

РАСЧЁТ ДРОССЕЛЯ

В.Я. Володин
valvolodin@narod.ru

Вывод методики расчёта.

Зачастую, даже очень маститые разработчики электронной аппаратуры слабо разбираются в электромагнитной технике и оказываются не в состоянии правильно выбрать конструкцию и рассчитать электромагнитные компоненты ИВП. Порой доходит до смешного – разработчик выбирает электромагнитные материалы того или иного производителя только потому, что тот выкладывает для них, на своём сайте, бесплатное программное обеспечение, позволяющее неспециалисту произвести оценочный расчёт типовых электромагнитных звеньев. Обычно, в этом случае, результат далёк от совершенства. В этом нет ничего удивительного, т.к. в наше время понятие электроника охватывает очень широкую область знаний и специалист-разработчик, обычно получив образование в некоей узкой области, на практике порой вынужден принимать решения в смежных факультативных областях. Особенно остро эта проблема касается любителей, которые вообще не имеют какого-то специального образования.

Цель данной статьи, не выходя за пределы знаний полученных в объёме курса физики для средней школы, дать упрощённую методику расчёта наиболее распространённого дросселя, это дросселя работающего с подмагничиванием.

Чтобы полноценно использовать даже очень упрощённые расчётные формулы, нужно ясно представлять их структуру. Поэтому будет полезно самостоятельно вывести те соотношения, которые в дальнейшем нами будут использоваться.

Лично мне не нравится 😊, что обычно в классических источниках [1,2] по разному оцениваются габариты сердечника для трансформатора и дросселя. Для трансформатора это $Sc \cdot So$ - произведение площади сечения сердечника Sc на площадь окна с обмоткой So , а для дросселя объём сердечника $Sc \cdot lc$ – произведение сечения сердечника на среднюю длину магнитной силовой линии. Подобный подход затрудняет сравнительную оценку габаритов различных электромагнитных компонентов. Поэтому разработаем свою методику расчёта, позволяющую аналогичным образом, через $Sc \cdot So$, оценивать габаритные размеры трансформаторов и дросселей.

Для начала примем два допущения, которые существенно не отразятся на конечной точности вычислений, но значительно упростят процесс создания методики расчёта.

Во-первых, будем считать, что материал сердечника имеет очень низкое, практически нулевое, магнитное сопротивление. Это допущение достаточно справедливо в нашем случае, если сердечник имеет немагнитный зазор, магнитное сопротивление которого на несколько порядков больше.

Во-вторых будем считать, что сечение немагнитного зазора по всей его длине равно сечению сердечника, что близко к истине только при относительно небольших зазорах, длиной до 1...2 мм. В этом случае при больших зазорах методика будет давать заниженное значение индуктивности, что допустимо для большинства применений, т.к. обычно стремятся чтобы индуктивность дросселя была не ниже некоторого значения.

Сначала постараемся разместить обмотку дросселя в окне сердечника. В лучшем случае обмотка должна занимать окно полностью без остатка. В противном случае мы рискуем получить дроссель имеющий избыточные размеры.

И так, обмотка дросселя должна быть рассчитана на максимальный ток I протекающий через неё. Зная максимальный ток I и плотность тока в обмотке J (в A/mm^2), а так же площадь окна сердечника So (в cm^2) и коэффициент его заполнения Ko , можно определить сколько витков влезет в окно сердечника:

$$W = 100 \cdot So \cdot Ko \cdot J / I \quad (1)$$

Зная сечение S_c , а так же коэффициент его заполнения сталью K_c , можно, для выбранной индукции B в сердечнике, определить потокосцепление обмотки дросселя:

$$\Phi \cdot W = W \cdot Bm \cdot Sc \cdot Kc \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

Подставить (1) в (2), получим:

$$\Phi \cdot W = \frac{0.01 \cdot Bm \cdot J \cdot Sc \cdot So \cdot Kc \cdot Ko}{I} \quad (3)$$

Известно, что

$$\Phi \cdot W = L \cdot I \quad (4)$$

Из (3) и (4) найдём индуктивность дросселя:

$$L = \frac{0.01 \cdot Sc \cdot So \cdot B \cdot J \cdot Kc \cdot Ko}{I^2}, \text{ Гн} \quad (5)$$

И требуемую величину $ScSo$ для сердечника дросселя:

$$Sc \cdot So = \frac{100 \cdot L \cdot I^2}{Bm \cdot J \cdot Kc \cdot Ko}, \text{ см}^4 \quad (6)$$

Для выбора значений B , J , K_c , K_o можно использовать аналогичные рекомендации для трансформаторов [3]. При этом габаритную мощность $P_{габ}$ можно приравнять к $1.25 \cdot Sc \cdot So$ (Табл.1).

Для алюминиевого провода плотность тока следует уменьшить в 1.6 раз.

Таблица 1

Тип сердечника	Ш,П	ШЛ,ПЛ	Ш,ШЛ	П,ПЛ	К _о
Р _{габ} , ВА	В _м , Тл		J, А/мм ²		
10	1.1	1.2	4.8	5.4	0.22
20	1.2	1.4	4.2	4.8	0.26
50	1.35	1.55	3.5	4.1	0.29
100	1.35	1.6	3.0	3.6	0.31
200	1.3	1.5	2.5	2.9	0.32
500	1.15	1.4	2.0	2.3	0.33
1000	1.1	1.3	1.6	2.0	0.35

Во избежание насыщения, магнитопровод дросселя должен иметь немагнитный зазор. Считаем, что магнитопровод дросселя является идеальным магнитным проводником и все ампервитки обмотки приложены к достаточно длинному немагнитному зазору. Так же, благодаря длинному немагнитному зазору, индукция в магнитопроводе изменяется практически от нуля до B_m .

