расчет построен в соответствии с методикой Г.С. Цыкина. Иногда расчет такого вида называют “электрическим”, однако его цель несколько шире, так как последняя часть расчета производится по отношению к некоторому выбранному сердечнику с конкретными параметрами магнитного материала и геометрическими размерами. Поэтому предварительный расчет в рамках проекта Tube TransCalc рассматривается как первый шаг итерационного процесса получения набора конструктивных параметров проектируемого трансформатора, а завершающие итерации производятся процедурой конструктивного расчета.

Конструктивный расчет

Представляет собой последовательность расчетных процедур, целью которых является получение параметров трансформатора по его конструктивным данным при условии, что он принадлежит к одному из перечисленных выше типов, исполнен для работы в одном из указанных выше режимов и подключен к устройствам с заданными параметрами. Здесь использованы [Принципы, положенные в основу конструктивного расчета](#).

1.3. Основные обозначения

Обозначения, общие для предварительного и конструктивного расчетов

R_i	Ω	<p>Внутреннее сопротивление переменному току источника сигнала. <i>Если первичная обмотка является нагрузкой лампового каскада:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • для варианта первичной обмотки А: R_i – внутреннее сопротивление переменному току лампы в рабочей точке; • для вариантов первичной обмотки АА и АВ: $R_i = R_{ia-a}$ – внутреннее сопротивление переменному току каскада равно сопротивлению между анодами (plate to plate load), которое вычисляется на основании последовательной эквивалентной схемы двухтактного каскада.
R_{\sim}	Ω	<p>Полное сопротивление (импеданс) первичной обмотки: $R_{\sim} = \alpha R_i$.</p> <p><i>Некоторые характерные значения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • для входного или промежуточного трансформатора значение $\alpha = 1$ обеспечивает максимальный коэффициент передачи напряжения на нагрузку трансформатора – т.н. режим наибольшей чувствительности (при этом коэффициент трансформации n должен быть найден исходя из условия равенства сопротивления первичной обмотки R_{\sim} заданной величине – т.е. внутреннему сопротивлению лампы R_i); • для выходного трансформатора каскада, построенного на триоде и работающего с относительно низким анодным напряжением, значение $\alpha = 2$ соответствует максимальной колебательной мощности, отданной в нагрузку (понятие относительно низкого анодного напряжения определяется в работах Г.В. Войшвилло); • для выходного трансформатора каскада, построенного на триоде, значение $3 \leq \alpha \leq 7$ улучшает частотную характеристику каскада (в свое время Г.С. Цыкин рекомендовал $2 \leq \alpha \leq 7$).
R_2	Ω	<p>Сопротивление нагрузки, подключенной к вторичной обмотке трансформатора.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Для выходного трансформатора с активной нагрузкой – максимальное сопротивление нагрузки;

		<ul style="list-style-type: none"> • для выходного трансформатора с индуктивной нагрузкой – активная составляющая сопротивления нагрузки; • для входного или промежуточного трансформатора, работающего на однотактный каскад без сеточных токов – сопротивление шунта в цепи сетки лампы следующего каскада (или удвоенное сопротивление шунта для двухтактной схемы); • для трансформатора драйверного каскада, работающего на мощный однотактный каскад с токами сетки – входное сопротивление каскада, рассчитанное по сопротивлению шунта и сопротивлению сетка-катод лампы каскада в момент прохождения сеточного тока (или удвоенное входное сопротивление для двухтактной схемы).
R_{out}	Ω	Выходное сопротивление трансформаторного каскада усиления.
Df		Коэффициент демпфирования: $Df = \frac{R_2}{R_{out}}$. <i>Является одним из параметров усилителя в целом, поэтому имеет смысл только для выходных трансформаторов.</i>
R_{eqv}	Ω	Сопротивление эквивалентного генератора на нижней частоте.
P_1	W	Мощность переменного тока, подводимая к первичной обмотке.
P_2	W	Мощность переменного тока в нагрузке R_2 .
U_{1max}	V	Максимальное напряжение переменного тока, приложенное к первичной обмотке трансформатора.
U_{1min}	V	Минимальное напряжение переменного тока, приложенное к первичной обмотке трансформатора.
U_{2max}	V	Максимальное напряжение переменного тока на концах вторичной обмотки трансформатора.
I_0	A	Постоянная составляющая тока в первичной обмотке (анодный ток лампы в рабочей точке для режима А или разностный ток для режимов АА и АВ).
η		К.П.Д. трансформатора (в виде числа, меньшего 1). <i>К.П.Д. – параметр, сильно влияющий на размеры трансформатора, т.к. его большое значение может быть обеспечено только обмотками с малым сопротивлением, которые можно намотать только проводом большого диаметра.</i>
f_l	Hz	Нижняя граница диапазона частот.
M_{dbl}	Db	Отклонение частотной характеристики на нижней рабочей частоте (в виде отрицательного числа).
K_d	Db	Минимальный уровень выходного сигнала относительно максимального сигнала, при котором обеспечивается величина M_{dbl} (в виде отрицательного числа). <i>Вследствие зависимости проницаемости материала а, следовательно, и индуктивности трансформатора от подведенного к нему напряжения, частотная характеристика получается наихудшей при наименьшей амплитуде сигнала. Поэтому индуктивность первичной обмотки трансформатора средней мощности, работающего без подмагничивания, должна быть рассчитана при наименьшей амплитуде сигнала.</i>
f_h	Hz	Верхняя граница диапазона частот.
M_{dbh}	Db	Отклонение частотной характеристики на верхней рабочей частоте (в виде отрицательного числа).
L_1	H	Индуктивность первичной обмотки трансформатора.
L_s	H	Индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к первичной обмотке.
σ		Коэффициент рассеяния: $\sigma = \frac{L_s}{L_1}$.
L_2	mH	Индуктивная составляющая нагрузки, подключенной к вторичной обмотке выходного трансформатора, работающего на индуктивную нагрузку.
r_1	Ω	Активное сопротивление первичной обмотки.
r_2	Ω	Активное сопротивление вторичной обмотки.
c		Отношение активного сопротивления первичной обмотки к приведенному активному сопротивлению вторичной: $c = \frac{r_1}{r_2'}$. <i>Для трансформатора с первичной обмоткой, работающей в режиме А, значение c берут в зависимо-</i>

		<p>сти от величины постоянной составляющей тока в первичной обмотке трансформатора. При отсутствии постоянной составляющей тока в первичной обмотке, а также при малой ее величине, значение C берут равным единице; при большой постоянной составляющей в первичной обмотке, что имеет место в выходных трансформаторах каскадов мощного усиления, работающих в режиме А, значение C берут от 0,5 до 0,75 для снижения падения напряжения питания на первичной обмотке, так как это повышает КПД каскада. (Из этих же соображений коэффициент C нужно выбирать для вариантов первичной обмотки АА и АВ).</p> <p>Приведенные значения коэффициента C вычислены из соображений оптимальности использования меди, находящейся в окне трансформатора и для обеспечения наилучшего КПД. В предварительном расчете трансформатора значение коэффициента задается как исходный параметр. При конструктивном расчете Tube TransCalc вычисляет этот коэффициент и дальше никак не использует, поэтому отклонение его значений от оптимальных не влияет прямым образом на остальные параметры трансформатора.</p>
w_1		Количество витков первичной обмотки, учитываемых при создании индукции .
w_2		Количество витков вторичной обмотки, учитываемых при создании индукции .
n		<p>Коэффициент трансформации: $n = \frac{w_2}{w_1}$.</p> <p>В разных источниках, в частности на сайтах изготовителей трансформаторов, применяется обратная величина (например, в виде RATIO = 12:1), однако на данный документ это не распространяется.</p>
B_{adm}	Gs	Максимально допустимая амплитуда переменной составляющей индукции в сердечнике трансформатора на нижней рабочей частоте f_l .
B_{max}	Gs	Действующая амплитуда переменной составляющей индукции в сердечнике трансформатора на нижней рабочей частоте f_l при напряжении U_{lmax} .
B_{min}	Gs	Минимальная амплитуда переменной составляющей индукции в сердечнике трансформатора на нижней рабочей частоте f_l при напряжении U_{lmin} .
μ		Начальная проницаемость материала сердечника.
μ_{Δ}		Начальная эквивалентная проницаемость материала сердечника с учетом магнитного зазора.
Δ	mm	Толщина немагнитной прокладки между обеими частями сердечника. В теоретических выкладках фигурирует понятие зазора, который равен расстоянию, разрывающему силовые линии магнитного поля сердечника. В трансформаторах с броневым или стержневым сердечником немагнитная прокладка дважды разрывает силовые линии, поэтому ее толщина в два раза меньше зазора
$Z_{\%}$		Процентное выражение толщины магнитного зазора через среднюю длину магнитной силовой линии сердечника.
A, D		Конструктивные коэффициенты сердечника
q_c	sm ²	Чистое сечение магнитного материала сердечника в катушке трансформатора.
l_c	sm	Средняя длина магнитной силовой линии сердечника.
l_0	sm	Средняя длина витка провода в катушке трансформатора.
d_1	mm	Диаметр без изоляции провода первичной обмотки.
d_2	mm	Диаметр без изоляции провода вторичной обмотки.

Специфические обозначения конструктивного расчета

d_{1is}	mm	Диаметр с изоляцией провода первичной обмотки.
d_{2is}	mm	Диаметр с изоляцией провода вторичной обмотки.
δ_0	mm	Толщина дополнительной изоляции катушки.
δ_1	mm	Толщина межслоевой изоляции первичной обмотки.
δ_2	mm	Толщина межслоевой изоляции вторичной обмотки.
δ_{12}	mm	Толщина межсекционной изоляции.
k_{ls}		Коэффициент для вычисления индуктивности рассеяния.
k_1, k_2		Коэффициенты выпучивания обмоток.

\dot{w}		Количество витков в одной цилиндрической секции первичной обмотки, учитываемых при создании индукции .
\ddot{w}		Количество витков в одной цилиндрической секции вторичной обмотки, учитываемых при создании индукции .
\dot{r}		Активное сопротивление первичной обмотки одной цилиндрической секции.
\dot{r}		Активное сопротивление вторичной обмотки одной цилиндрической секции.
\dot{L}	H	Индуктивность первичной обмотки одной цилиндрической секции.
\dot{L}_s	H	Индуктивность рассеяния одной цилиндрической секции, приведенная к числу витков первичной обмотки в этой секции.
\dot{v}		Количество физических витков в одном слое первичной обмотки.
\ddot{v}		Количество физических витков в одном слое вторичной обмотки.
\dot{W}		Количество физических витков первичной обмотки в одной цилиндрической секции.
\dot{W}		Количество физических витков вторичной обмотки в одной цилиндрической секции.
Λ_1		Длина провода первичной обмотки трансформатора.
Λ_2		Длина провода вторичной обмотки трансформатора.
M_1		Вес меди первичной обмотки трансформатора.
M_2		Вес меди вторичной обмотки трансформатора.

2. Предварительный расчет

Ссылка на конкретную страницу приложения Tube TransCalc далее выделяется цветом, например: [Исходные таблицы и графики. Магнитные свойства материала сердечника](#) обозначают страницу “Магнитные свойства материала сердечника”, расположенную на странице “Исходные таблицы и графики” первого уровня.

2.1. Исходные данные

В этом подразделе заголовки уровня 3 и порядок их расположения соответствуют заголовкам и порядку расположения блоков исходных данных на странице [Предварительный расчет](#) приложения Tube TransCalc.

Симметрия и конструкция

Описаны в разделах [Варианты симметрии обмоток](#) и [Конструктивные варианты обмоток](#).

Материал сердечника

Выбор [магнитного материала](#) производится по его названию – Н-45, Э42 и т.д. Перечень материалов, с которыми Tube TransCalc в состоянии работать автоматически, далее называется стандартным. Если сердечник изготовлен из другого материала, то он считается нестандартным. При этом на соответствующих шагах расчета нужные значения могут быть введены вручную.

Мощность и ток подмагничивания

P_1, I_0 .

Комбинация значений этих параметров определяет выбор пути расчета (в зависимости от величины мощности и наличия тока подмагничивания). Визуально это выражается в появлении на экране соответствующего набора панелей с окнами для параметров.

