

## Методика оптимизации SE трансформатора по результатам измерения сердечника.

Традиционно трансформатор для однофазного каскада рассчитывается, исходя из необходимой нижней граничной частоты, определяемой индуктивностью трансформатора, приведенного к первичной обмотке сопротивления и необходимой мощности [1].

Предлагается другой метод, основанный на оптимизации использования сердечника и получения максимальной мощности при минимальных искажениях.

В работах [2] [3] показаны типичные кривые намагничивания и петли гистерезиса ферромагнитных материалов, а так же описана зависимость магнитной проницаемости от индукции в сердечнике.

Необходимо отметить, что линейный участок кривой зависимости магнитной проницаемости от уровня магнитной индукции совпадает с линейным участком петли гистерезиса, т.е. оптимальным рабочим участком трансформатора.

Для примера взят сердечник из стали М4 NiВ сечением 7,7кв.см. Измерения проведены Марком Фельдшером (Израиль). Методика измерения подробно описана в работе Е. Васильченко [5].

Следующий график показывает зависимость проницаемости  $\mu$  от индукции в сердечнике  $B$  при использовании обмотки из 75 витков и немагнитном зазоре 0,15мм.

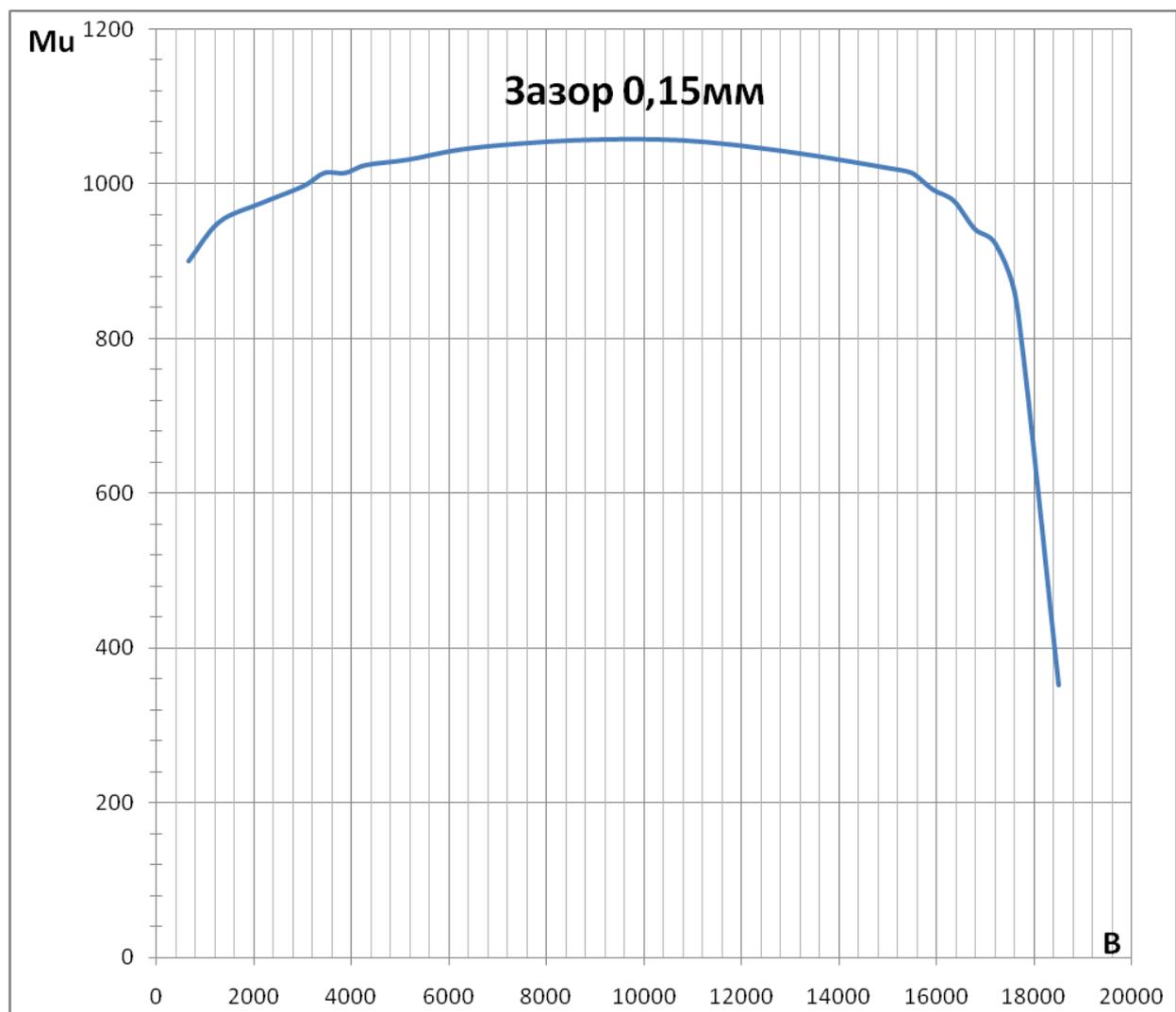


График 1

Как мы видим из графика, по мере увеличения магнитной индукции от нуля до 3500Гс, магнитная проницаемость быстро растет, затем рост замедляется, достигая максимума при индукции 10000Гс, после чего плавно снижается до уровня, близкого к начальной проницаемости, и резко падает при дальнейшем увеличении индукции. Максимально допустимая индукция в данном сердечнике при данном зазоре - 17767Гс.