Длину немагнитного зазора (в мм), при известных ампервитках, можно определить по формуле:

$$\delta = \frac{I \cdot W}{796 \cdot Bm}, \text{ мм} \quad (7)$$

или

$$I = \frac{796 \cdot B_m \cdot \delta}{W}, A \quad (8)$$

Из (1), (4) и (8) выведем формулу для нахождения индуктивности дросселя:

$$L = \frac{1.25 \cdot 10^{-7} \cdot S_c \cdot K_c \cdot W^2}{\delta}, \text{ Гн} \quad (9)$$

Обычно магнитопровод дросселя, работающего в режиме непрерывного тока, может использоваться при более высокой частоте нежели это имело бы место в трансформаторе. Всё дело в том, что при достаточно высокой средней индукции в сердечнике, изменение этой индукции δB незначительно. Кратность увеличения частоты, при неизменных потерях, можно определить по формуле [4]:

$$P_o = P_y \cdot G_c \cdot \left(\frac{\delta B}{B_y} \right)^2 \cdot \left(\frac{f}{f_y} \right)^x,$$

Где: P_o – потери в сердечнике;

P_y – удельные потери для данного материала при заданных значениях амплитуды B_y и частоты f_y синусоидальной магнитной индукции;

G_c – масса сердечника;

x – частотный показатель (1.2 - 1.8).

Отсюда, вероятно, кратность увеличения частоты - $\frac{f}{f_y} = \left(\frac{B_y}{\delta B} \right)^{2/x}$. Т.е., при $\frac{B_y}{\delta B} = 10$

железо, рассчитанное для работы на частоте 400Гц, будет вполне сносно себя вести на частоте 10-20кГц.

Рассмотрим практические примеры расчёта:

Пример 1:

Допустим, мы строим регулируемый сварочный источник. Источник питается от однофазной сети 220В 50Гц и регулировка сварочного тока в пределах от $I_{\min}=50$ до $I_{\max}=150A$ осуществляется при помощи управляемого тиристорного выпрямителя, периодичность нагрузки ПН=40%. Чтобы сварочная дуга не гасла в паузах напряжения дроссель, при минимальном токе и максимальном угле регулирования, должен поддерживать ток на уровне не ниже $I_{ст}=10A$. Отсюда можно определиться с минимальной индуктивностью дросселя:

$$L_{\min} = \frac{0.25 \cdot U \delta}{F \cdot (I_{\min} - I_{ст})} = \frac{0.25 \cdot (20 + 0.04 \cdot I_{\min})}{F \cdot (I_{\min} - I_{ст})} = \frac{0.25 \cdot (20 + 0.04 \cdot 50)}{50 \cdot (50 - 10)} = 2.56 \text{ мГн.}$$

Дроссель будем мотать на Ш-образном сердечнике из стали 3411 (Э310).

Предварительно выберем $B=1.3Tл$, $J=5A/мм^2$ (с учётом заданной ПН), $K_o=0.35$, $K_c=0.95$. Отсюда по формуле (6) найдём:

$$S_c \cdot S_o = \frac{100 \cdot 2.56 \cdot 10^{-3} \cdot 150^2}{1.3 \cdot 5 \cdot 0.95 \cdot 0.35} = 2665 \text{ см}^4$$

Для дросселя надо использовать, как минимум, два сердечника ШЛ40х80 ($S_c \cdot K_c = 30 \text{ см}^2$, $S_o = 40 \text{ см}^2$).

Определим количество витков по формуле (1):

$$W = \frac{100 \cdot 40 \cdot 0.35 \cdot 5}{150} = 46 \text{ витков}$$

Требуемое сечение обмоточного провода $S_{np} = \frac{I_{\max}}{J} = \frac{150}{5} = 30 \text{ мм}^2$

Определим немагнитный зазор по формуле (7):

$$\delta = \frac{I \cdot W}{796 \cdot B_m} = \frac{150 \cdot 46}{796 \cdot 1.42} = 6.1 \text{ мм.}$$

И, наконец, определим результирующую индуктивность по формуле (9):

$$L = \frac{1.25 \cdot 10^7 \cdot 60 \cdot 46^2}{6.7} = 2.37 \text{ мГн,}$$

что практически соответствует заданной минимальной индуктивности.

Экспериментальная проверка.

Теперь настало время вернуться к тем допущениям, которые мы сделали ранее.

Участником форума [5] под ником **Трибун** был проведен ряд экспериментов по проверке соответствия рассчитанных значений индуктивности дросселя их реальному значению.

Изначально был намотан дроссель на 4-х половинках из феррита 2500НМС1 ПП40х17х18, сложенных в форме **II**. Чтобы иметь возможность проверки параметров дросселя для различного количества витков, при аналогичной конфигурации обмотки, на сердечник было намотано 13 витков в два провода. В результате, используя параллельное и последовательное включение полученных обмоток, можно получить обмотку с 13 и 26 витками. Замеры показали, что дроссель при этом имел индуктивность 45.44 и 184.0 мкГн, что с погрешностью 0,68% соответствует квадратичной зависимости индуктивности от количества витков. Далее, по формуле (9), учитывая суммарное сечение сердечника $S_c = 11,56 \text{ см}^2$, был вычислен эквивалентный зазор дросселя, который получился равным:

$$\delta = \frac{1.25 \cdot 10^{-7} \cdot S_c \cdot K_c \cdot W^2}{L} = \frac{1.25 \cdot 10^{-7} \cdot 11.56 \cdot 13^2}{45.44 \cdot 10^{-6}} = 5.37 \text{ мм}$$

Это когда между рогами 40мм! Становится ясно, если мы хотим использовать формулу (9) для зазоров длиннее 1...2 мм, то необходимо чтобы она учитывала распухание поля в длинном зазоре.