Общие параметры

R_1, R_2 ,

R_{\sim} – для трансформатора с заданным сопротивлением переменному току первичной обмотки;

R_{out} – для трансформаторного каскада, имеющего заданное выходное сопротивление;

$f_1, M_{dbl}, f_h, M_{dbh}, \eta, c$ – для активной и индуктивной нагрузки;

L_2 – для индуктивной нагрузки.

2.2. Расчет

- Мощность в нагрузке:

$$P_2 = P_1 \eta .$$

- Коэффициент трансформации:

- о для трансформатора с заданным R_{\sim} :

$$n = \sqrt{\frac{R_2}{\eta R_{\sim}}} .$$

- о для трансформатора с заданным R_{out} :

$$n = \sqrt{\frac{(R_{out} + R_2)\eta - R_2}{\eta R_i}} .$$

- Сопротивление первичной обмотки переменному току для трансформатора с заданным R_{out} :

$$R_{\sim} = \frac{R_i}{\left(1 + \frac{R_{out}}{R_2}\right)\eta - 1} .$$

- Допустимые активные сопротивления первичной и вторичной обмоток:

$$r_1 = \frac{c}{1+c} R_{\sim} (1-\eta) , \quad r_2 = \frac{1}{1+c} R_2 \frac{1-\eta}{\eta} .$$

- Сопротивление эквивалентного генератора на нижней частоте:

$$R_{eqv} = \frac{(R_i + r_1)(R_{\sim} - r_1)}{R_i + R_{\sim}} .$$

- Минимальная индуктивность первичной обмотки:

$$L_1 = \frac{R_{eqv}}{2\pi f_i \sqrt{M_i^2 - 1}} , \quad \text{где } M_i = 10^{\frac{-M_{dbi}}{20}} .$$

- Максимальные значения напряжений на концах первичной и вторичной обмотки трансформатора:

$$U_{1\max} = \sqrt{2P_1 R_{\sim}} ; \quad U_{2\max} = K_0 U_{1\max} , \quad \text{где } K_0 = n\eta \frac{R_{\sim}}{R_i + R_{\sim}} - \text{коэффициент передачи напряжения.}$$

- Выходное сопротивление для трансформатора с заданным R_{\sim} :

$$R_{out} = n^2 R_i + R_2 \frac{1-\eta}{\eta} .$$

- Коэффициент демпфирования:

$$dF = \frac{R_2}{R_{out}} .$$

Расчет в зависимости от мощности и тока подмагничивания

Выбор одного из четырех возможных режимов Tube TransCalc осуществляет автоматически на основании введенных выше значений мощности и тока.

В каждом из четырех следующих пунктов требуется выполнить выбор сердечника по его конструктивным данным. Если установлен “Выбор из списка”, то приложение Tube TransCalc предлагает [список сердечников](#), имеющих конструктивные данные, удовлетворяющие вычисленным коэффициентам А и D. Выбор сердечника приводит к автоматическому вводу из базы данных требуемых конструктивных данных.

Трансформатор малой мощности без подмагничивания

- Определяется значение μ :
 - о для стандартного материала автоматически по сплайн-функции $\mu(B)$;
 - о для нестандартного материала – по введенному вручную значению μ .

- Конструктивный коэффициент:

$$A = \frac{(1+c)L_1}{\mu r_1}.$$

- По найденному значению А выбирается сердечник, определяются значения q_c, l_c, l_0 .
- Количество витков первичной обмотки:

$$w_1 = \sqrt{\frac{10^9}{4\pi} \frac{L_1 l_c}{\mu q_c}}.$$

Трансформатор малой мощности с подмагничиванием

- По значению $L_1 I_0^2$ определяется значение μ_Δ :
 - о для стандартного материала автоматически по сплайн-функции $\mu_\Delta(L_1 I_0^2)$;
 - о для нестандартного материала – по введенному вручную значению μ_Δ .

- Конструктивный коэффициент:

$$A = \frac{(1+c)L_1}{\mu_\Delta r_1}.$$

- По найденному значению А выбирается сердечник, определяются значения q_c, l_c, l_0 .
- Предварительное количество витков первичной обмотки:

$$w' = \sqrt{\frac{10^9}{4\pi} \frac{L_1 l_c}{\mu_\Delta q_c}}.$$

- Число ампер-витков первичной обмотки:

$$aw'_0 = \frac{I_0 w'}{l_c}.$$

- По значению aw'_0 уточняется значение μ_Δ :

- о для стандартного материала – с помощью сплайн-функции $\mu_\Delta(aw'_0)$ итерациями до получения неизменной целой части числа витков, вычисленных по формуле $w_1 = \sqrt{\frac{10^9}{4\pi} \frac{L_1 l_c}{\mu_\Delta q_c}}$;

- о для нестандартного материала – по введенному вручную значению μ_Δ .

- Окончательное количество витков первичной обмотки:

$$w_1 = \sqrt{\frac{10^9}{4\pi} \frac{L_1 l_c}{\mu_\Delta q_c}}.$$

Трансформатор средней мощности без подмагничивания

- задается значение K_d .
- По таблице, расположенной на странице [Исходные таблицы и графики. Магнитные свойства материала сердечника](#) выбирается допустимое значение амплитуды переменной составляющей индукции B_{adm} на нижней рабочей частоте f_l .

- Индукция в сердечнике для минимального значения сигнала:

$$B_{\min} = 10^{\frac{K_d}{20}} B_{adm}.$$

- По рассчитанному значению B_{\min} определяется значение μ :
 - для стандартного материала автоматически по сплайн-функции $\mu(B)$;
 - для нестандартного материала – по введенному вручную значению μ .

- Конструктивные коэффициенты:

$$A = \frac{(1+c)L_1}{\mu r_1}, \quad D = \frac{1+c\eta}{B_{adm} f_l} \sqrt{\frac{P_2}{c\eta(1-\eta)}}.$$

- По найденным значениям A и D выбирается сердечник, определяются значения q_c, l_c, l_0 . Коэффициенты A и D сердечника должны быть не меньше рассчитанных.
- Количество витков первичной обмотки по допустимой индукции в сердечнике:

$$w_B = \frac{10^8 U_{1\max} (R_{\sim} - r_1)}{2\pi f_l q_c B_{adm} R_{\sim}}.$$

- Количество витков первичной обмотки по требуемой индуктивности:

$$w_L = \sqrt{\frac{10^9 L_1 l_c}{4\pi \mu q_c}}.$$

- $w_B \geq w_L$

- $w_1 = w_B$;
- Индуктивность первичной обмотки:

$$L_1 = \frac{4\pi \mu q_c w_1^2}{10^9 l_c}.$$

- Частотные искажения на нижней рабочей частоте:

$$M = \sqrt{\left(\frac{R_{eqv}}{2\pi L_1 f_l}\right)^2 + 1}, \quad M_{Db} = 20 \lg M.$$

- $w_B < w_L$

- $w_1 = w_L$;
- Индукция в сердечнике для минимального значения сигнала:

$$B_{\min} = \frac{10^8 U_{1\min} (R_{\sim} - r_1)}{2\pi f_l q_c w_1 R_{\sim}}, \quad \text{где } U_{1\min} = 10^{\frac{K_d}{20}} U_{1\max}.$$

- По рассчитанному значению B_{\min} определяется значение μ :
 - для стандартного материала автоматически по сплайн-функции $\mu(B)$;
 - для нестандартного материала – по введенному вручную значению μ .

- $w_1 = \sqrt{\frac{10^9 L_1 l_c}{4\pi \mu q_c}}.$

Трансформатор средней мощности с подмагничиванием

- По таблице, расположенной на странице [Исходные таблицы и графики. Магнитные свойства материала сердечника](#), выбирается допустимое значение амплитуды переменной составляющей индукции B_{adm} на нижней рабочей частоте f_l .

- По значению $L_1 I_0^2$ определяется значение μ_Δ :

- о для стандартного материала автоматически по сплайн-функции $\mu_\Delta(L_1 I_0^2)$;
- о для нестандартного материала – по введенному вручную значению μ_Δ .

- Конструктивные коэффициенты:

$$A = \frac{(1+c)L_1}{\mu_\Delta r_1}, \quad D = \frac{1+c\eta}{B_{don} f_n} \sqrt{\frac{P_2}{c\eta(1-\eta)}}.$$

- По найденным значениям А и D выбирается сердечник, определяются значения q_c, l_c, l_0 . Коэффициенты А и D сердечника должны быть не меньше рассчитанных.

- Количество витков первичной обмотки по допустимой индукции в сердечнике:

$$w_B = \frac{10^8 U_{1max} (R_- - r_1)}{2\pi f_l q_c B_{adm} R_-}.$$

- Количество витков первичной обмотки по требуемой индуктивности:

$$w_L = \sqrt{\frac{10^9}{4\pi} \frac{L_1 l_c}{\mu_\Delta q_c}}.$$

- $w_B \geq w_L$**

- о $w_1 = w_B$;

- о Число ампер-витков первичной обмотки:

$$aw'_0 = \frac{I_0 w_1}{l_c}.$$

- о По значению aw'_0 уточняется значение μ_Δ .

- для стандартного материала автоматически по сплайн-функции $\mu_\Delta(a\omega_0)$;

- для нестандартного материала – по введенному вручную значению μ_Δ .

- о Индуктивность первичной обмотки:

$$L_1 = \frac{4\pi \mu_\Delta q_c w_1^2}{10^9 l_c}.$$

- о Частотные искажения на нижней рабочей частоте:

$$M = \sqrt{\left(\frac{R_{eqv}}{2\pi L_1 f_l}\right)^2 + 1}, \quad M_{Db} = 20 \lg M.$$

- $w_B < w_L$**

- о Число ампер-витков первичной обмотки:

$$aw'_0 = \frac{I_0 w_L}{l_c}.$$

- о По значению aw'_0 уточняется значение μ_Δ .

- для стандартного материала автоматически по сплайн-функции $\mu_\Delta(a\omega_0)$ итерациями до получения неизменной целой части числа витков, вычисленных по формуле $w_1 = \sqrt{\frac{10^9}{4\pi} \frac{L_1 l_c}{\mu_\Delta q_c}}$;

- для нестандартного материала – по введенному вручную значению μ_Δ .

- о $w_1 = \sqrt{\frac{10^9}{4\pi} \frac{L_1 l_c}{\mu_\Delta q_c}}$.

Немагнитная прокладка для трансформатора с подмагничиванием

Этот пункт является составной частью расчета трансформатора с подмагничиванием.

- Окончательное значение числа ампер-витков первичной обмотки:

$$aw_0 = \frac{I_0 w_1}{I_c}.$$

- По значению aw_0 определяется процентное значение оптимального зазора:
 - для стандартного материала автоматически по сплайн-функции $Z_\Delta(a\omega_0)$;
 - для нестандартного материала автоматизация расчета не предусмотрена.
- Толщина немагнитной прокладки между обеими частями сердечника:

$$\Delta = \frac{z\% l_c}{20} [\text{mm}].$$

Завершение расчетов

- Значение числа витков вторичной обмотки:

$$w_2 = w_1 n.$$

- Отклонение частотной характеристики для верхней рабочей частоты:
 - для активной нагрузки:

$$M_h = 10^{\frac{-M_{abh}}{20}};$$

- для индуктивной нагрузки без корректирующей цепочки:

$$M_h = 10^{\frac{Mh}{20}}.$$

- Максимально допустимая индуктивность рассеяния для активной нагрузки:

$$L_s = \frac{R_i + R_{\sim}}{2\pi f_h} \sqrt{M_h^2 - 1}.$$

- Индуктивность рассеяния в случае индуктивной нагрузки с компенсацией частотных искажений ($M_{abh} = 0$):

- Без корректирующей цепочки:

$$L_s = \frac{R_i + r_1 + r_2'}{R_2'} L_2'.$$

- С корректирующей цепочкой:

$$L_s = L_2' \frac{1-\eta}{\eta}, \quad R_k = R_{\sim}, \quad C_k = 10^6 \frac{L_s + L_2}{R_{\sim}^2} \quad [\text{uF}].$$

- Промежуточные параметры:

$$L_2' = \frac{L_2}{n^2}, \quad r_2' = \frac{r_2}{n^2}, \quad R_2' = \frac{R_2}{n^2}.$$

- Диаметр медных проводов без изоляции для температуры 20°C :

$$q_1 = 10^{-2} \sqrt{\frac{7w_1 l_0}{\pi r_1}} [\text{mm}]; \quad q_2 = 10^{-2} \sqrt{\frac{7w_2 l_0}{\pi r_2}} [\text{mm}].$$

- Для последовательно соединяемых половинок обмоток

$$d_1 = q_1, \quad d_2 = q_2.$$

- Для параллельно соединяемых половинок обмоток

$$d_1 = \frac{q_1}{\sqrt{2}}, \quad d_2 = \frac{q_2}{\sqrt{2}}.$$

- Значение действующей переменной магнитной индукции на нижней частоте:

$$B_{\max} = \frac{10^8 U_{1\max} (R_{\sim} - r_1)}{2\pi f_l q_c w_1 R_{\sim}}.$$

- Параметры \dot{w} , \ddot{w} , \dot{r} , \ddot{r} , \dot{L} и \dot{L}_s вычисляются по формулам раздела [Конструктивные варианты обмоток](#).