На следующем графике представлены результаты измерения того- же сердечника без зазора:

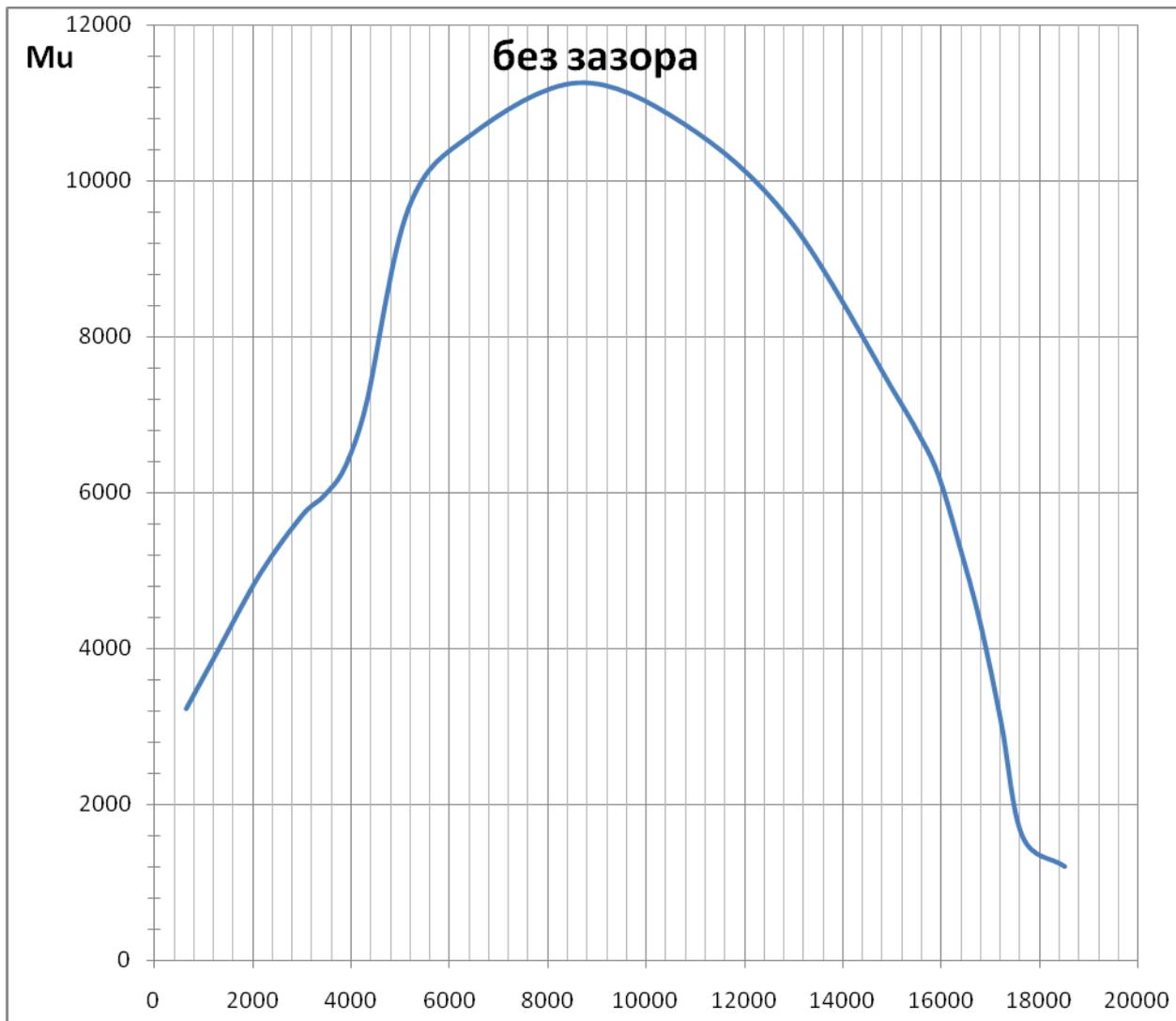


График2

Теперь необходимо вспомнить основной принцип работы однотактного лампового каскада с трансформаторной нагрузкой.

Ток, протекающий через лампу и трансформатор, меняется относительно тока покоя  $I_0$ , от значений, близких к нулю до максимума, равного примерно  $I_0 \times 2$ .