Для дальнейших экспериментов был изготовлен дроссель на сердечнике 2500НМС1 ПП40х17х18, который имеет площадь окна $S_o = 4.0 \times 4.0 = 16 \text{ см}^2$, площадь сечения $S_c = 1.7 \times 1.75 = 2.97 \text{ см}^2$, среднюю длину магнитной силовой линии $L_c = 210 \text{ мм}$. Обмотка, 25+25=50 витков, намотана на сплошных частях половинок комплекта.

На рис.1 изображены сравнительные результаты расчёта и измерения индуктивности дросселя. Из приведённых графиков видно, что теоретическая и реальная кривые зависимости индуктивности от длины зазора пересекаются лишь в одной точке. Как и ожидалось, при меньшем зазоре формула (9) завышает индуктивность дросселя (при длине зазора $\delta=0$ индуктивность вообще уходит в бесконечность), а при большей занижает, так как не учитывает эффекта распухания поля.

Сначала займёмся областью малых зазоров.

Как говорилось ранее, при создании методики расчёта дросселя было сделано допущение, что сердечник имеет очень низкое (нулевое) магнитное сопротивление, что достаточно справедливо только в том случае если последовательно с сердечником включен немагнитный зазор, который имеет сопротивление на несколько порядков большее. Как по-простому можно нейтрализовать данное допущение? Очень просто! Можно считать, что в сердечнике уже существует некоторый распределённый зазор.

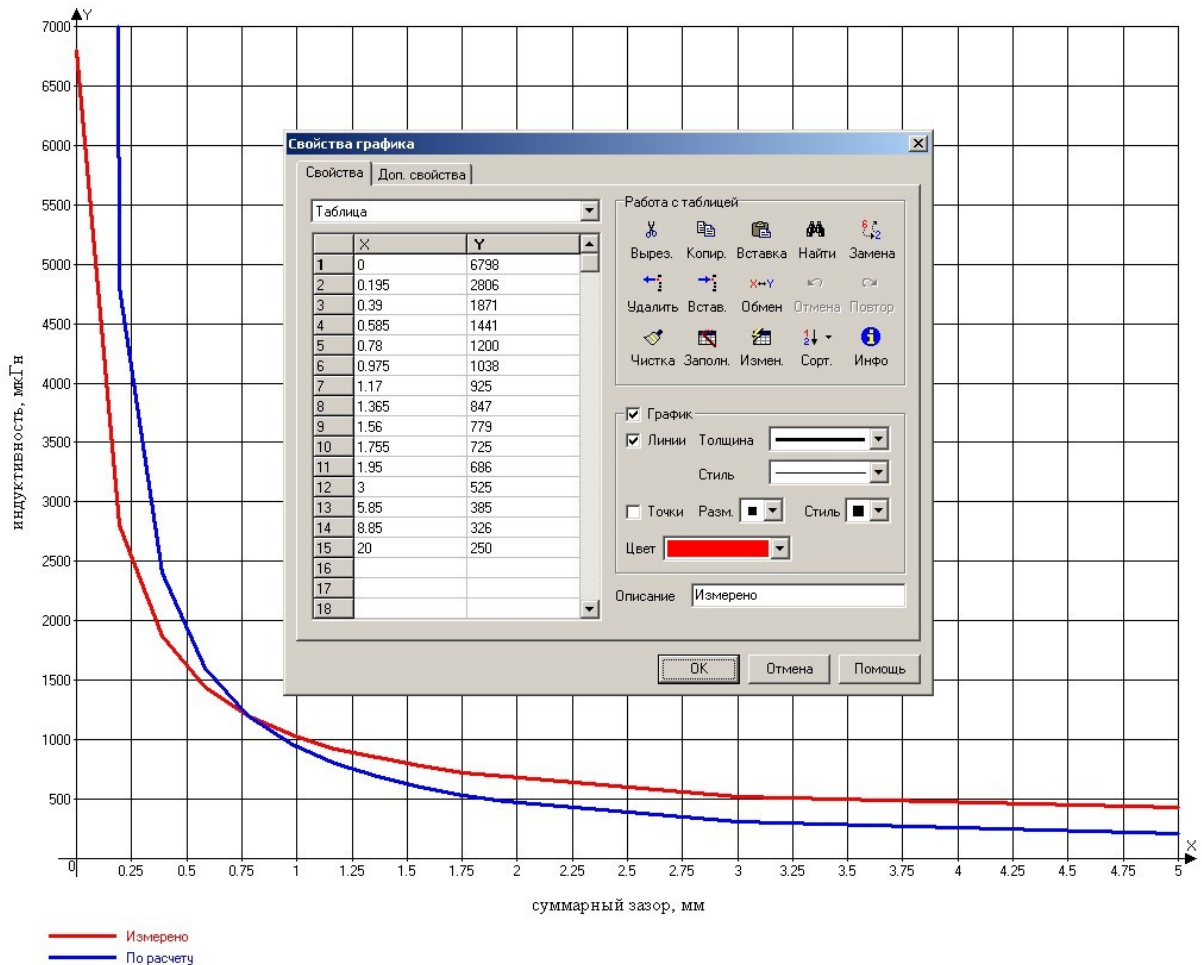


Рис.1. Расчётная и измеренная зависимости индуктивности дросселя от длины зазора.