3. Конструктивный расчет

Ссылка на конкретную страницу приложения Tube TransCalc далее выделяется цветом, например: [Исходные таблицы и графики. Магнитные свойства материала сердечника](#) обозначают страницу “Магнитные свойства материала сердечника”, расположенную на странице “Исходные таблицы и графики” первого уровня.

3.1. Конструктивные данные

В этом подразделе заголовки уровня 3 и 4 соответствуют заголовкам вкладок и панелей на странице [Конструктивный расчет. Конструктивные данные](#) приложения Tube TransCalc.

Топология

Симметрия и конструкция

Описаны в разделах [Варианты симметрии обмоток](#) и [Конструктивные варианты обмоток](#).

Соединение слоев внутри секции

Описано в разделе [Соединение слоев внутри цилиндрической секции](#).

Численные параметры

Автопараметры сердечника

- Выбор [магнитного материала](#) производится по его названию – Н-45, Э42 и т.д. Перечень материалов, с которыми Tube TransCalc в состоянии работать автоматически, далее называется стандартным. Если сердечник изготовлен из другого материала, то он считается нестандартным. При этом на соответствующих шагах расчета нужные значения могут быть введены вручную (при условии, что они известны).
- [Выбор сердечника](#) из базы данных позволяет автоматически установить в качестве исходных данных размеры сердечника. Эти данные можно использовать в качестве предварительных для оценки возможностей сердечника. При окончательном расчете желательно вручную ввести реально измеренные величины. Размеры катушки устанавливаются автоматически по данным окна сердечника. Они не учитывают толщину материала катушки, а потому должны быть откорректированы вручную по фактическим размерам.

Сердечник

Обозначение размеров сердечника, а также таблица коэффициентов заполнения сердечника показаны на странице [Исходные таблицы и графики. Размеры катушки и сердечника](#).

- Размеры сердечника: y_1 [mm], y_2 [mm], y_3 [mm], b [mm], h [mm].
- Коэффициент заполнения сердечника k_c .

- Расчет параметров сердечника:

- Чистое сечение магнитного материала в катушке трансформатора $q_c = \frac{y_1 y_2 k_c}{100} [sm^2]$;

- Средняя длина магнитной силовой линии сердечника:

- Стержневой сердечник:

- При условии $y_3 > y_1$: $l_c = 0,1 \left\{ 2h + \frac{y_1}{y_3} \left[2b + \frac{\pi(y_1 + y_3)}{2} \right] \right\} [sm]$;

- При условии $y_3 = y_1$: $l_c = 0,1 [2h + 2b + \pi y_1] [sm]$;

- Броневой сердечник:

- При условии $y_3 > 0,5 y_1$: $l_c = 0,1 \left\{ h + \frac{y_1}{y_3} \left[0,5h + 2b + \frac{\pi}{16} y_1 + \frac{3\pi}{8} y_3 \right] \right\} [sm]$;

- При условии $y_3 = 0,5 y_1$: $l_c = 0,1 \left[2h + 2b + \frac{\pi}{2} y_1 \right] [sm]$.

Катушка

Обозначение размеров катушки показано на странице [Исходные таблицы и графики. Размеры катушки и сердечника](#).

Размеры катушки: V_h, V_b, V_1, V_2 . Параметр Δ_h задается исходя из конструктивных соображений.

Обмотки

- Диаметры проводов: $d_1, d_{1is}, d_2, d_{2is}$.
- Количество витков в слоях: \dot{v}, \ddot{v} . Эти параметры предназначены для установки одинаковых значений в строках таблицы слоев для соответствующих обмоток.
- Коэффициенты выпучивания: k_1, k_2 .
- Толщина изоляции: $\delta_0, \delta_1, \delta_2, \delta_{12}$.
- Коэффициент для вычисления индуктивности рассеяния k_{is} . Этот коэффициент, входящий в формулу индуктивности рассеяния, вероятнее всего нужно принимать равным единице, так как рекомендуемые Г.С. Цыкиным значения предназначены для уменьшения индуктивности рассеяния, которая вычислена при максимальной толщине обмоток. (При толщине обмоток, равной максимальной толщине выпученных обмоток, площадь сечения поперек потока рассеяния больше, чем она есть на самом деле.)

Таблица слоев

Основные манипуляции с таблицей слоев производятся перетаскиванием мышью образца слоя в нужную строку таблицы, слоя из одной строки таблицы в другую, а также ненужного слоя в корзину. Пустая строка таблицы слоем не является. Параметры слоев задаются на вкладке [Обмотки](#). Слои разных обмоток выделяются своим цветом шрифта на белом фоне. Если по слою обмотки щелкнуть мышью, цвет шрифта и цвет фона меняются между собой – слой становится активным. Слой изоляции активным быть не может.

Число витков активного слоя простой обмотки можно изменить, введя нужное значение в окно “Число витков”, расположенное у правого верхнего угла таблицы слоев. Номер группы активного слоя сложной обмотки можно установить или изменить, введя нужное значение в то же окно (при активном слое сложной обмотки оно называется “Номер группы”).

Деление слоев изоляции на межслойные и межсекционные условно. Нет причин, мешающих использовать любой слой изоляции в любом месте таблицы. Последовательно расположенные слои изоляции рассматриваются программой как один слой суммарной толщины.

Процедура вычисления толщины прослоек, возникающих за счет выпучивания обмоток, добавляет эти прослойки к толщине изоляции, разделяющей соседние слои. К полученной величине также добавляется толщина собственной изоляции проводов. По этим причинам в таблице [Таблицы и графики конструктивного расчета. Таблица индуктивности рассеяния](#) толщина слоев с проводами равна их диаметрам без изоляции, а толщина межслоевой и межсекционной изоляции больше заданной.

Заполненная таблица слоев имитирует одну (или единственную) цилиндрическую секцию трансформатора и служит набором исходных данных для вычисления параметров обмоток трансформатора в целом. Алгоритмы вычислений основаны на принципах, изложенных в статье А.Н. Шевченко [Вычисление индуктивности рассеяния трансформатора с произвольным расположением концентрических секций](#).

Вначале вычисляются параметры цилиндрической секции:

- Количество физических витков обмоток \dot{W} и \ddot{W} .
- Количество витков, учитываемых при создании индукции \dot{w} и \ddot{w} . Вычисляются по правилам, изложенным в разделе [Соединение слоев внутри цилиндрической секции](#).
- Длина провода в каждом слое обмотки \dot{l}_i и \ddot{l}_i .
- Активное сопротивление каждого слоя обмотки: $\dot{r}_i = \frac{1,75 \cdot 10^{-5} \dot{l}_i}{\pi d_1^2}$, $\ddot{r}_i = \frac{1,75 \cdot 10^{-5} \ddot{l}_i}{\pi d_2^2}$.
- Активные сопротивления обмоток \dot{r} и \ddot{r} . Вычисляются по значениям \dot{r}_i и \ddot{r}_i по правилам, зависящим от характера сложности обмотки.
- Индуктивность первичной обмотки \dot{L} .
- Индуктивность рассеяния одной цилиндрической секции, приведенная к числу витков первичной обмотки в этой секции \dot{L}_s .

Для каждой обмотки по таблицам из раздела [Конструктивные варианты обмоток](#) вычисляются следующие параметры:

- Количество витков, учитываемых при создании индукции w_1 и w_2 .
- Активные сопротивления обмоток r_1 и r_2 .
- Индуктивность первичной обмотки L_1 .
- Индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к первичной обмотке L_s .

Величины, производные от параметров обмоток:

- Коэффициент трансформации $n = \frac{w_2}{w_1}$.
- Отношение активного сопротивления первичной обмотки к приведенному активному сопротивлению вторичной $c = \frac{r_1 n^2}{r_2}$.

3.2. Магнитные и электрические параметры

В этом подразделе заголовки уровня 3 и 4 соответствуют заголовкам вкладок и панелей на странице [Конструктивный расчет. Магнитные и электрические параметры](#) приложения Tube TransCalc.

Тип нагрузки

L_2 – для индуктивной нагрузки.

Согласование импедансов

- Заданы R_{\sim} и R_{out} : $R_2 = (R_{\sim} - r_1 - r_2')n^2$, $R_i = \frac{R_{out}}{n^2} - r_1 - r_2'$;
- заданы R_{\sim} и R_i : $R_2 = (R_{\sim} - r_1 - r_2')n^2$, $R_{out} = (R_i + r_1 + r_2')n^2$;
- заданы R_2 и R_{out} : $R_{\sim} = r_1 + r_2' + R_2$, $R_i = \frac{R_{out}}{n^2} - r_1 - r_2'$;
- заданы R_2 и R_i : $R_{\sim} = r_1 + r_2' + R_2$, $R_{out} = (R_i + r_1 + r_2')n^2$.

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{R_2}{R_2 + r_1 n^2 + r_2'}$$

Мощность сигнала, нижняя рабочая частота и допустимая индукция

- Выбор между U_{1max} , U_{2max} , P_1 и P_2 :
 - о задано U_{1max} : $U_{2max} = K_0 U_{1max}$, $P_1 = \frac{U_{1max}^2}{2R_{\sim}}$, $P_2 = P_1 \eta$;
 - о задано U_{2max} : $U_{1max} = \frac{U_{2max}}{K_0}$, $P_1 = \frac{U_{1max}^2}{2R_{\sim}}$, $P_2 = P_1 \eta$;
 - о задано P_1 : $U_{1max} = \sqrt{2R_{\sim} P_1}$, $U_{2max} = K_0 U_{1max}$, $P_2 = P_1 \eta$;
 - о задано P_2 : $P_1 = \frac{P_2}{\eta}$, $U_{1max} = \sqrt{2R_{\sim} P_1}$, $U_{2max} = K_0 U_{1max}$.

$K_0 = n\eta \frac{R_{\sim}}{R_i + R_{\sim}}$ – коэффициент передачи напряжения.

- Отыскание отсутствующего значения f_l , U_{1max} или B_{adm} :
 - о заданы f_l и U_{1max} : $B_{adm} = \frac{10^{10} U_{1max} (R_{\sim} - r_1)}{2\pi f_l q_c w_1 R_{\sim}}$;
 - о заданы B_{adm} и U_{1max} : $f_l = \frac{10^{10} U_{1max} (R_{\sim} - r_1)}{2\pi B_{adm} q_c w_1 R_{\sim}}$;
 - о заданы f_l и B_{adm} : $U_{1max} = \frac{2 \cdot 10^{-10} \pi B_{adm} f_l q_c w_1 R_{\sim}}{R_{\sim} - r_1}$.