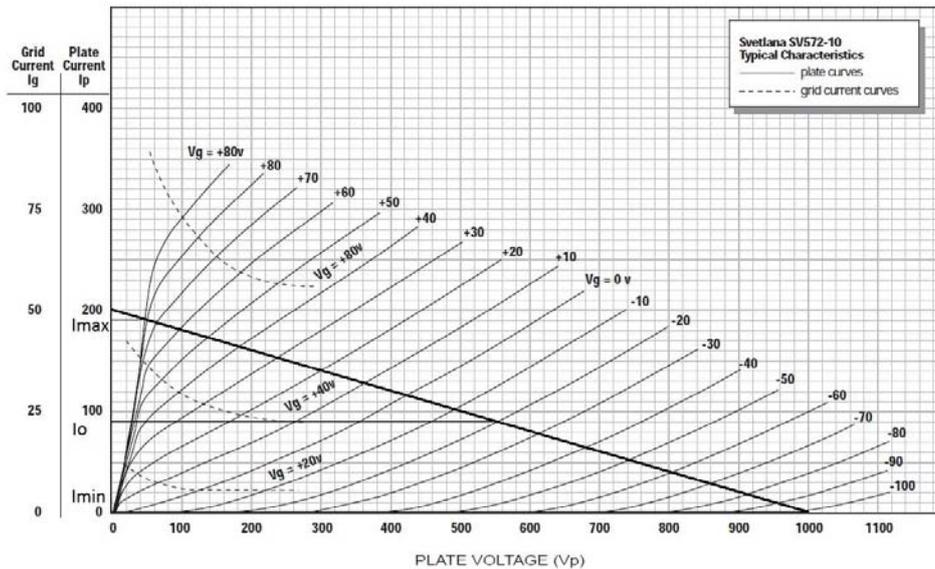


График 3

Магнитная индукция в сердечнике  $B$  прямо пропорциональна току через обмотку и количеству витков, таким образом, индукция, являющаяся максимальной для сердечника, должна достигаться при максимальном токе через лампу, т.е.  $I_o \times 2$ , а ток покоя лампы должен выводить сердечник на среднее значение намагниченности,  $B_{\max}/2$ , что соответствует середине прямолинейного участка петли гистерезиса.

Размах тока каскада должен совпадать с пропорциональным ему размахом магнитной индукции на вышеприведенном графике. Это условие является необходимым для обеспечения максимальной мощности с минимальными искажениями.

### Немного теории.

Протекающий через катушку из  $N$  витков ток  $I$  создает в сердечнике магнитодвижущую силу

$$F = N \cdot I \quad (1)$$

В замкнутом однородном сердечнике длиной  $l_{\text{ср}}$  возникает напряженность поля

$$H = \frac{F}{l_{\text{ср}}} \quad (2)$$

Где  $H$  – напряженность А/м,

Если сердечник неоднороден, то на каждом участке напряженность магнитного поля будет своя, и формула примет вид

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n$$

Эта напряженность магнитного поля создает в сердечнике магнитный поток с индукцией

$$B = \mu_{\alpha} H \quad (\text{Тл}) \quad (3)$$

Где  $\mu$  – магнитная проницаемость сердечника.

Различают абсолютную и относительную магнитную проницаемость. Абсолютная магнитная проницаемость воздуха  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

В физических расчетах применяется абсолютная проницаемость, также называемая Магнитной Постоянной. Относительная проницаемость материала показывает, во сколько раз его проницаемость выше проницаемости воздуха.

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$$

Магнитный поток через площадь  $S$  составит

$$\Phi = B * S_c \quad (B6) \quad (5)$$

Где  $S_c$  – площадь поперечного сечения сердечника

Удобно представлять магнитную цепь эквивалентной электрической цепью.

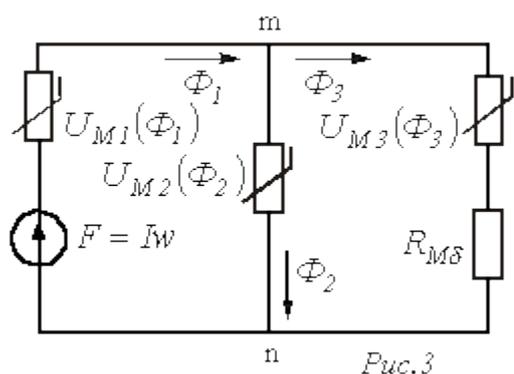


Рис.3

Катушка создает **магнитное напряжение**  $F=Iw$ , где  $I$ - ток через катушку,  $w$  – количество витков в катушке.

Под действием этого напряжения в магнитной цепи возникает **магнитный ток**  $\Phi$ , и в цепи имеются **магнитные сопротивления**  $R_m$

Магнитное сопротивление  $R_{mi} = \frac{l_i}{\mu_i * S_i} \quad (6)$

Где  $l_i$  - длина  $i$ -того участка магнитопровода или зазора,  $\mu_i$  – магнитная проницаемость участка,  $S_i$  – площадь участка. Для

простоты понимания надо представить  $\mu$  как удельное магнитное сопротивление, которое на длине проводника  $l$  с площадью  $S$  создает сопротивление  $R_m$ .

Положение осложняется тем, что магнитная проницаемость ферромагнетика зависит от магнитного потока через него, и определяется для конкретного значения магнитного тока по диаграмме намагниченности.

Закон Ома для магнитной цепи выглядит так:  $F=\Phi R_m \quad (7)$

На рисунке приведен пример разветвленной магнитной цепи, в которой общий магнитный ток складывается из двух  $\Phi_1=\Phi_2+\Phi_3$

Значит, и магнитная индукция на разных участках будет разная –  $B=\Phi/S \quad (5)$

Для сердечника трансформатора Ш или ШЛ площадь сечения боковых веток суммарно равны площади центральной части, и зазоры в боковых ветвях одинаковы, т.е. при решении магнитной задачи сердечник можно представить как О с одним зазором на боковой части.