Подобное допущение ни лишено здравого смысла, т.к. магнитный материал сердечника и в самом деле является смесью ферромагнитных и неферромагнитных веществ. Распределённый внутренний зазор может быть определён экспериментально или теоретически по справочным данным на материал сердечника.

Экспериментально это делается достаточно просто – мотается обмотка на полностью замкнутом сердечнике, потом измеряется её индуктивность и по той же формуле (9) рассчитывается зазор обеспечивающий эту индуктивность. Это и будет требуемый распределённый зазор.

В результате эксперимента была определена длина распределённого зазора, которая составила $\delta_p = 0.138$ мм.

Теоретически длина распределённого зазора должна быть в μ раз меньше средней длины магнитной силовой линии:

$$\delta_p = \frac{L_c}{\mu} = \frac{210}{2500} = 0.084 \text{ мм},$$

где μ — относительная магнитная проницаемость материала сердечника, которая показывает во сколько его абсолютная магнитная проницаемость больше магнитной проницаемости вакуума. В данном случае, для феррита 2500НМС1, $\mu=2500$.

Из расчёта видно, что рассчитанная длина распределённого зазора получилась меньше своего экспериментального значения. Это можно объяснить тем, что реальный сердечник, из-за неровностей и пыли, невозможно сомкнуть с нулевым зазором и поэтому этот недожим плюсуется к распределённому зазору.

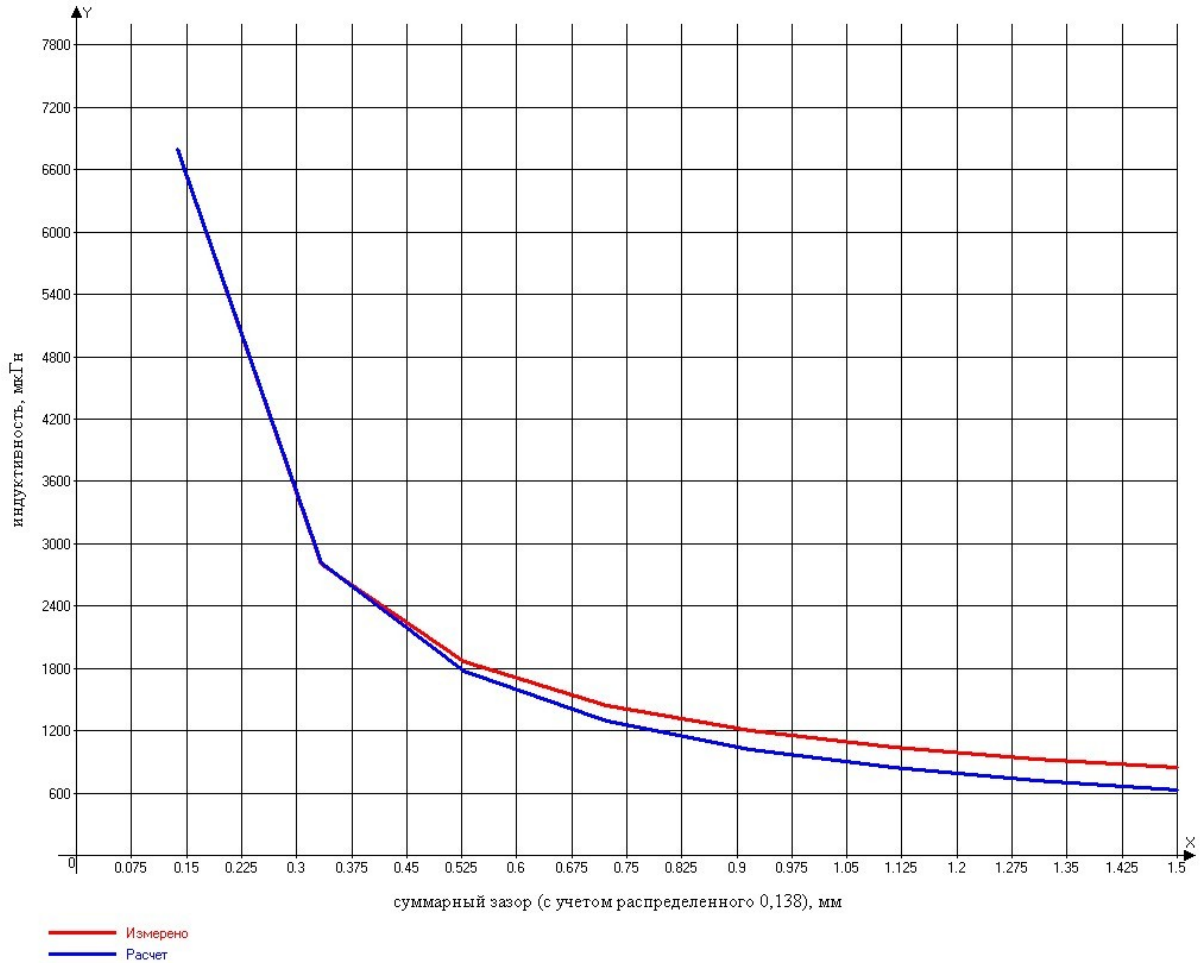


Рис. 2. Скорректированная для малых зазоров расчётная и измеренная зависимости индуктивности дросселя от длины зазора.