Магнитная проницаемость

Трансформатор без подмагничивания

- $P_1 \leq 0,1W$ – $\mu = \mu(0)$, где $\mu(B)$ – сплайн-функция.
- $P_1 > 0,1W$ – $\mu = \mu(B_{\min})$, где $\mu(B)$ – сплайн-функция, а B_{\min} определяется в зависимости от условия:
 - о задано K_d :
$$U_{1\min} = U_{1\max} \cdot 10^{\frac{K_d}{20}}, \quad B_{\min} = \frac{10^{10} U_{1\min} (R_{\sim} - r_1)}{2\pi f_l q_c w_1 R_{\sim}};$$
 - о задано $U_{1\min}$:
$$K_d = 20 \lg \frac{U_{1\min}}{U_{1\max}}, \quad B_{\min} = \frac{10^{10} U_{1\min} (R_{\sim} - r_1)}{2\pi f_l q_c w_1 R_{\sim}};$$
 - о задано B_{\min} :
$$U_{1\min} = \frac{2 \cdot 10^{-10} \pi B_{\min} f_l q_c w_1 R_{\sim}}{R_{\sim} - r_1}, \quad K_d = 20 \lg \frac{U_{1\min}}{U_{1\max}}.$$

Трансформатор с подмагничиванием

- Задано I_0 :
$$aw_0 = \frac{I_0 w_1}{l_c}, \quad \mu = \mu(B_{\min}), \quad \Delta = \frac{Z_{\%}(aw_0) l_c}{20};$$
- Задано Δ :
$$\Delta_{\%} = \frac{20\Delta}{l_c}, \quad aw_0 = aw_0(Z_{\%}), \quad \mu = \mu_{\Delta}(a\omega_0); \quad I_0 = \frac{(aw_0) \cdot l_c}{w_1}.$$

$Z_{\%}(aw_0)$ и $aw_0(Z_{\%})$ – взаимно обратные сплайн-функции.

3.3. Расчет остальных параметров

- Коэффициент демпфирования:

$$dF = \frac{R_2}{R_{out}}.$$

- Индуктивность первичной обмотки:

$$L_1 = \frac{4\pi\mu q_c w_1^2}{10^9 l_c}.$$

- Значение действующей переменной магнитной индукции на нижней рабочей частоте:

$$B_{\max} = \frac{10^8 U_{1\max} (R_{\sim} - r_1)}{2\pi f_l q_c w_1 R_{\sim}}.$$

- Корректирующая цепочка, подключаемая параллельно первичной обмотке трансформатора (для индуктивной нагрузки):

$$R_k = R_{\sim}, \quad C_k = \frac{L_s + L_2}{R_{\sim}^2} \text{ [F]}.$$

3.4. Частотная и фазовая характеристики

Частотная характеристика

- Сопротивление эквивалентного генератора на нижней рабочей частоте:

$$R_{eqv} = \frac{(R_i + r_1)(R_{\sim} - r_1)}{R_i + R_{\sim}}.$$

- Отклонение частотной характеристики на нижних частотах:

$$M_{dbl} = 20 \log_{10} M_l, \text{ где } M_l = \sqrt{1 + \left(\frac{R_{eqv}}{2\pi f_l L_1} \right)^2}.$$

- Отклонение частотной характеристики на верхних частотах:

$$M_{dbh} = 20 \log_{10} M_h, \text{ где:}$$

$$M_h = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f_h L_s}{R_i + R_{\sim}} \right)^2} \quad \text{— для активной нагрузки;}$$

$$M_h = \sqrt{\frac{1 + (2\pi f_h A)^2}{1 + (2\pi f_h B)^2}} \quad \text{— для индуктивной нагрузки;}$$

$$A = \frac{L_s + L'_2}{R_i + R_{\sim}}; \quad B = \frac{L'_2}{R'_2}.$$

Фазовая характеристика

- Отклонение фазовой характеристики на нижних частотах:

$$\varphi^\circ = \operatorname{arctg} \left(\frac{R_{eqv}}{2\pi f L_1} \right) \frac{180^\circ}{\pi}.$$

- Отклонение фазовой характеристики на верхних частотах:

$$\varphi^\circ = \operatorname{arctg} \left(\frac{2\pi f L_s}{R_i + R_{\sim}} \right) \frac{180^\circ}{\pi} \quad \text{— для активной нагрузки;}$$

$$\varphi^\circ = \operatorname{arctg} \left[2\pi f \frac{L'_2(R_i + R_{\sim}) - R'_2(L_s + L'_2)}{R'_2(R_i + R_{\sim}) + 2\pi f L'_2(L_s + L'_2)} \right] \frac{180^\circ}{\pi} \quad \text{— для индуктивной нагрузки.}$$

4. Приложения

4.1. Условие активности нагрузки трансформатора

$$R_2 \leq \frac{1}{6\pi f_s (C_{mp} + C_m + C_n)}, \text{ где:}$$

C_{mp} – собственная емкость трансформатора (15–250 пф);

C_m – емкость монтажа (при неэкранированных проводах 5–15 пф);

C_n – входная емкость ступени,

f_s – верхняя граница диапазона частот.

Для однотактной ступени с триодом или экранированной лампой при активной нагрузке в режиме “А” без обратной связи:

$$C_n = C_{вх} + C_{np} \left(1 + \frac{U_a}{U_c} \right), \text{ где}$$

$C_{вх}$ – статическая емкость управляющая сетка-катод (входная емкость лампы);

C_{np} – статическая емкость управляющая сетка-анод (проходная емкость лампы);

U_a – переменная составляющая напряжения на аноде;

U_c – переменная составляющая напряжения на управляющей сетке.

4.2. Варианты симметрии обмоток

Варианты симметрии обмоток частично являются производными от режимов работы усилительного каскада, но не имеют с ними взаимно однозначного соответствия, поскольку трансформатор, как связующее звено между каскадом усиления и нагрузкой, должен также удовлетворять требованиям устройства, подключенного к вторичной обмотке.

Всего возможны шесть режимов работы каскада при усилении низкочастотного сигнала: A_1 , A_2 , AB_1 , AB_2 , B_1 , B_2 . Последние два – B_1 и B_2 позволяют получить от усилителя максимальную мощность, но при больших искажениях. В наши дни имеется великое множество полупроводниковых усилителей, способных выдать во много раз большую мощность при гораздо меньших искажениях. По этой причине средства расчета трансформатора для режима В в приложении Tube TransCalc отсутствуют.

При расчете трансформатора, являющегося нагрузкой лампы, нет различия между отсутствием и наличием сеточного тока лампы, поэтому количество режимов каскада, к которому может быть подключена первичная обмотка трансформатора, сокращается до двух: А и АВ. Эти режимы по отношению к трансформатору являются комбинацией двух факторов:

- отсутствием или наличием деления обмотки на две равные половинки – асимметрия каскада в однотактном режиме А или симметрия в двухтактных режимах А и АВ;
- характером протекания переменного тока в половинке первичной обмотки, являющейся нагрузкой одной из ламп двухтактного каскада:
 - ток протекает в течение всего периода гармонического сигнала в режиме А;
 - ток отсутствует в течение меньше чем полупериода гармонического сигнала в режиме АВ.

За счет выбора рабочей точки лампы в режиме АВ при малой амплитуде сигнала на управляющей сетке форма сигнала на аноде каждой лампы повторяет форму входного сигнала – т.е. лампы и каскад в целом работают в режиме А. С увеличением амплитуды в выходном сигнале верхушка одной полуволны каждой лампы “обрезается” (чем больше сигнал, тем сильнее), но за счет того, что лампы “обрезают” противоположные верхушки поочередно, суммарный сигнал с некоторой точностью повторяет синусоиду. Расхождение формы суммарного сигнала с синусоидой больше, чем в чистом режиме А, поэтому и коэффициент нелинейных искажений в режиме АВ больше. Преимуществом данного режима по сравнению с режимом А является выигрыш по мощности.

Сокращения А и АВ отражают соответствие варианта исполнения обмотки и режима каскада, поэтому из них образованы следующие обозначения вариантов первичной обмотки:

- А – первичная обмотка трансформатора, являющаяся нагрузкой однотактного каскада, работающего в режиме А, или другого несимметричного источника сигнала (входной трансформатор);
- АА – первичная обмотка трансформатора, являющаяся нагрузкой двухтактного каскада, работающего в режиме А, или другого симметричного источника сигнала (входной трансформатор);
- АВ – первичная обмотка трансформатора, являющаяся нагрузкой двухтактного каскада, работающего в режиме АВ.

При усилении звукового сигнала во вторичной обмотке ток течет на протяжении всего периода. И хотя во вторичной обмотке, нагруженной на лампу, работающую с токами сетки, токи в разных полупериодах различны, это не является поводом к применению по отношению к вторичной обмотке категорий А или В. Основным фактором, определяющим различия между вариантами исполнения вторичных обмоток, является асимметрия или симметрия подключенной к ней нагрузки, что приводит к исполнению вторичной обмотки одной или двумя частями. Эти варианты обозначаются как I и II.

Характер протекания токов во вторичной обмотке, питающей каскад с токами сетки, имеет отношение к гармоническим искажениям, вносимых трансформатором. (См. стр. 172-173, Г.С. Цыкин, “Трансформаторы низкой частоты”, Связьиздат, 1955.)

Сокращенные обозначения

Приведенные выше соглашения дают следующие сокращенные обозначения вариантов трансформатора в зависимости от симметрии обмоток:

A/I, A/II,
AA/I, AA/II,
AB/I.

(Теоретически возможный вариант AB/II отброшен как крайне маловероятный.) Данная классификация близка к конструктивным вариантам, но не совпадает с ними, так как число конструктивных вариантов значительно больше за счет последовательного или параллельного соединения частей обмоток, различий между однокатушечной и двухкатушечной конструкциями (броневой или стержневой сердечник), а также за счет свободы выбора количества секций при секционировании обмоток.

Связь вариантов симметрии с другими параметрами

Магнитный зазор

Протекание тока через первичную обмотку характеризуется не только формой гармонического сигнала, но также наличием или отсутствием в первичной обмотке постоянного тока. Если трансформатор является входным или схемотехника каскада содержит средства для отсечки постоянной составляющей в первичной обмотке, он называется “трансформатор без подмагничивания”.

Если первичная обмотка трансформатора или ее половинка является нагрузкой лампы не только по переменному, но и по постоянному току, возможны варианты. В режимах A и AB ток покоя лампы не равен нулю. Однако эффект от протекания постоянного тока в первичной обмотке однотактного и двухтактного трансформаторов различен. В однотактном трансформаторе постоянный ток вызывает подмагничивание сердечника, что приводит к необходимости разрыва магнитных линий сердечника при помощи зазора определенной толщины. В двухтактном трансформаторе постоянные составляющие анодного тока протекают по разным половинкам первичной обмотки навстречу друг другу и поэтому вызываемые ими магнитные поля взаимно компенсируются. При дисбалансе плеч двухтактной схемы за счет различия этих токов может возникнуть магнитное поле, требующее введения магнитного зазора.

Примером такого подхода является продукция фирмы [Lundahl Transformers, audio transformer and tube amplifier transformer manufacturer](#). Push-pull трансформаторы этой фирмы LL1620, LL1623 и LL1627 имеют зазор 25 микрон между половинками сердечника для предотвращения намагничивания сердечника постоянным током, вызванным дисбалансом плеч двухтактного каскада.

Относительно пользы магнитного зазора в трансформаторах, работающих без подмагничивания, имеют хождение слухи о мифических трансформаторах некоего Partridge, а также:

- *рассуждения в пользу такого решения на стр. 361 учебника Г.В. Войшвилло “Усилители низкой частоты”, Связьиздат, 1939;*
- *замечания обратного смысла, сделанные Г.С. Цыкиным на стр. 163 его монографии “Трансформаторы низкой частоты”, Связьиздат, 1955.*

Теоретически программа Tube TransCalc позволяет рассчитывать двухтактные трансформаторы, как без подмагничивания, так и с подмагничиванием. Однако сплайн-функции, встроенные в приложение, не позволяют определить начальную эквивалентную магнитную проницаемость для слишком малых токов подмагничивания, так как для этого нет исходных экспериментальных данных.

Внутреннее сопротивление источника сигнала переменному току

Расчетные формулы трансформатора содержат параметр R_i – внутреннее сопротивление переменному току источника сигнала. Когда источником сигнала для трансформатора является двухтактный каскад, при определении этой величины могут быть разночтения. Для сохранения единообразия расчетных

формул разных вариантов трансформаторов, первичная обмотка которых является нагрузкой лампового каскада, в данном документе приняты следующие соглашения:

- Для варианта первичной обмотки А: R_i – внутреннее сопротивление переменному току лампы в рабочей точке;
- Для вариантов первичной обмотки АА и АВ: $R_i = R_{ia-a}$ – внутреннее сопротивление переменному току каскада равно сопротивлению между анодами (plate to plate load), которое рассчитывается на основании последовательной эквивалентной схемы двухтактного каскада.

Изложение способа расчета внутреннего сопротивления двухтактного каскада переменному току содержится в книге Г.В. Войшвилло "Усилители низкой частоты". Связьиздат, 1939.