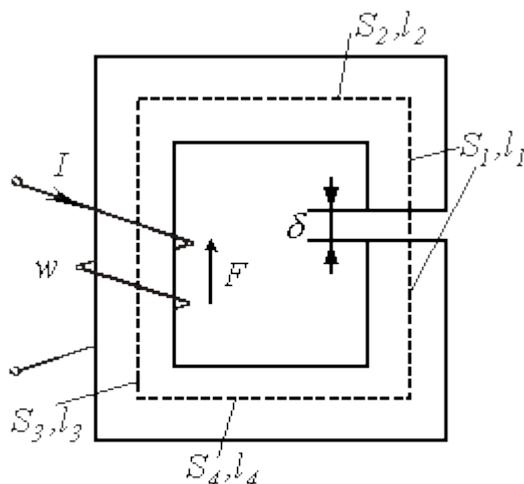


Рис.1

Отсюда очевидно, что, поскольку магнитный ток  $\Phi$  протекает по одному пути, он один и одинаков по всей магнитной линии, и, поскольку сечение также постоянно, напряженность  $B$  также постоянна во всем магнитопроводе и в зазоре.

Магнитное уравнение будет иметь вид:

$$\Phi = \frac{F}{R_m + R_\delta} = \frac{Iw}{\frac{l_c}{\mu * S} + \frac{\delta}{\mu_0 * S}}$$

Здесь  $\mu$  - абсолютная проницаемость материала сердечника,  $\mu_0$  - магнитная постоянная. Следует понимать, что измеряемая нами практически магнитная проницаемость – это суммарная проницаемость, определяющаяся магнитным сопротивлением двух участков. И, поскольку магнитное сопротивление зазора много больше, чем магнитопровода, и оно не зависит ни от напряженности, ни от частоты, переменная составляющая уравнения снижается вплоть до того, что ей можно пренебречь.

Этот вывод является одним из основополагающих для понимания работы SE трансформатора. Ниже рассматривается практический пример.

## Практические расчеты

Для того, чтобы представить происходящий процесс наглядно, отложим на вертикальной оси графика индуктивность  $L_{75}$  - индуктивность катушки 75 витков, а на оси X – произведение тока через катушку на количество витков (магнитное напряжение F) и добавим графики, измеренные при зазоре 0,15 и 0,25мм.

Пересчет в такой вид даст нам определенные преимущества – во первых, по оси X мы отложим величину, являющуюся вводной, и пропорциональную напряженности магнитного поля.

По оси Y отложим значение индуктивности, которая прямо пропорциональна  $\mu$  и является для нас выходной величиной. То есть, график будет иметь такой же вид, что и График 1 (стр.1), приведенный через коэффициенты.