На рис.2 изображены расчётная и измеренная зависимости индуктивности дросселя от длины зазора, с учётом распределённого зазора самого сердечника. Хорошо видно, что в области малых зазоров зависимости отлично совпадают. Это даёт нам право внести соответствующие изменения в формулы (7) и (9):

$$\delta = \frac{I \cdot W}{796 \cdot Bm} - \frac{Lc}{\mu}, \text{ мм} \quad (10)$$

$$L = \frac{1.25 \cdot 10^{-7} \cdot Sc \cdot Kc \cdot W^2}{\delta + Lc/\mu}, \text{ Гн} \quad (11)$$

В области больших зазоров ситуация несколько сложнее, т.к. там картина распухания поля сильно зависит от сечения сердечника, от соотношения сторон сечения, а так же от взаимного расположения торцов магнитопровода (на против друг друга или в одной плоскости). Ясно одно, что для одного типа сердечника, картина распухания имеет однозначную и повторяемую зависимость от длины зазора. Поэтому один раз измерив эту зависимость, можно в дальнейшем использовать её как справочную информацию. И скорей всего эту зависимость можно описать эмпирически.

Например, чтобы получить хорошее совпадение рассчитанной и измеренной индуктивности для дросселя на сердечнике 2500НМС1 ПП40х17х18, достаточно ввести в формулу (11) поправочное выражение, являющееся функцией от длины зазора:

$$L = \frac{1.25 \cdot 10^{-7} \cdot S_c \cdot K_c \cdot W^2}{\delta + L_c / \mu} \cdot \left(1 + \frac{\delta}{G}\right), \text{ Гн} \quad (12)$$

где S_c - сечение сердечника, см^2 ;

K_c - коэффициент заполнения стали (для шихтованных сердечников);

W - количество витков;

δ - длина немагнитного зазора, мм ;

L_c - средняя длина магнитной силовой линии, мм ;

μ - относительная магнитная проницаемость используемого ферромагнитного материала;

$G = a \cdot b / (2 \cdot a + 2 \cdot b)$ - параметр сердечника, характеризующий отношение площади зазора к его периметру. Если сечение сердечника круглое, то $G = d/4$ (d -диаметр). При

вычислении параметра G , размеры a , b или d берутся в мм .

Формула даёт прекрасное совпадение с практическими результатами.

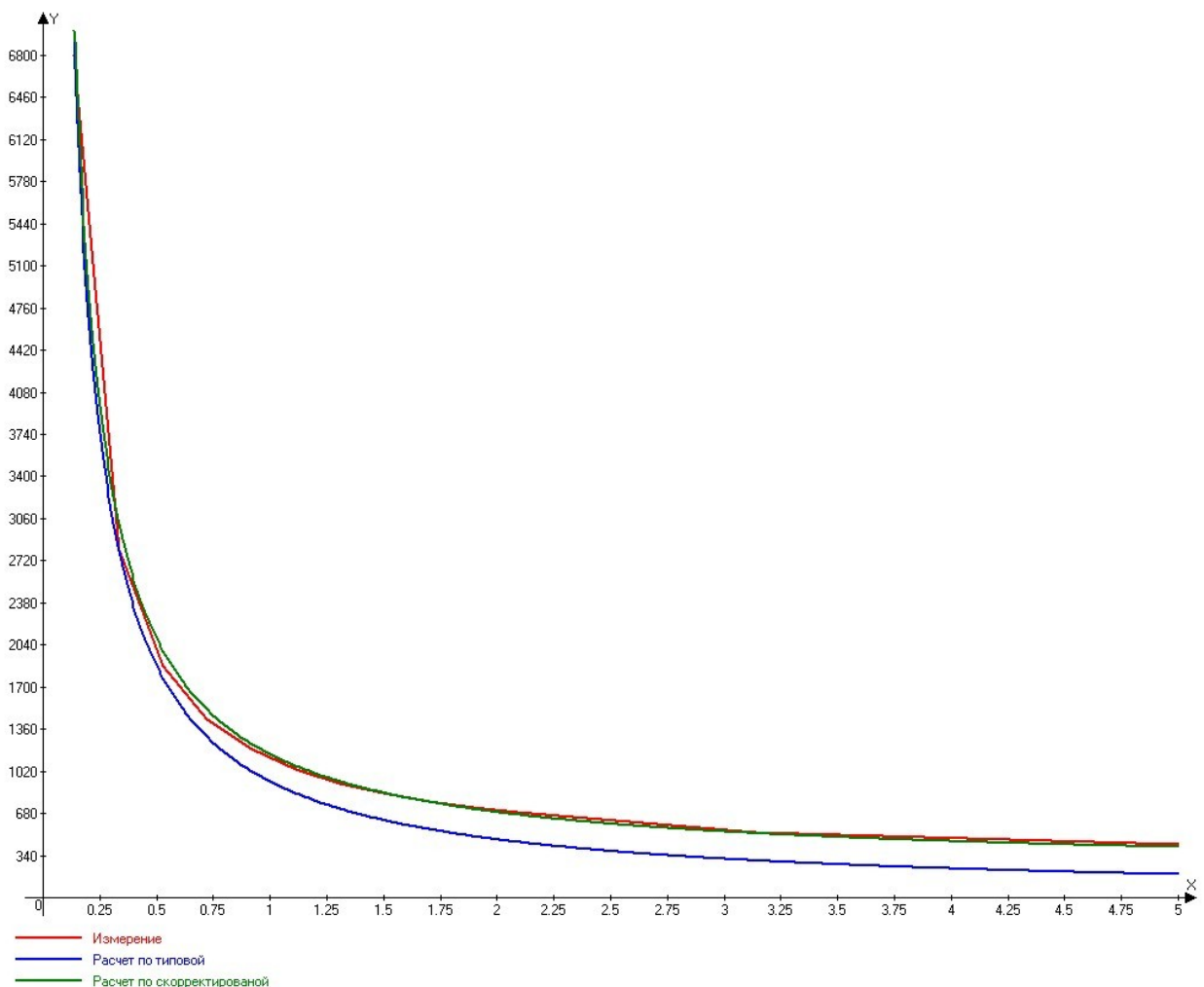


Рис.3 Виды измеренной и скорректированных зависимостей индуктивности дросселя от длины зазора.