4.3. Конструктивные варианты обмоток

Принадлежность трансформатора к тому или иному конструктивному варианту здесь определяется его следующими свойствами:

- одноконтный или двухконтный (двухконтный – если хотя бы одна из обмоток имеет среднюю точку);
- тип сердечника (броневой или стержневой);
- способ соединения обмоток или их половинок (последовательно или параллельно).

На рисунках показаны все возможные [одноконтные](#) и [двухконтные](#) конструктивные варианты. В них продемонстрирован принцип разбиения обмоток на несколько концентрических секций с целью уменьшения индуктивности рассеяния, а также принцип достижения максимально возможной симметрии обмоток за счет разного направления намотки разных секций. Примеры ДБ5.4 и ДС5.4 показывают, что принцип полной симметрии обмоток противоречит принципу разбиения обмоток на общее нечетное количество концентрических секций.

Между Г.С. Цыкиным и Г.В. Войшвилло имеются расхождения относительно способа соединения половинок двухконтных обмоток, намотанных в разные стороны (для образования средней точки). Цыкин рекомендует соединять между собой начала половинок первичной обмотки; Войшвилло предлагает у таких же половинок соединять их концы. У половинок вторичной обмотки Войшвилло рекомендует соединять их начала; Цыкин разрешает соединять между собой как начала, так и концы половинок. Приведенные здесь примеры построены в стиле рекомендаций Г.В. Войшвилло.

Изображенные на рисунках схемы соединения секций следует рассматривать исключительно как примеры. Программа Tube TransCalc не ограничивает число концентрических секций, а также схемы их соединения и расположения этими примерами.

Рассмотрим принципы, положенные в основу расчета показателей обмоток. Основой для расчетов служит таблица слоев, в которой задается расположение слоев обмоток, количество витков в каждом слое, а также их соединение – параллельное или последовательное. Направление намотки слоев полагается одинаковым. Таблица слоев соответствует единственной цилиндрической секции (катушке) трансформатора А/І с броневым сердечником или одной цилиндрической секции (катушке) для остальных конструктивных вариантов. Таким образом, таблица слоев описывает одну цилиндрическую секцию трансформатора, у которого все концентрические секции одной и той же половинки обмотки расположены в одной цилиндрической секции. В примерах двухконтных обмоток такие секции соответствуют рисункам с индексом “1”: ДБ1.1, ДС1.1, ДБ2.1, ДС2.1, и т.д. Выводы относительно числа витков обмоток, их сопротивлений, индуктивности первичной обмотки и индуктивности рассеяния трансформатора делаются на основе расчетов этих величин по одной цилиндрической секции. Перекрестное расположение концентрических секций обмоток в разных цилиндрических секциях реального трансформатора и их намотка в разных направлениях на результат расчета не влияют и программой не контролируются – эти проблемы конструирования решаются пользователем по своему усмотрению.

Соответствие между вариантами симметрии, конструктивными вариантами и расчетными параметрами

Следующая таблица задает соответствие между вариантами симметрии и конструктивными вариантами:

	ОБ1	ОС1	ОС2	ОС3	ОС4	ДБ1 ДС1	ДБ2 ДС2	ДБ3 ДС3	ДБ4 ДС4	ДБ5 ДС5
А/І	+	+	+	+	+					
А/ІІ						+	+			
АА/І								+	+	
АА/ІІ										+
АВ/І								+	+	

Если обозначить тип обмотки:

0 – одиночная обмотка;

1 – последовательно соединенные половинки обмотки;

2 – параллельно соединенные половинки обмотки;

то предыдущую таблицу можно преобразовать так:

Обмотка	ОБ1	ОС1	ОС2	ОС3	ОС4	ДБ1 ДС1	ДБ2 ДС2	ДБ3 ДС3	ДБ4 ДС4	ДБ5 ДС5
Первичная	0	1	2	1	2	1	2	1	1	1
Вторичная	0	1	1	2	2	1	1	1	2	1

Если трансформатор имеет две цилиндрические секции, то одна такая секция содержит \dot{w} витков первичной обмотки и \ddot{w} витков вторичной обмотки, учитываемых при создании индукции. Тогда при последовательном соединении секций соответствующее полное число витков получается удвоением значения для одной секции, а при параллельном соединении остается таким же.

Зависимость между числом витков первичной обмотки и ее индуктивностью описывается формулой:

$$L_1 = \frac{4\pi\mu q_c w_1^2}{10^{10} l_c}. \text{ Тогда если } w_1 = 2\dot{w}, \text{ то } L_1 = (2\dot{w})^2 \frac{4\pi\mu q_c}{10^{10} l_c} = 4\dot{w}^2 \frac{4\pi\mu q_c}{10^{10} l_c} = 4\dot{L}, \text{ где } \dot{L} - \text{индуктивность, созда-$$

ваемая витками \dot{w} . Верно и обратное: $\dot{L} = \frac{L_1}{4}$. При параллельном соединении цилиндрических секций эти индуктивности равны.

Как показано в статье [Вычисление индуктивности рассеяния трансформатора с произвольным расположением концентрических секций](#), расчет индуктивности рассеяния одной цилиндрической секции может быть произведен по формуле

$$\dot{L}_s = \frac{4\pi}{10^{10}} \frac{\dot{w}^2}{h} \left(\sum_{i=1}^N |\dot{\Gamma}_i| + \sum_{i=1}^N |\ddot{\Gamma}_i| + \sum_{i=1}^N |\ddot{\Gamma}_i| \right),$$

основанной на подсчете потока рассеяния, порождаемого витками первичной и вторичной обмоток цилиндрической секции. В трансформаторе, работающем в режимах АА и АВ, имеются две цилиндрические секции, которые работают одновременно. Половинки первичной обмотки в таких секциях имеют равное количество витков \dot{w} , поэтому при любом способе их соединения через них будут протекать одинаковые токи. Следовательно, такие секции порождают одинаковые потоки рассеяния, причем при подсчете каждого потока учитывается количество витков первичной обмотки только в соответствующей секции. Поэтому как при последовательном, так и при параллельном соединении половинок первичной обмотки, общий поток рассеяния равен удвоенному значению потока одной секции. Тогда для трансформатора с двумя цилиндрическими секциями, независимо от типа сердечника (броневой или стержневой), $L_s = 2\dot{L}_s$ или $\dot{L}_s = \frac{L_s}{2}$.

Предварительный расчет

Предварительный расчет трансформатора предполагает последующие расчеты с целью получения приемлемого конструктивного варианта. Для облегчения задания исходных данных при конструктивном расчете, в число результатов предварительного расчета включены расчетные данные для одной цилиндрической секции. Следующие таблицы задают правила перехода от результатов, полученных при помощи формул, к остальным результатам предварительного расчета.

Для всех вариантов симметрии расчет производится в отношении всей первичной и всей вторичной обмотки, поэтому параметры половинок обмоток являются производными величинами.

Первичная обмотка:

		Выражение для вычисления производного параметра в зависимости от типа обмотки		
Производный параметр	0	1	2	
\dot{w}	w_1	$\frac{w_1}{2}$	w_1	
\dot{r}	r_1	$\frac{r_1}{2}$	$2r_1$	
\dot{L}	L_1	$\frac{L_1}{4}$	L_1	
\dot{L}_s	L_s	$\frac{L_s}{2}$	$\frac{L_s}{2}$	

Вторичная обмотка:

		Выражение для вычисления производного параметра в зависимости от типа обмотки		
Производный параметр	0	1	2	
\ddot{w}	w_2	$\frac{w_2}{2}$	w_2	
\dot{j}	r_2	$\frac{r_2}{2}$	$2r_2$	

Конструктивный расчет

Конструктивный расчет основан на вычислении параметров одной цилиндрической секции. Параметры, относящиеся ко всему трансформатору, вычисляются по формулам, приведенным в следующих таблицах.

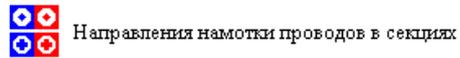
Первичная обмотка:

		Выражение для вычисления производного параметра в зависимости от типа обмотки		
Производный параметр	0	1	2	
w_1	\dot{w}	$2\dot{w}$	\dot{w}	
r_1	\dot{r}	$2\dot{r}$	$\frac{\dot{r}}{2}$	
L_1	\dot{L}	$4\dot{L}$	\dot{L}	
L_s	\dot{L}_s	$2\dot{L}_s$	$2\dot{L}_s$	

Вторичная обмотка:

	Выражение для вычисления производного параметра в зависимости от типа обмотки		
Производный параметр	0	1	2
w_2	\dot{w}	$2\dot{w}$	\dot{w}
r_2	\dot{r}	$2\dot{r}$	$\frac{\dot{r}}{2}$

- Первичная обмотка
- Вторичная обмотка

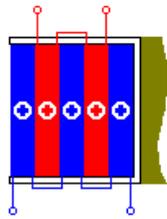
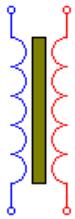


Однотактные конструктивные варианты

Схема соединения обмоток

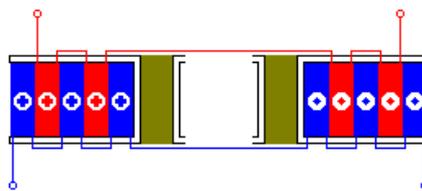
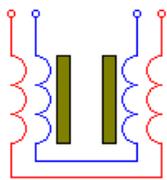
Схема соединения секций

Броневой сердечник

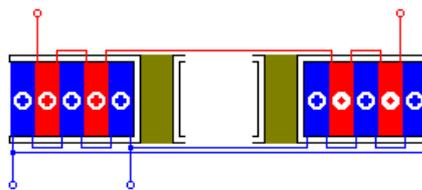
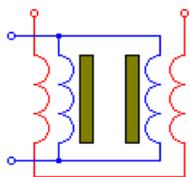


OB1

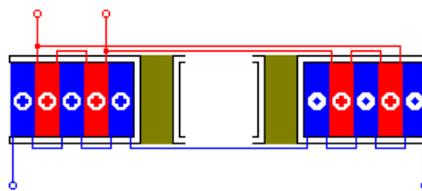
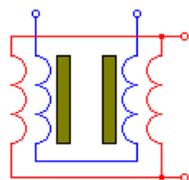
Стержневой сердечник



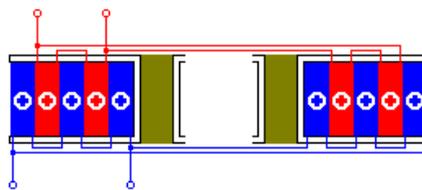
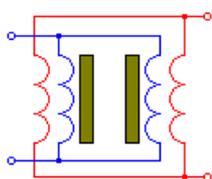
OC1



OC2



OC3



OC4

Двухтактные конструктивные варианты

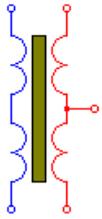
■ Первичная обмотка
■ Вторичная обмотка

 Направления намотки проводов в секциях

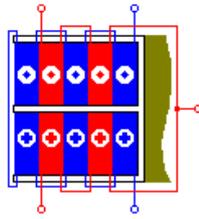
Схема соединения обмоток

Схема соединения секций

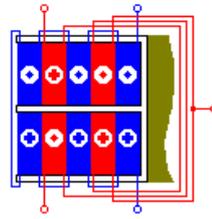
Броневой сердечник



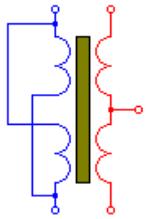
ДБ1



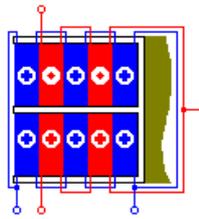
1



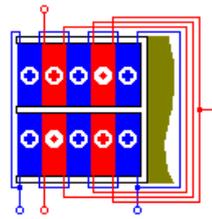
2



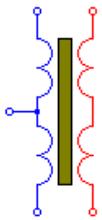
ДБ2



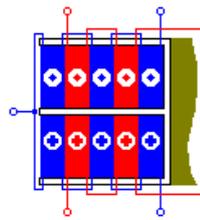
1



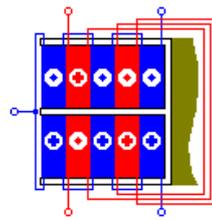
2



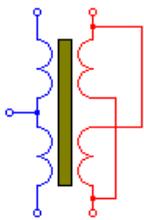
ДБ3



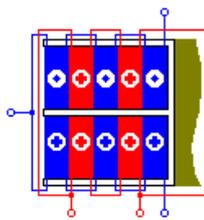
1



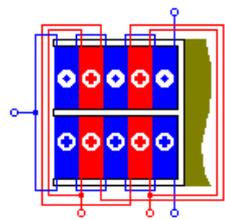
2



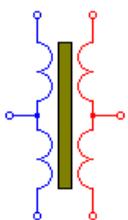
ДБ4



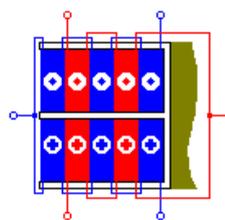
1



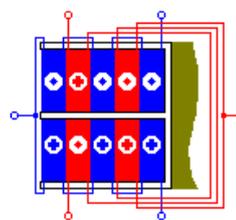
2



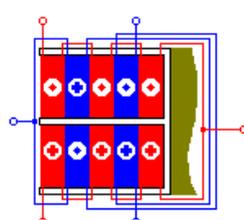
ДБ5



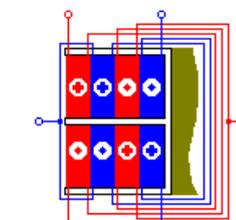
1



2



3



4

Двухтактные конструктивные варианты (продолжение)