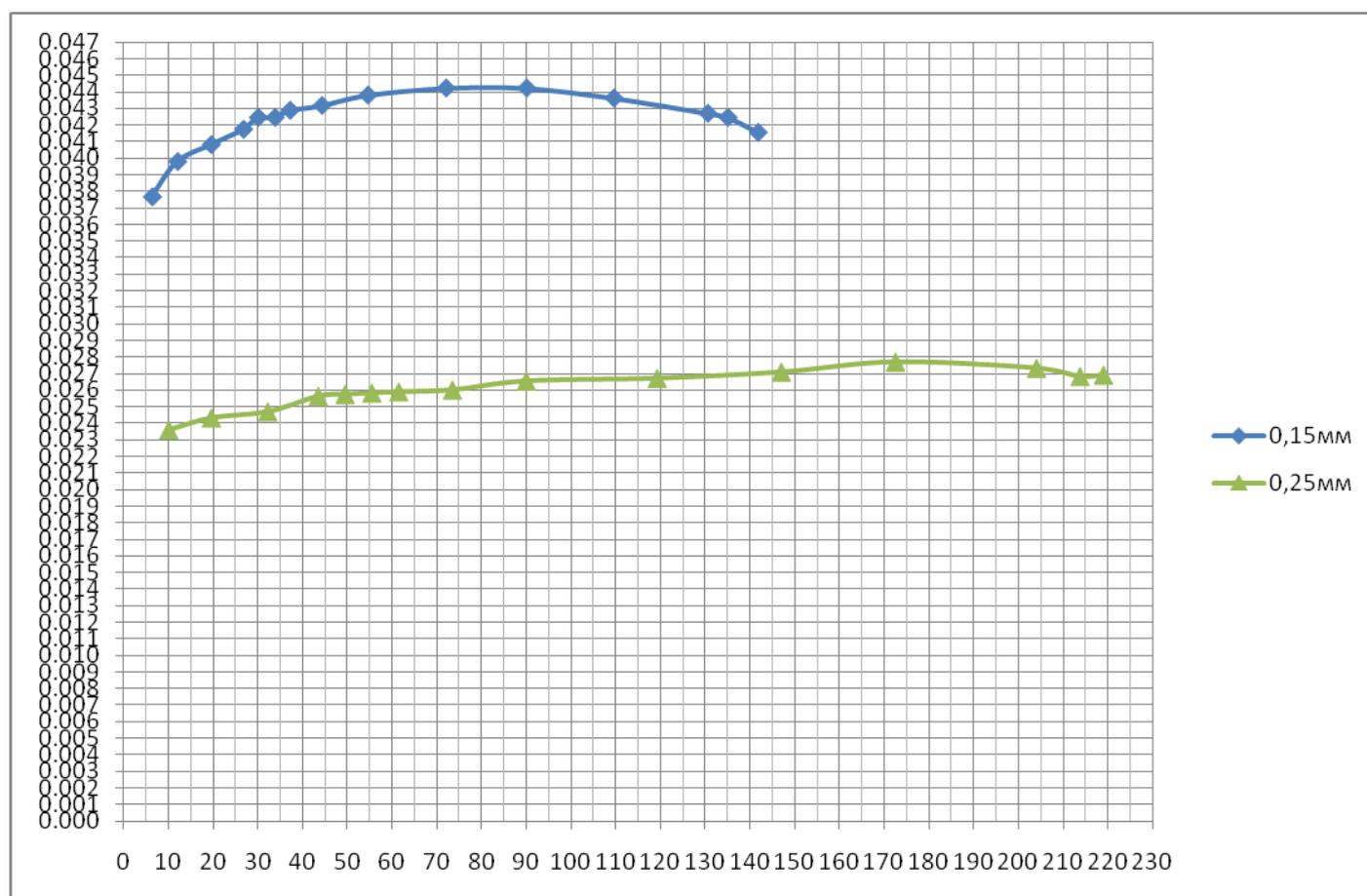


График 4

Рассмотрим график с зазором 0,15мм.

Видно, что точка максимума соответствует напряженности 80 А\*Виток, при этом индуктивность составляет 0,0443Гн. По первому графику та же точка  $B=10000$ Гс,  $Mю=1070$ .

Примем за рабочую точку напряженность 70 А\*Вит, при этом индуктивность составит 0,044Гн.

Как теперь из этих величин посчитать реальный трансформатор? Конечно, приведя его к реальному току!

$$N_{опт} = (A/вит) / I_0$$

Допустим, ток холостого хода нашего каскада 0,03А. Тогда  $N_{опт} = 70 / 0,03 = 2333$  витков.

Посчитаем индуктивность  $L_{опт} = L_{75} (2333/75)^2 = 42,6$ Гн.

Посчитаем для второго графика.

$$W_{ном} = 120 \text{ Авит}$$

$$N_{опт} = 120 / 0,03 = 4000 \text{ витков.}$$

$$L_{опт} = 74 \text{ Гн.}$$

Легко заметить, что, если в первом случае задаться током через трансформатор не 30мА, а 15мА, мы получим обмотку тоже около 70Гн с количеством витков 4700!

Как видим, увеличение немагнитного зазора в 1,7 раза потребовало увеличения количества витков в 1,73 раза. Почти линейная зависимость.

Тогда мы можем предположить, что семейство кривых в окружающем диапазоне будут пролегать аналогичным образом, и начертим прямую, связывающую величину зазора, количество ампер – витков и индуктивность обмотки.

Становится очевидна основная проблема трансформатора с подмагничиванием – если при постоянном зазоре увеличить количество витков вдвое, индуктивность вырастет квадратично, т.е. в четыре раза, но, поскольку ровно в два раза вырастет В, возникающая от протекающего в обмотке постоянного тока, сердечник войдет в насыщение. Чтобы этого не происходило, придется увеличить зазор так, чтобы проницаемость  $\mu$  уменьшилась в два раза и магнитная индукция упадет пропорционально вдвое.

Мы подошли к очень интересному вопросу – как зависит магнитная проницаемость и пропорциональная ей индуктивность катушки от зазора и параметров сердечника?

Попробуем разобраться. Для этого нам придется вернуться к решению магнитной задачи (стр.4).

Логично предположить, что суммарная с учетом зазора проницаемость изменится во столько же раз, во сколько изменится магнитное сопротивление  $R_m$  (6) магнитной цепи.

Запишем выражения

$$\text{Магнитное сопротивление сердечника } R_m = \frac{l_c}{\mu * S_c}$$

$$\text{Магнитное сопротивление зазора } R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 * S_c}$$

$$\frac{L_0}{L_\delta} = \frac{\frac{l_c}{\mu * S_c} + \frac{\delta}{\mu_0 * S_c}}{\frac{l_c}{\mu * S_c}} = \frac{\delta \mu}{\mu_0 * l_c} + 1$$

Здесь  $\mu$  - абсолютная магнитная проницаемость материала сердечника без зазора при выбранной магнитной индукции,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Вспомним, что  $\frac{\mu}{\mu_0}$  это относительная магнитная проницаемость,

$$\text{Таким образом, } \frac{L_0}{L_\delta} = \frac{\delta \mu_{отн}}{l_c} + 1 \quad (7)$$

Заметим, что в [2] приведена такая же формула. Теперь понятно, как ее вывести.