Пример 2:

Рассчитаем дроссель для регенеративного снаббера, использованного участником форума под ником **Multik** в однотактном прямоходовом преобразователе типа косой мост (дроссель L4 на рис.4).

Дроссель должен иметь индуктивность 6 мкГн. Моделирование показало, что через обмотку дросселя протекает действующий ток $I_d=1.82A$. При этом его амплитудное значение тока достигает значения $I_a=13 A$.

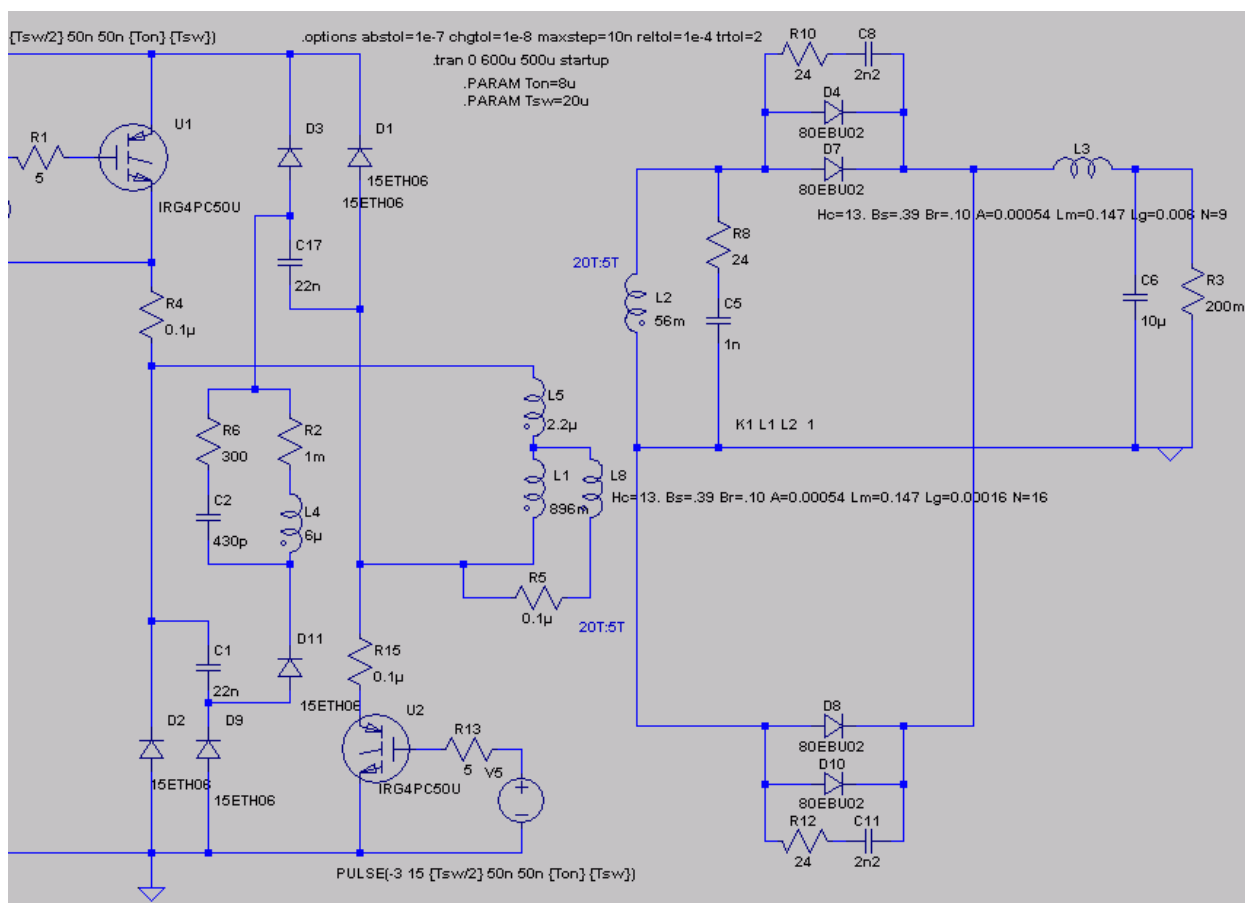


Рис. 4. Косой мост с регенеративным снаббером.

Методика расчёта дросселя, изложенная выше, была разработана для случая, когда через обмотку дросселя протекает постоянный ток. Для постоянного тока, его амплитудное, среднее и действующее значения равны. В данном же случае задача усложнена, так как амплитудное значение тока, протекающего через дроссель, в 7 раз превышает его действующее значение. Чтобы использовать отработанную методику, можно пойти на небольшую хитрость. Суть этой хитрости в том, чтобы нужным образом скорректировать значение плотности тока в обмотке дросселя и далее использовать только амплитудное значение тока. Новое значение плотности тока можно найти по формуле:

$$J' = J \cdot \frac{I_A}{I_d} = 4 \cdot \frac{13}{1.82} = 28.57 \text{ A/мм}^2$$

Дроссель будем мотать на Ш-образном сердечнике из феррита M2000HM. Предварительно выберем $B=0.3\text{Тл}$, $K_o=0.1$ (с учётом того, что обмотку придётся мотать литцендратом, который дополнительно ухудшит заполнение окна). Отсюда по формуле (6) найдём:

$$S_c \cdot S_o = \frac{100 \cdot L \cdot I^2}{B_m \cdot J' \cdot K_o} = \frac{100 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 13^2}{0.3 \cdot 28.57 \cdot 0.1} = 0.12 \text{ см}^4$$

Для дросселя можно использовать ферритовый сердечник Ш5х5 ($S_c=0.25\text{см}^2$, $S_o=0.52\text{см}^2$, $S_c \cdot S_o=0.13\text{см}^4$, $L_c=66\text{мм}$, $G=5 \cdot 5 / (2 \cdot 5 + 2 \cdot 5)=1.25\text{мм}$).