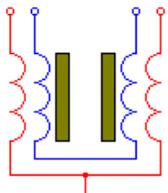
■ Первичная обмотка
■ Вторичная обмотка

 Направления намотки проводов в секциях

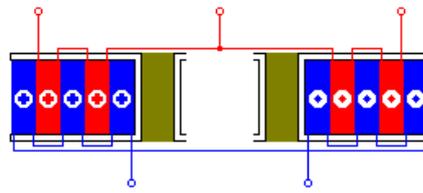
Схема соединения обмоток

Схема соединения секций

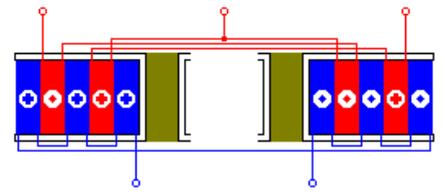
Стержневой сердечник



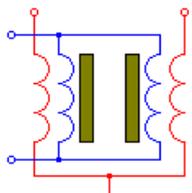
ДС1



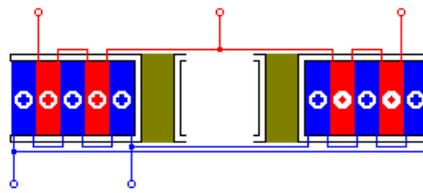
1



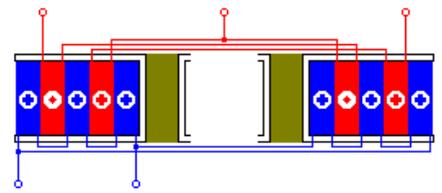
2



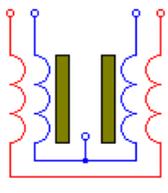
ДС2



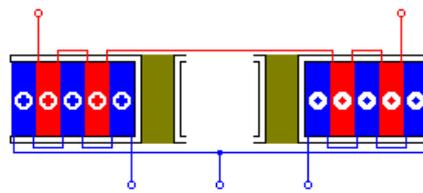
1



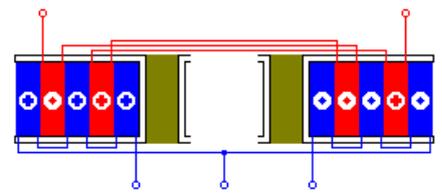
2



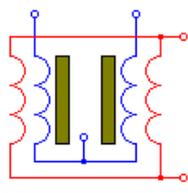
ДС3



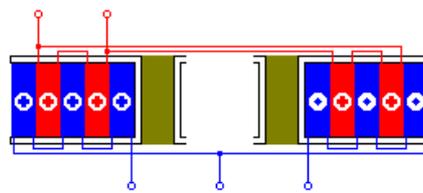
1



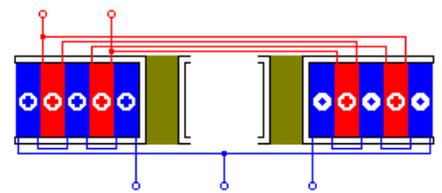
2



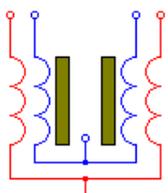
ДС4



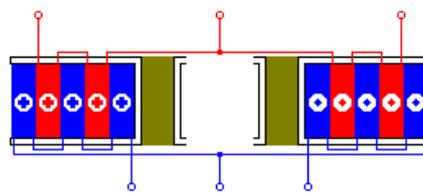
1



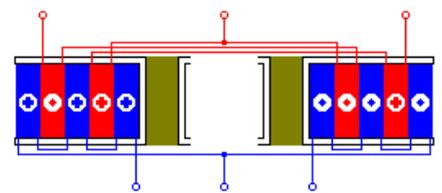
2



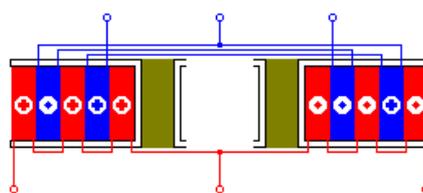
ДС5



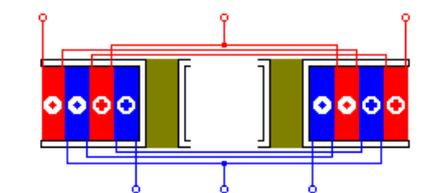
1



2



3



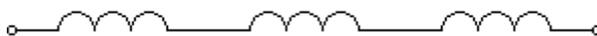
4

4.4. Соединение слоев внутри цилиндрической секции

Конструктивные варианты обмоток дают возможность соединения половинок обмоток всеми возможными способами. Однако, для достижения нужной индуктивности рассеяния или симметрии частей обмоток, могут потребоваться более изощренные приемы. Например, вторичная обмотка выходного трансформатора, работающего на низкоомную нагрузку (акустическая система), при достаточно большом сердечнике может уложиться в один слой. В таком случае для обеспечения чередования секций обмоток можно между секциями (или слоями) первичной обмотки разместить слои вторичной обмотки и соединить их параллельно.

Чтобы построить модель обмотки с указанными требованиями, желательно иметь средства параллельного и (или) последовательного соединения частей обмотки внутри цилиндрической секции. Произвольное параллельно-последовательное соединение слоев обмотки вряд ли приведет к положительному результату, так как при этом разные части одной и той же обмотки внутри цилиндрической секции могут иметь разное сопротивление. Это, по крайней мере, не облегчит в двухтактном трансформаторе укладку секций половинок одной обмотки симметрично относительно среднего витка катушки.

С учетом вышеизложенного, приложение Tube TransCalc предоставляет следующие варианты соединения частей обмотки:



а) простая обмотка (все слои соединены последовательно);



б) последовательно соединенные группы, состоящие из одинакового числа параллельно соединенных слоев;



в) параллельно соединенные группы, состоящие из одинакового числа последовательно соединенных слоев.

Имеются ограничения по применению этих вариантов:

- Если слои одной обмотки соединены способом б) или в) (сложная обмотка), то слои другой обмотки могут быть соединены только способом а) (простая обмотка).
- В простой обмотке слои могут иметь разное количество витков. В сложной обмотке число витков во всех ее слоях должно быть одинаковым.

Обозначим:

W – количество физических витков обмотки в одной цилиндрической секции;

w – количество витков обмотки в одной цилиндрической секции, учитываемых при создании индукции;

P – количество групп сложной обмотки;

Q – количество слоев в одной группе сложной обмотки.

Тогда число витков, создающих индукцию, для разных обмоток будет таким:

$w = W$ – для простой обмотки;

$w = \frac{W}{Q}$ – для последовательно соединенных групп;

$w = \frac{W}{P}$ – для параллельно соединенных групп.

4.5. Магнитные и обмоточные материалы

Магнитные материалы

Сердечник – не просто кусок железа, расположенный внутри катушки с проводами. Это скорее среда, заключенная в объеме, ограниченном размерами сердечника, и способная одним своим присутствием управлять таинственным процессом передачи энергии от одной обмотки к другой:

“... реактивная мощность короткого замыкания любой гармоники при заданном режиме работы магнитного материала прямо пропорциональна объему магнитного материала сердечника. Следовательно, магнитный материал может рассматриваться как своеобразный генератор гармоник и посторонних частот.”

Г.С. Цыкин, “Трансформаторы низкой частоты”, Связьиздат, 1955, стр. 160.

Свойства магнитных материалов относятся к тем вещам, которые нельзя вычислить, пользуясь лишь умозрительными предположениями и логическими построениями. Их можно только измерить и представить результат обработки экспериментальных данных в виде графиков. В настоящее время из числа общедоступных источников наиболее полно экспериментальные данные представлены в работах Г.С. Цыкина. Однако магнитные материалы, описанные в монографии за 1955 г. сейчас вышли из употребления. Поэтому фактически единственным источником данных является его работа “Усилители электрических сигналов” М., “Энергия”, 1969:

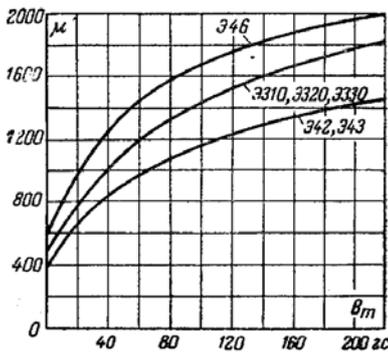


Рис. 10-6. Зависимость магнитной проницаемости от индукции для различных трансформаторных сталей.

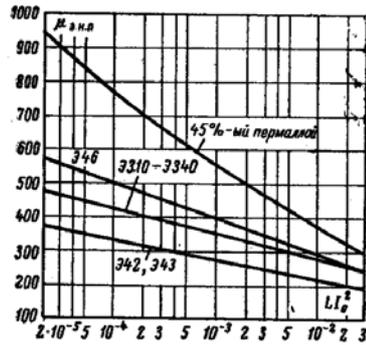


Рис. 10-7. Зависимость эквивалентной начальной магнитной проницаемости от произведения L_1^2 для различных магнитных материалов.

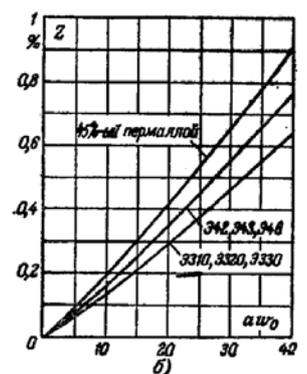
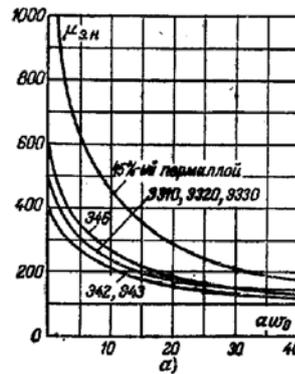


Рис. 10-8. Зависимость эквивалентной начальной проницаемости (а) и оптимального немагнитного зазора (б) от постоянного подмагничивания для различных магнитных материалов.