Итак, этот сердечник является оптимальным:

а) Для межкаскадного трансформатора с током первичной обмотки 15мА-35мА, с зазором 0,15мм, количеством витков первичной обмотки 2300 - 4000 и индуктивностью 40- 70Гн, для выходного трансформатора предварительного усилителя или усилителя для наушников с таким же режимом.

б) Для выходного трансформатора небольшой мощности с током покоя 60мА, зазором 0,25мм, количеством витков 2000, индуктивностью около 18Гн.

Такой лампой может быть, например, 2А3. Посчитаем каскад.

$$Z_l = 2\pi F L = 2\pi \cdot 20 \cdot 18 = 2513 \text{ Ом.}$$

Возьмем приведенное к первичной обмотке сопротивление  $Z = 2500 \text{ Ом}$ , тогда количество витков во вторичной обмотке будет  $2000 / (2500/8)^{0.5} = 113$  витков.

Размах тока на первичной обмотке  $\pm 60 \text{ мА}$ . Примерная мощность без учета потерь  $P = 0.06^2 \cdot 2500 = 3.15 / 1.41 = 6.3 \text{ Вт}$ .

Этот трансформатор будет иметь спад -3дБ на частоте 20Гц.

**Выводы из расчета:** Для данного сердечника в одноконтурном режиме с током подмагничивания оптимальным является количество витков в первичной обмотке 2000-4000, задавая зазор в диапазоне 0,15- 0,25мм, можно оптимизировать трансформатор для того или иного применения.

Для увеличения  $I_0$ , мощности, или расширения полосы в сторону НЧ надо брать сердечник большего сечения. При применении сердечников из аналогичного материала можно воспользоваться общепринятыми соотношениями, т.е. для увеличения мощности вдвое необходимо вдвое увеличить площадь сердечника. [1]

Например, для лампы 300В и расчетной мощности 10Вт понадобится сердечник около 18- 35кв.см.

Нельзя бездумно увеличивать количество витков для увеличения индуктивности, также не рекомендуется применять трансформатор, спроектированный для работы в SE, с серьезными отклонениями от оптимального тока подмагничивания. Приведенная методика идеологически близка к графоаналитическому способу определения оптимального режима лампы по ВАХ. Каждый сердечник имеет уникальные характеристики и к ним надо относиться столь же тщательно, как к характеристикам ламп.

Замечание по расчету трансформатора для двухтактного режима:

В двухтактном режиме сердечник той же площади поперечного сечения обеспечит по крайней мере вчетверо большую мощность. Рекомендуется вводить в сердечник PP трансформатора минимальный зазор, при котором график Мю от В приближается по форме к дуге или прямой. Количество витков определяется по максимальной индукции – она должна достигаться на нижней граничной частоте при максимальном токе нагрузочной линии ВАХ.

Замечание по расчету трансформатора для каскада с сеточными токами и для работы с сложной нагрузкой:

Необходимо учитывать, что при работе на низкой частоте нагрузочная линия поворачивается по часовой стрелке, так как нагрузка лампы оказывается составной – активной, приведенной от нагрузки, и реактивной  $Z_L$ , включенных параллельно. В расчете было принято, что двукратного превышения относительно тока покоя

достаточно, чтобы перекрыть необходимый диапазон, с учетом внутреннего сопротивления лампы и импеданса нагрузки (АС). Но в случае работы с сеточными токами или сложной комплексной нагрузкой диапазон тока может быть несколько шире, и в таких сложных случаях необходимо сместить рабочую точку в сторону меньших значений Ампер – Витков.

Разный подход к расчету трансформатора для каскада, работающего в классе А и классе А2 (с сеточными токами) можно проследить по Графику 3, на котором представлена ВАХ лампы SV572-10.

При работе в классе А при выбранной линии нагрузки ток покоя следует выбрать равным 60мА, при напряжении на аноде 700В. В таком случае размах тока составит 120мА.

Для работы в классе А2 следует выбрать рабочую точку 90мА и 500В, тогда размах тока составит 180мА.

Однако возможен и другой вариант – чаще всего каскад рассчитывают для работы в классе А с рабочей точкой 60мА 700В и размахом тока 120мА, но предусматривают возможность захода в плюсовые значения сеточных напряжений на пиках сигнала, что расширяет диапазон тока до 130...140мА

### Несколько слов об общепринятых заблуждениях

Многие авторы методик расчета трансформаторов затрудняются в вопросе выбора оптимальной величины немагнитного зазора (точнее – толщины прокладки) и дают для него эмпирическую формулу

$$\delta = 9 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot I \quad (\text{мм}) \quad [2], [4]$$

Однако эта формула является следствием решения Прямой Магнитной Задачи из курса физики для ВУЗов.

Теория описана в начале статьи.

Разберемся, откуда берется загадочный коэффициент перед NI

При решении прямой магнитной задачи магнитную цепь разбивают на участки, которые имеют некоторое Магнитное Сопротивление  $R_M$ , зависящее от магнитной проницаемости участка.

Уравнение выглядит следующим образом:

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2$$

Здесь  $H_1$  – напряженность магнитного поля в сердечнике,  $l_1$  – длина средней линии магнитопровода,

$H_2$  - напряженность магнитного поля в зазоре  $l_2$  – длина зазора.