Определим количество витков по формуле (1):

$$W = \frac{100 \cdot S_o \cdot K_o \cdot J}{I} = \frac{100 \cdot 0.52 \cdot 0.1 \cdot 28.57}{13} = 12 \text{ витков}$$

Требуемое сечение обмоточного провода $S_{np} = \frac{I}{J} = \frac{13}{28.57} = 0.455 \text{ мм}^2$

Определим "теоретический" немагнитный зазор по формуле (7):

$$\delta = \frac{I \cdot W}{796 \cdot B_m} = \frac{13 \cdot 12}{796 \cdot 0.3} = 0.65 \text{ мм.}$$

По формуле (9) определим "теоретическую" индуктивность:

$$L = \frac{1.25 \cdot 10^{-7} \cdot S_c \cdot K_c \cdot W^2}{\delta} = \frac{1.25 \cdot 10^{-7} \cdot 0.25 \cdot 12^2}{0.65} = 6.9 \text{ мкГн}$$

Индуктивность получилась несколько выше, чем требуется. Чтобы вернуть её в норму, нужно немножко увеличить зазор. Новый "теоретический" зазор будет иметь длину $\delta = 0.65 \cdot 6.9 / 6 = 0.75 \text{ мм}$. Длину реального зазора, с учётом распределённого зазора и "распухания" поля, можно найти по формуле:

$$\delta_p = \frac{(\delta \cdot \mu - Lc) \cdot G}{(G - \delta) \cdot \mu} = \frac{(0.75 \cdot 2000 - 66) \cdot 1.25}{(1.25 - 0.75) \cdot 2000} = 1.7925 \text{ мм} \quad (13)$$

И, наконец, определим результирующую индуктивность по формуле (12):

$$L = \frac{1.25 \cdot 10^{-7} \cdot S_c \cdot K_c \cdot W^2}{\delta + Lc/\mu} \cdot \left(1 + \frac{\delta}{G}\right) = \frac{1.25 \cdot 10^{-7} \cdot 0.25 \cdot 12^2}{1.7925 + 66/2000} \cdot \left(1 + \frac{1.7925}{1.25}\right) = 6 \text{ мГн,}$$

что соответствует требуемой индуктивности.

Формирование параметров модели нелинейного дросселя для симулятора LTSpice/SwCad.

Нелинейный дроссель (индуктор) доступный для моделирования в LTSpice основан на гистерезисной модели сердечника впервые предложенной John Chan [6]. Эта модель, на основании трёх основных параметров материала сердечника, позволяет восстановить внешний вид петли гистерезиса (Таблица 2).

Таблица 2. Основные параметры петли гистерезиса

Имя параметра	Описание	Единицы измерения
Hc	Коэрцитивная сила	А/м
Br	Остаточная индукция	Тл
Bs	Индукция насыщения	Тл

Восходящий и нисходящий участки петли гистерезиса моделируются при помощи следующих выражений:

$$B_{up}(H) = \frac{B_s \cdot (H + H_c)}{|H + H_c| + H_c \cdot (B_s / B_r - 1)} + \mu_0 \cdot H, \text{ для восходящего участка.}$$

И

$$B_{dn}(H) = \frac{B_s \cdot (H - H_c)}{|H - H_c| + H_c \cdot (B_s / B_r - 1)} + \mu_0 \cdot H, \text{ для нисходящего участка.}$$

Начальная кривая намагничивания моделируется выражением:

$$B(H) = 0.5 \cdot (B_{up}(H) + B_{dn}(H)) \quad (14)$$

Внешние виды петли гистерезиса и начальной кривой намагничивания, построенные по указанным зависимостям для феррита М2000НМ, показаны на рис.5.