Перечень материалов, графиков и таблиц, а также реализуемых ими функций и условий их применимости приведен в следующей таблице:

Функция	Наличие подмагничивания	Мощность	Н-45	Э42	Э43	Э46	Э310	Э320	Э330	Источник
$\mu(B)$	—	любая	—	+	+	+	+	+	+	Рис. 10-6
$\mu_{\Delta}(L_1 I_0^2)$	+	любая	+	+	+	+	+	+	+	Рис. 10-7
$\mu_{\Delta}(\alpha\omega_0)$	+	любая	+	+	+	+	+	+	+	Рис. 10-8
$Z_{\Delta}(\alpha\omega_0)$	+	любая	+	+	+	+	+	+	+	Рис. 10-8

Огромное количество ламповых аппаратов, созданных в незапамятные времена, позволяет предположить, что в распоряжении конструкторов тогда имелись графики материалов, качество и размеры которых давали возможность снять данные с достаточной точностью. Сегодняшние же отсканированные изображения графиков, представленные в виде gif-файлов, при использовании ручного съема данных можно рассматривать не более чем как топографические карты местности, подброшенные врагу для де-

з информации. Кроме того, технология ручного съема данных является чрезвычайно трудоемким занятием и дискредитирует идею полноценного компьютерного расчета. По этим причинам в приложение Tube TransCalc были включены средства интерполяции функций, позволяющие с хорошей точностью в нужный момент расчета автоматически получить значение конкретной функции заданного материала (применен нормальный метод кубической сплайн-интерполяции). Для каждого графика, из числа приведенных в таблице, имела место следующая последовательность шагов:

- Вручную были сняты пиксельные координаты узловых точек графика.
- Вычислены значения координат этих точек в исходных единицах.
- Вычислены угловые коэффициенты касательных в крайних точках графика.
- Полученные данные включены в приложение Tube TransCalc в виде, позволяющем применить к ним процедуры сплайн-интерполяции.
- По изображениям графиков, полученным при помощи Tube TransCalc, была проведена ручная коррекция экспериментальных данных. (Изменение положения узловой точки графика в пределах $\pm 0,3\%$ дает заметное на глаз искажение его формы, поэтому критерием правильности экспериментальных данных здесь была визуальная схожесть исходного и сплайн-графиков.)

Стандартные сердечники

Приложение Tube TransCalc содержит базу данных стандартных сердечников. В нее вошли броневые сердечники, представленные в работе Г.С. Цыкина “Усилители электрических сигналов” М., “Энергия”, 1969, а также данные по броневым и стержневым сердечникам, опубликованные на сайте [Next-Tube](#). Из числа исходных данных в базу включены только геометрические размеры. Производные показатели рассчитаны по формулам, взятым у Г.С. Цыкина:

- Средняя длина магнитной силовой линии сердечника:
 - стержневой сердечник:
 - при условии $y_3 > y_1$:
$$l_c = 0,1 \left\{ 2h + \frac{y_1}{y_3} \left[2b + \frac{\pi(y_1 + y_3)}{2} \right] \right\} [sm];$$
 - при условии $y_3 = y_1$:
$$l_c = 0,1 [2h + 2b + \pi y_1] [sm];$$
 - броневой сердечник:
 - при условии $y_3 > 0,5y_1$:
$$l_c = 0,1 \left\{ h + \frac{y_1}{y_3} \left[0,5h + 2b + \frac{\pi}{16} y_1 + \frac{3\pi}{8} y_3 \right] \right\} [sm];$$
 - при условии $y_3 = 0,5y_1$:
$$l_c = 0,1 \left[2h + 2b + \frac{\pi}{2} y_1 \right] [sm].$$
- Средняя длина витка провода в катушке:
 - стержневой сердечник:
$$l_0 = 0,1 [2y_1 + 2y_2 + 0,35\pi b] [sm];$$
 - броневой сердечник:
$$l_0 = 0,1 [2y_1 + 2y_2 + 0,8\pi b] [sm].$$

При таком подсчете средней длины витка в катушке, не учитывается толщина материала катушки, и средняя длина витка получается несколько заниженной.

- Чистое сечение магнитного материала в катушке трансформатора:
$$q_c = \frac{0,92 y_1 y_2}{100} [sm^2].$$
- Конструктивные коэффициенты:
$$A = 7,18 \cdot 10^{-5} \frac{q_c q_0}{l_c l_0}, \quad D = \frac{q_c}{2,98 \cdot 10^4} \sqrt{\frac{q_0}{l_0}}.$$

Значения коэффициента заполнения окна медью q_0 для всех сердечников аналогичны коэффициентам сердечников ПЛ.

Рассчитанные значения конструктивных коэффициентов A и D по сравнению с данными по сердечникам, приведенным в работе Г.С. Цыкина, получились заниженными от 10% до 25%. По этой причине, когда в предварительном расчете автоматически предлагается список рекомендованных сердечников, в нем могут отсутствовать сердечники, имеющие вполне приемлемые показатели. При моделировании трансформатора процедурой конструктивного расчета будет нелишним проверить сердечники с ближайшими размерами.

Обмоточные материалы

Приложение Tube TransCalc содержит базу данных по проводам с эмалевой изоляцией ПЭЛ, ПЭТ, ПЭЛУ, ПЭВ-1 и ПЭВ-2 с диаметрами без изоляции от 0,05 мм до 2,44 мм.

4.6. Принципы, положенные в основу конструктивного расчета

Предварительный расчет трансформатора – это последовательность действий, дающая ответ на вопрос, каким должен быть трансформатор проектируемого каскада усиления. Полученные значения размеров сердечника, диаметры проводов и количество витков каждой из обмоток призваны обеспечить желаемый результат. Однако, с одной стороны, вряд ли провода рассчитанного диаметра существуют в природе, а с другой стороны, имеющиеся в наличии провода, могут просто не влезть в окно сердечника, выбранного по коэффициентам A и D . Возникает проблема пересчета трансформатора исходя из доступных проводов и сердечников. Задача становится с ног на голову – то, что было расчетной величиной, превращается в исходный параметр, а то, что было исходным параметром, становится следствием того, что раньше было расчетной величиной. Формулы предварительного расчета теряют свою ценность, так как их предназначение заключалось в вычислении параметров идеальных объектов, входящих в эквивалентную схему трансформатора для удовлетворения условий, поставленных другими составными частями каскада усиления, а теперь имеется трансформатор, эквивалентный своей схеме, и единственный вопрос, имеющий смысл, звучит так: “А что мы с этого имеем?” Такой вопрос дает повод для подхода, диаметрально противоположного предварительному расчету трансформатора. В максимально упрощенном виде его формулировка следующая: “Возьмем какую-нибудь железяку, намотаем на нее какие-нибудь провода, и посмотрим, что из этого получится...”. Фактически программа Tube TransCalc позволяет ответить на поставленный вопрос. Однако с практической точки зрения этот вопрос не имеет большого смысла, так как число ответов, которые при этом можно получить, гораздо больше числа полезных ответов. Полезные ответы соответствуют некоторому диапазону исходных данных, границами которого служат результаты, полученные при помощи предварительного расчета. В самом деле, нет смысла делать конструктивный расчет для любых сердечников, так как сердечники, имеющие меньший конструктивный коэффициент D , дадут недопустимое превышение магнитной индукции. Нельзя как угодно менять коэффициент трансформации, поскольку от него зависит соотношение между полным сопротивлением первичной обмотки и активным сопротивлением нагрузки. Но, в то же время, если позволяет имеющийся сердечник, более толстые провода или большее количество витков могут увеличить КПД трансформатора или индуктивность первичной обмотки, что в некоторых случаях может быть выгодным.

Последние рассуждения показывают, что конструктивный расчет имеет некоторые черты оптимизации. Вообще оптимизация – это поиск наиболее подходящего решения конкретной задачи в конкретных условиях. Неопределенность в данной задаче понятия “подходящее решение” делает бессмысленным задание какого-то одного критерия оптимизации и построение хитроумной программы для оптимизации по этому критерию, так как в разных случаях могут действовать свои предпочтения.

Однажды автор стал невольным свидетелем дискуссии в Интернете, в ходе которой некий джентльмен, располагавший сердечником японского трансформатора, прилагал интеллектуальные усилия к тому, чтобы рассчитать выходной трансформатор при условии сохранения “родной” прокладки для магнитного зазора толщиной 0,2 мм. А теперь попробуйте доказать, что это не есть задание критерия оптимизации? ...

По мнению автора, в большинстве случаев гораздо полезнее иметь набор средств, обеспечивающий легкую манипуляцию конструктивными данными виртуального трансформатора для субъективной оценки результатов.

Как уже было сказано, нельзя извлечь большую пользу, манипулируя исходными данными (диаметрами проводов, количеством витков обмоток и размерами сердечника) в любых пределах – желательно оставаться в пределах ограничений, которыми являются результаты предварительного расчета. Но здесь возникает вопрос – а насколько важны все положения, использованные для получения этих результатов?

Основой предварительного расчета являются две абстрактные модели:

- эквивалентная схема трансформатора;
- идеализированный сердечник.

Эквивалентная схема трансформатора

Полное представление эквивалентной схемы трансформатора можно найти на стр. 7 работы Г.С. Цыкина “Трансформаторы низкой частоты”, Связьиздат, 1955.

Анализ эквивалентной схемы позволяет получить основные соотношения, которые связывают параметры трансформатора с параметрами устройств на его входе и выходе:

$$R_{\sim} = r_1 + r_2' + R_2',$$

$$R_{out} = (R_i + r_1 + r_2')n^2.$$

При помощи законов физики и математических выкладок далее получают другие соотношения, позволяющие вычислить остальные показатели трансформатора (с целью сокращения формулы приводятся только для активной нагрузки и режима А):

$$\eta = \frac{R_2'}{r_1 + r_2' + R_2'} - \text{КПД трансформатора};$$

$$n = \sqrt{\frac{R_2}{\eta R_{\sim}}} - \text{коэффициент трансформации};$$

$$L_1 = \frac{R_{eqv}}{2\pi f_l \sqrt{M_l^2 - 1}} - \text{минимальная индуктивность первичной обмотки};$$

$$L_s = \frac{R_i + R_{\sim}}{2\pi f_h} \sqrt{M_h^2 - 1} - \text{максимально допустимая индуктивность рассеяния}.$$

Идеализированный сердечник

Законы физики и математические выкладки дают:

$$B = \frac{10^8 U_1 (R_{\sim} - r_1)}{2\pi f_l q_c \omega R_{\sim}} - \text{зависимость между индукцией в сердечнике и числом витков первичной}$$

обмотки;

$$w_1 = \sqrt{\frac{10^9 L_1 l_c}{4\pi \mu q_c}} - \text{зависимость между количеством витков и индуктивностью первичной обмотки};$$

$$A = \frac{(1+c)L_1}{\mu r_1}, \quad D = \frac{1+c\eta}{B_{adm} f_l} \sqrt{\frac{P_2}{c\eta(1-\eta)}} - \text{конструктивные коэффициенты}.$$

Эти формулы отражают объективную реальность и поэтому они не могут быть отброшены или заменены другими рассуждениями. Однако при переходе от моделей к реальным сердечникам и обмоткам, появляются соображения, не имеющие прямого отношения к процессам, происходящим в трансформаторе. Этими соображениями являются такие показатели трансформатора, как минимальная стоимость или минимальный вес. Их применение делает само собой разумеющимся принцип максимально возможного заполнения окна сердечника проводниками, а затем полностью заполненное окно сердечника исследуется на предмет получения наиболее выгодного соотношения между активными сопротивлениями обмоток:

$$r_1 = r_2'.$$

Эта формула соответствует распределению меди между обмотками, при котором трансформатор в режиме А будет иметь максимальный КПД. Однако при рассмотрении показателей в совокупности этот

факт теряет свою значимость – например Г.С. Цыкин в более поздней публикации (“Усилители электрических сигналов” М., “Энергия”, 1969) отступает от такого жесткого “трансформаторного” критерия и дает рекомендации по выбору коэффициента c для режима А исходя уже из КПД каскада в целом. Здесь имеется в виду коэффициент, входящий в формулы:

$$r_1 = \frac{c}{1+c} R_{\sim} (1-\eta), \quad r_2 = \frac{1}{1+c} R_2 \frac{1-\eta}{\eta}.$$

Так как выбор коэффициента c является до некоторой степени произвольным, тщательное его сохранение при моделировании трансформатора не должно быть основанием для игнорирования остальных показателей. Точно так же нет объективной необходимости во всех случаях стремиться к максимальному заполнению обмотками окна сердечника. Максимальное заполнение позволяет применять сердечники с минимально допустимыми размерами. Это имеет смысл для двухтактных трансформаторов, так как отсутствие постоянного подмагничивания при большом сердечнике создает проблему “раскачки” трансформатора на минимальных уровнях сигнала. Для трансформаторов с подмагничиванием использование сердечника с размерами, больше минимально допустимых, до некоторой степени приемлемо. Ограничением размеров сердечника в любом случае является рост собственной емкости трансформатора из-за увеличения площади слоев обмоток. Индуктивность рассеяния, при увеличении размеров сердечника и сохранении количества витков, может даже стать меньше вследствие уменьшения толщины обмоток.