В случае ферромагнитного сердечника с зазором, магнитное сопротивление зазора много больше магнитного сопротивления сердечника, поэтому для определения магнитной индукции в зазоре (она равна магнитной индукции в сердечнике) сопротивлением сердечника можно пренебречь.

Таким образом, уравнение выразится в  $NI = H_2 \delta$

$$H = \frac{B}{\mu}$$

Мы знаем, что

Из показанных выше графиков видим, что для сердечника М4 оптимальная индукция на холостом ходу  $B_0=0.7\text{Тл}$ , а абсолютная магнитная проницаемость воздуха  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$

То есть в системе СИ,

$$\delta = NI * \frac{\mu_0}{B_0} = 1.8 * 10^{-6} * NI \quad (6)$$

Таким образом, видно, что зазор косвенно (т.е. через оптимальный уровень В) зависит от материала сердечника, но не зависит от его геометрических характеристик.

В случае заполнения немагнитного промежутка материалом с магнитной проницаемостью, отличной от воздуха, значение в уравнении необходимо менять.

Повторюсь, что эти выкладки справедливы в том случае, когда площадь сечения сердечника постоянна и площадь зазора равна площади сердечника, при этом  $\delta$  обычно состоит из двух прокладок, рассчитывается их суммарная толщина.

Следует учитывать также монтажный зазор, который дает небольшую поправку, добавляя к зазору 0,1 – 0,2мм.

### Сведение данных в расчетную номограмму.

Как показано выше, по имеющимся графикам можно быстро посчитать оптимальное количество витков, индуктивность, зазор трансформатора, но можно представить их в еще более удобном виде – в виде номограммы.

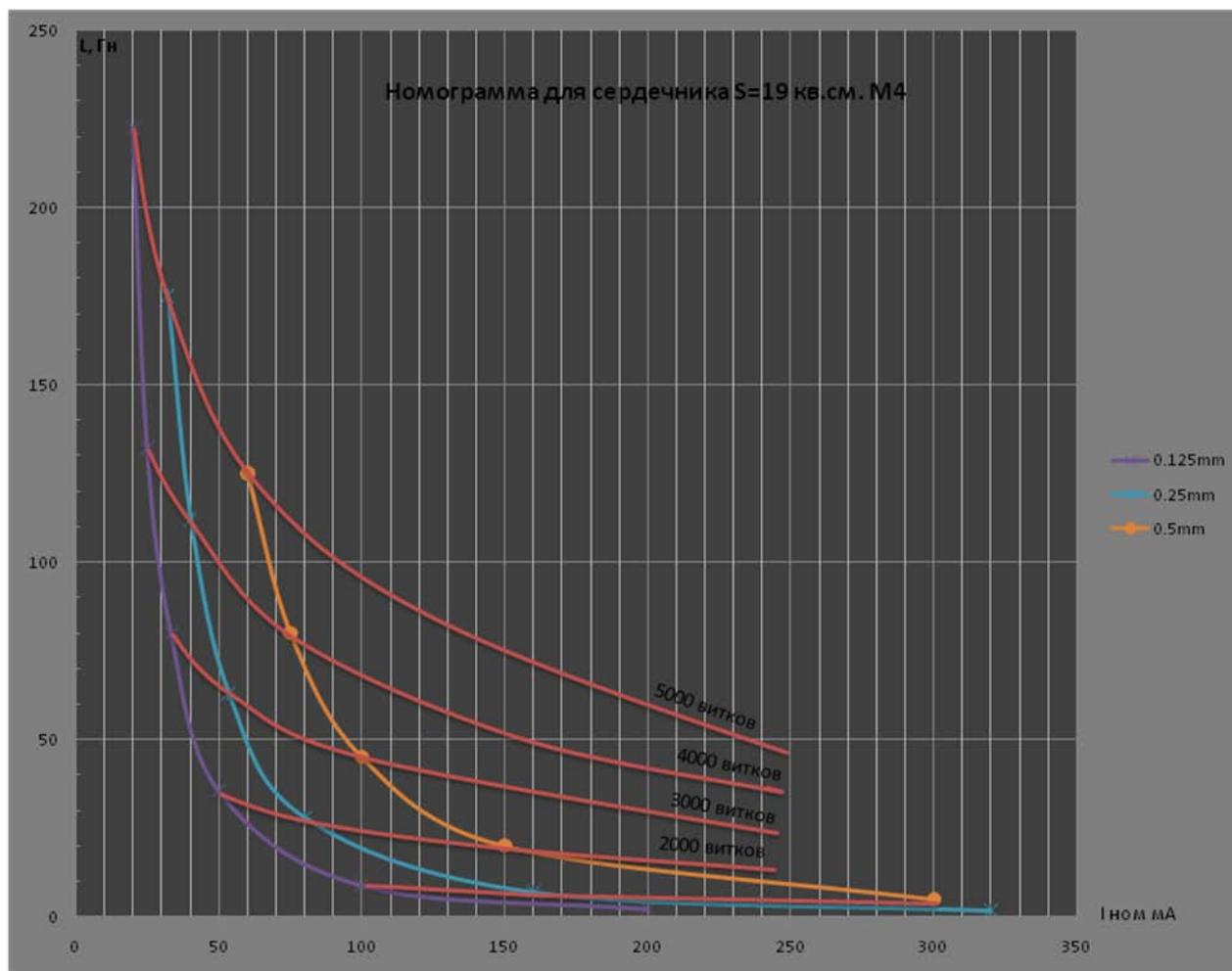
Для этого нам необходимо знать измерить всего несколько параметров сердечника – индукцию насыщения,  $I_0$  при оптимальной индукции, индуктивность при оптимальной индукции, при нескольких кратных зазорах.