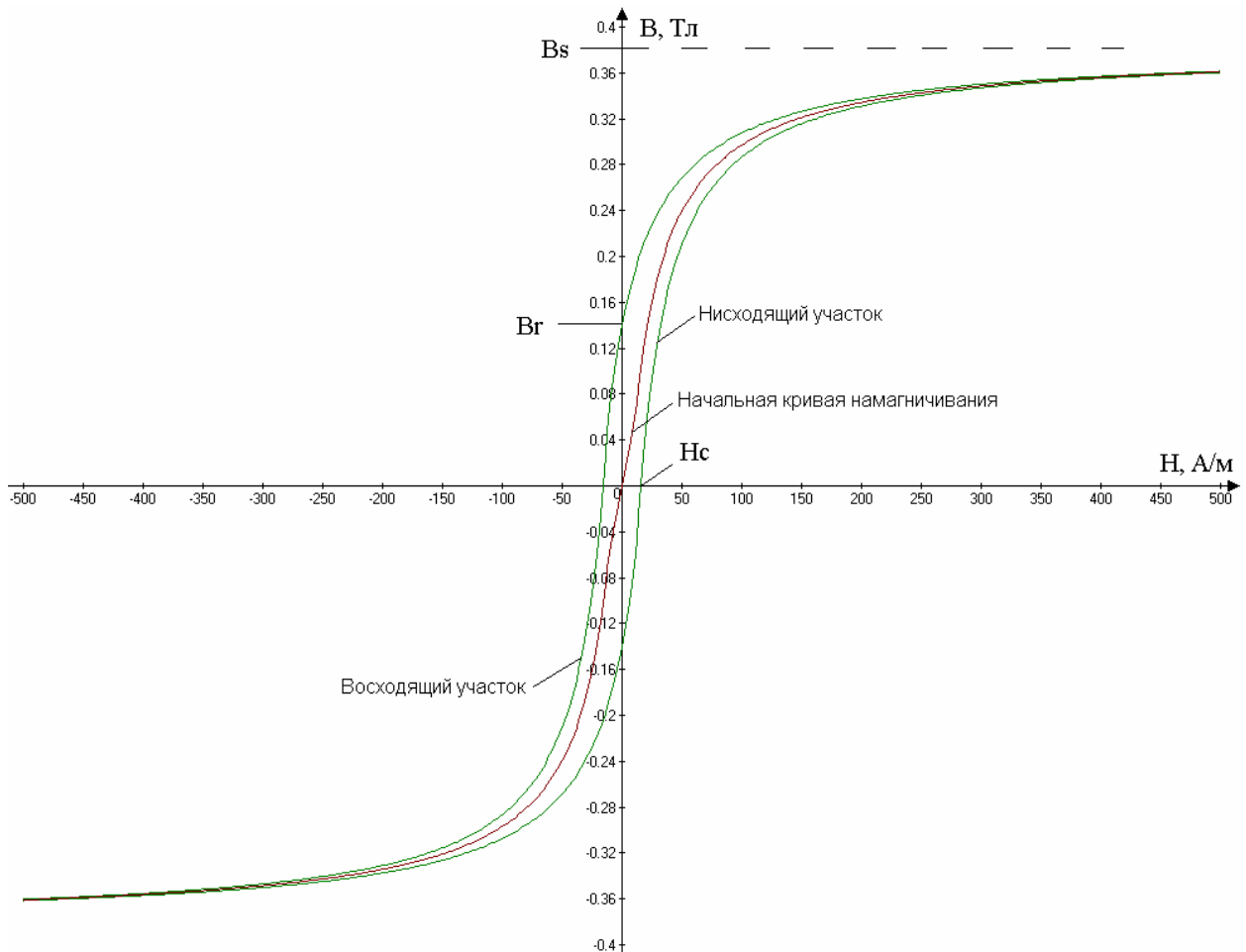


Рис.5. Петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания феррита М2000НМ, имеющего $H_c=16 \text{ A/m}$, $B_r=0.14 \text{ Тл}$, $B_s=0.38 \text{ Тл}$.

Для примера определим параметры модели дросселя, рассчитанного в примере 2.

Чтобы определить распределённый немагнитный зазор, требуется знать относительную магнитную проницаемость материала сердечника - μ . Так как относительная магнитная проницаемость не указывается явным образом в параметрах модели сердечника (таблица 2), то её требуется найти, воспользовавшись выражением, описывающим начальную кривую намагничивания (14):

$$\mu = \frac{B_s \cdot B_r}{(B_s + B_r) \cdot \mu_0 \cdot H_c} \quad (14)$$

Рассчитаем относительную магнитную проницаемость для феррита М2000НМ:

$$\mu = \frac{0.38 \cdot 0.14}{(0.38 + 0.14) \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 16} = 5090$$

Думаю нас не должно смущать некоторое отличие полученной проницаемости от проницаемости указываемой в справочных данных на феррит. Во-первый, в справочнике указывается некоторая минимальная величина относительной проницаемости, а во-вторых всякая модель может иметь некоторую погрешность, особенно в начальной области кривой намагничивания.

По формуле (10) определим немагнитный зазор, с учётом немагнитного зазора распределённого в сердечнике:

$$\delta = \frac{I \cdot W}{796 \cdot Bm} - \frac{Lc}{\mu} = \frac{13 \cdot 12}{796 \cdot 0.3} - 66/5090 = 0.64 \text{ мм}$$

В данном случае, из-за небольшой длины магнитной силовой линии - Lc , мы получили небольшую разницу между теоретическим и модельным зазорами. В случае больших значений Lc разница так же может быть более существенной.

Согласно сделанных расчётов, строка настройки модели дросселя должна иметь следующий вид:

$$\mathbf{Hc=16 \ Bs=.38 \ Br=.14 \ A=0.000025 \ Lm=0.066 \ Lg=0.00064 \ N=12}$$

Литература:

1. Под ред. Г.С. Найвелта. Справочник: Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и Связь, 1986 год, стр.116-121.
2. К.Б. Мазель. Выпрямители и стабилизаторы напряжения. М-Л.: Госэнергоиздат, 1951 год, стр.55-60.
3. С.Г. Бунин, Л.П.Яйленко. Справочник радиолюбителя-коротковолновика. К.: Техніка, 1984 год, стр.203-204.
4. В.В. Губанов. Стабилизированные полупроводниковые преобразователи в системе с нелинейными резонансными устройствами. Л.: Энергоатомиздат, 1985 год, стр.12.
5. Форум Power Electronics - <http://valvol.flyboard.ru/topic42-345.html>
6. IEEE Transactions On Computer-Aided Design, Vol. 10. No. 4, April 1991.