Таким образом, есть несколько противоречивых требований, соблюдение которых важно в равной степени – это:

- использование проводов, дающих малые активные сопротивления обмоток (КПД, R_{\sim} , R_{out});
- максимально возможное сохранение коэффициента трансформации (R_{\sim} , R_{out});
- размещение в окне сердечника такого числа витков первичной обмотки, при котором индуктивность будет не меньше заданной, а индукция не больше допустимой;
- плотная укладка проводов слоями одинаковой длины (L_s);
- получение нужного числа секций определенной толщины (L_s).

Намеченная выше цель “легкого манипулирования данными виртуального трансформатора” требует уточнений. Легкость манипулирования при помощи компьютера может быть обеспечена ничем другим, а только специально написанными программами в совокупности с удобным и понятным интерфейсом доступа к параметрам. Поэтому набор данных “легкого манипулирования” должен быть четко ограничен. Рассмотрим взаимосвязь различных параметров и оценим целесообразность включения того или иного параметра в число параметров “легкого манипулирования”.

Взаимосвязь параметров

Параметры обмоток

“Самыми” исходными данными конструктивного расчета являются параметры обмоток. Исходя из необходимости облегчения процесса моделирования, процедура конструктивного расчета трансформатора в отличие от процедуры предварительного расчета изначально построена как последовательность шагов, предназначенных для исполнения компьютером. Конструктивные данные обмоток представляют собой последовательность чисел, задающих количество витков каждого слоя проводов обмоток, и позволяющих судить о порядке их расположения в катушке. Отсюда такая простая вещь как количество витков обмотки сама является результатом расчета. Данный подход позволяет произвести точные расчеты сопротивлений обмоток и индуктивности рассеяния, но вместе с тем делает практически невозможным проведение расчетов ручным способом из-за их большой трудоемкости.

Параметры	w_1, w_2	– число витков в обмотках,
	r_1, r_2	– активные сопротивления обмоток,
	n	– коэффициент трансформации, и
	L_s	– индуктивность рассеяния,

полученные в результате вычислений по описанию обмоток, далее рассматриваются как исходные параметры.

Согласование импедансов

На эквивалентной схеме трансформатора показан подключенный к нему слева источник переменного тока с внутренним сопротивлением R_i . Ответной реакцией трансформатора на выводящий его из равновесия переменный ток источника является сопротивление R_{\sim} . Казалось бы, параметр R_{\sim} нужно отнести к свойствам трансформатора, но, с другой стороны, рассчитывая усилительный каскад на лампе, мы рисуем нагрузочную прямую, угол наклона которой соответствует величине R_{\sim} , по ней определяем напряжение на первичной обмотке, а затем приступаем к проектированию трансформатора с таким сопротивлением. Кроме того, при таком подходе выбор R_{\sim} диктуется соображениями эффективности работы самой лампы, которые не имеют прямого отношения к трансформатору как к таковому. Отсюда видно, что величины R_{\sim} , R_2 , R_i и R_{out} описывают каскад в целом, а первичность или вторичность в причинно-следственных отношениях между ними мы задаем сами исходя из условий решаемой задачи. Вот давайте и оценим систему параметров с точки зрения причинно-следственных отношений.

Формулы $R_{\sim} = r_1 + r_2' + R_2$ и $R_{out} = (R_i + r_1 + r_2')n^2$ показывают, что параметры R_{\sim} и R_2 конкурируют между собой за право быть первичным. То же относится и к параметрам R_i и R_{out} .

Резюме: R_{\sim} и R_2 – конкуренты,
 R_i и R_{out} – конкуренты.

КПД

$\eta = \frac{R_2}{R_2 + r_1 n^2 + r_2}$ – КПД трансформатора, по мнению автора, самодостаточной величиной не является, а потому как претендент на роль свободного параметра здесь не рассматривается.

Связь между сигналом и индукцией

Функция $B_{adm} = \frac{10^{10} U_{1max} (R_{\sim} - r_1)}{2\pi f_l q_c w_1 R_{\sim}}$ дает три конкурирующие пары параметров:

$$U_{1max}, f_l,$$

$$U_{1max}, B_{adm},$$

$$f_l, B_{adm}.$$

Связь между мощностью и напряжением сигнала

В функциях $U_{1max} = \sqrt{2R_{\sim}P_1}$,

$$P_2 = P_1\eta,$$

$$U_{2max} = K_0 U_{1max}$$

участвуют сразу четыре конкурента:

$$U_{1max}, U_{2max}, P_1 \text{ и } P_2.$$

Связь между группами конкурентов

Если в пункте “Связь между сигналом и индукцией” напряжение $U_{1\max}$ объявляется свободным параметром, то предоставляется право либо задать его непосредственно, либо определить по пункту “Связь между мощностью и напряжением сигнала”.

Если же $U_{1\max}$ является вычисляемым параметром, то в пункте “Связь между мощностью и напряжением сигнала” оно автоматически становится исходным параметром.

Магнитная проницаемость

Трудно представить ситуацию, в которой делается ставка на проектирование трансформатора с постоянной величиной магнитной проницаемости сердечника. Проницаемость является функцией магнитной индукции – т.е. это динамическая величина. Поэтому начальная проницаемость – это либо бесспорный исходный параметр при проектировании трансформатора малой мощности без подмагничивания, либо исключительно вычисляемая величина в остальных случаях. Однако формулы позволяют установить конкуренцию между остальными параметрами.

Трансформатор без подмагничивания

Если $P_1 \leq 0,1W$, все просто – конкурентов нет, $\mu = \mu_n$ для данного материала.

При $P_1 > 0,1W$ начальная проницаемость определяется функцией $\mu = \mu(B_{\min})$. Для минимальной индукции, минимального напряжения и коэффициента K_d имеются функции $B_{\min} = \frac{10^{10} U_{1\min} (R_{\Sigma} - r_1)}{2\pi f_1 q_c w_1 R_{\Sigma}}$ и

$U_{1\min} = U_{1\max} \cdot 10^{\frac{K_d}{20}}$. Отсюда конкуренты:

$U_{1\min}$, B_{\min} и K_d .

Параметр $U_{1\max}$ здесь принимается в качестве исходного.

Трансформатор с подмагничиванием

При заданном количестве витков первичной обмотки исходным параметром вычисления начальной эквивалентной магнитной проницаемости становится уже не число ампервитков $a\omega_0$, а постоянный ток в обмотке I_0 : $\mu_{\Delta} = \mu_{\Delta}(I_0)$. Также имеет место функция $\Delta = \frac{Z_{\%}(aw_0)l_c}{20}$, позволяющая объявить конкурентами ток в обмотке и толщину немагнитной прокладки между частями сердечника:

Δ и I_0 – конкуренты.

4.7. Индуктивность рассеяния при индуктивной нагрузке

Предварительный расчет трансформатора для случая индуктивной нагрузки вычисляет индуктивность рассеяния трансформатора, при которой будет обеспечена полная компенсация частотных и фазовых искажений, а также параметры корректирующей цепочки, подключаемой параллельно первичной обмотке при слишком большом расчетном значении индуктивности рассеяния:

$$L_s = \frac{R_i + r_1 + r_2'}{R_2'} L_2' \quad \text{– без корректирующей цепочки};$$

$$L_s = L_2' \frac{1-\eta}{\eta} \quad \text{– с корректирующей цепочкой } R_k = R_{\sim}, C_k = 10^6 \frac{L_s + L_2}{R_{\sim}^2}.$$

Однако практическая ценность этих результатов невелика, так как при моделировании трансформатора процедурой конструктивного расчета индуктивность рассеяния определяется параметрами катушки с проводами и никак не зависит от других компонентов каскада усиления. При таком положении вещей возникает необходимость в средствах, позволяющих приблизить желаемое к действительному. Процедура конструктивного расчета дает возможность минимизации отклонения частотной характеристики на высших частотах диапазона от 0 dB и фазовой характеристики от 0°. На панели **Тип нагрузки** представлены рекомендуемые значения индуктивности рассеяния и параметров корректирующей цепочки, рассчитанные по приведенным формулам. Исходными параметрами этих формул служат значения, вычисленные процедурой конструктивного расчета по действующим значениям других параметров, а потому значения L_s , R_k и C_k отражают текущие характеристики данного каскада усиления. Путем перебора вариантов взаимного расположения слоев, числа витков в обмотках, вариантов соединения слоев сложной обмотки внутри цилиндрической секции, а также изменением толщины межслоевой и межсекционной изоляции, может быть достигнуто значение индуктивности рассеяния, близкое к вычисленному. Естественно, в процессе подбора индуктивности рассеяния, рекомендуемые значения индуктивности рассеяния сами могут претерпеть изменения вследствие изменений в катушке трансформатора. Поэтому, для успешного использования описанной процедуры ручной оптимизации, требуется четкое понимание взаимосвязи между различными параметрами трансформатора.

Частотная и фазовая характеристики трансформатора представлены на графиках. Для индуктивной нагрузки отклонения на высших частотах диапазона вычисляются по формулам общего случая, при котором наличие корректирующей цепочки не учитывается. Поэтому, при отсутствии такой цепочки, контроль отклонения частотной характеристики от 0 dB и фазовой характеристики от 0° можно производить по графику. При наличии же цепочки визуальный контроль реального отклонения характеристик невозможен.

4.8. Таблицы конструктивного расчета

Исходная информация по таблицам геометрии обмоток и индуктивности рассеяния содержится в статье А.Н. Шевченко [Вычисление индуктивности рассеяния трансформатора с произвольным расположением концентрических секций](#).

Все линейные размеры выражены в миллиметрах.

Таблица геометрии

δ_0^* – модифицированная толщина дополнительной изоляции катушки после добавления к ней толщины первого от катушки сегмента выпучивания.

<i>i</i>	Номер слоя (совпадает с номером в таблице слоев).
<i>Type</i>	“w1” или “w2” для слоя обмотки или “delta” для любого слоя изоляции.
<i>x</i>	Координата нижней поверхности слоя без учета выпучивания, считая от поверхности дополнительного слоя изоляции катушки (его толщина равна δ_0^*).
<i>delta</i>	Толщина слоя – диаметр провода с изоляцией для слоя обмотки или толщина слоя (подряд идущих слоев) реальной межслоевой или межсекционной изоляции.
<i>dhV1, dhV2</i>	Максимальная толщина сегмента выпучивания в середине стороны катушки V1 или V2.
<i>xV1, xV2</i>	Координата начала слоя выпученной обмотки в середине стороны катушки V1 или V2.
<i>RV1, RV2</i>	Радиус окружности выпучивания для стороны катушки V1 или V2.
<i>tV1, tV2</i>	Координата точки касания нижней поверхности слоя для стороны катушки V1 или V2.
<i>ttV1, ttV2</i>	Координата точки соединения огибающих окружностей на верхней поверхности слоя V1 или V2.
<i>l</i>	Длина витка.
<i>s</i>	Площадь сегментов выпучивания, прилежащих снизу к слою провода.

Таблица индуктивности рассеяния

<i>i</i>	Номер слоя (совпадает с номером в таблице слоев).
<i>v</i>	Количество витков в слое.
<i>g</i>	Номер группы.
<i>r</i>	Сопротивление слоя.
<i>X</i>	Координата начала слоя спрямленной обмотки.
<i>DELTA</i>	Толщина слоя спрямленной обмотки (диаметр провода без изоляции).
<i>alpha 1</i>	Коэффициент плотности тока в слое первичной обмотки.
<i>alpha 2</i>	Коэффициент плотности тока в слое вторичной обмотки.
<i>beta 1</i>	Коэффициент плотности физических витков в слое первичной обмотки.
<i>beta 2</i>	Коэффициент плотности физических витков в слое вторичной обмотки.
<i>Hbeg</i>	Коэффициент напряженности магнитного поля в начале слоя.
<i>Hend</i>	Коэффициент напряженности магнитного поля в конце слоя.

Если обмотки проектируются с целью минимизации индуктивности рассеяния, напряженность магнитного поля будет менять знак, и некоторые слои окажутся разделенными на части точкой изменения знака. В таблице индуктивности рассеяния это выразится в уменьшении толщины некоторого слоя обмотки и появлении вслед за ним нового слоя такой же обмотки (без номера слоя) с недостающей толщиной. Качественную картину деления слоя на части можно наблюдать визуально на эпюре рассеяния.