Затем создаем табличку, в которую помещаем данные для индуктивности, тока, и витков.

0,125mm			0,25mm		0,5mm	
Витки	L	$I_0$	L	$I_0$	L	$I_0$
500	2,224616	200	1,75	320	1,25	600
1000	8,898464	100	7	160	5	300
2000	35,59386	50	28	80	20	150
3000	80,08617	33,33333	63	53,33333	45	100
4000	132,1066	25	112	40	80	75
5000	222,4616	20	175	32	125	60

По табличке чертим номограмму:

### Номограмма для сердечника $S=19$ кв.см. М4



Теперь мы имеем наглядное и достоверное представление для расчета любых трансформаторов на этом железе.

Допустим, нам нужен трансформатор индуктивностью 50Гн и током 80мА. Проводим горизонталь из точки на оси  $Y$  50Гн и вертикаль с током 80мА. Они пересекутся в точке на линии 3000 витков и между линиями зазора 0.25 и 0,5мм.

Значит, для получения необходимых параметров необходимо намотать 3000 витков, сделать зазор 0,4мм и использовать трансформатор при токе 80мА.

Проверим по формуле (4), получим значение 0,432мм, 0,32мм – погрешность на монтажный зазор.

Также из номограммы видно, что данное железо не стоит использовать при токах более 100мА.

Но можно намотать и 5000 витков, индуктивность получится около 110Гн, ток 80мА и зазор 0.75мм. КПД в этом случае несколько упадет – во первых, из за роста магнитных потерь на зазоре, и, во вторых, из за существенного активного сопротивления обмотки. Но, тем не менее, нижняя граничная частота будет умопомрачительной. Но это уже крайность. В таком случае лучше применить лампу 2А3, уменьшить ток до 60мА и зазор до 0,5мм. Сравните с трансформатором на железе 7,7 кв. см, который рассчитывался выше! И еще одно замечание: Любая точка, определенная по этой номограмме, обеспечит размах тока  $\pm I_0$  и режим максимальной линейности.

## Эпилог, или краткая справка.

Исходя из всего выше изложенного, можно сделать выводы о том, что необходимо знать для правильного расчета трансформатора.

### Величины.

Индукция магнитного потока

$$B = \mu_a H \quad (\text{Тл}) \text{ часто представляется в Гауссах (Гс) } 1\text{Тл}=10000\text{Гс}$$

Магнитная проницаемость  $\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$  безразмерная величина, описывающая магнитное сопротивление среды или материала

Магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$  проницаемость вакуума, воздуха, диэлектриков

Напряженность магнитного поля  $H = \frac{F}{l_{cp}}$  (А/м)

Магнитодвижущая сила  $F = N * I = H * l_{cp}$  (А), также называется магнитным напряжением.

Магнитный поток  $\Phi = B * S (B\phi)$ , также называется магнитным током.

### Формулы.

$Z=2*\pi*F*L$  (Ом) - Реактивное сопротивление индуктивности L(Гн) на частоте F(Гц).

$L = \frac{\mu * \mu_0 * N^2 * S_c}{l_c}$  (Гн) - индуктивность катушки с числом витков N, намотанной на сердечнике площадью  $S_c$  с длиной магнитной линии  $l_c$  и Относительной проницаемостью  $\mu$

$\delta = NI * \frac{\mu_0}{B_0}$  (м) толщина немагнитного зазора, который необходимо ввести в сердечник для того, чтобы напряженность магнитного поля в нем составила  $B_0$  Тл.  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

$\frac{L_0}{L_\delta} = \frac{\mu_0}{\mu_\delta} = \frac{\delta \mu_{отн}}{l_c} + 1$  Отношение индуктивностей или проницаемостей при введении зазора  $\delta$

Этого более, чем достаточно для грамотного расчета выходного трансформатора и, заметьте, ни одной эмпирической формулы!

Список литературы:

1. С. Н. Кризе «Выходные трансформаторы» Массовая Радиобиблиотека 1953г.
2. Е. Васильченко «Трансформаторы выходные и силовые» ж-л Радиолюбби NN 3,4 2001г.
3. Dr. Tot Hodhson “Single- Ended Amplifiers, Feed back and Horn: some history” ж-л Sound Practicas, 1994г.
4. Д. Андронников «Выходной трансформатор – почти просто, но не дешево»
5. Е. Васильченко «Измерение параметров магнитопроводов резонансным методом» Издательство Солон-Пресс. 2003г.
6. Бессонов Л.А. «Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле.» 2003г.

**Благодарности:** Александру Воробьеву за споры и обсуждения, Евгению Васильченко за популяризацию системы измерения параметров сердечника.

**Особая благодарность** Марку Фельдшеру за неоценимо информативные измерения сердечников и помощь в работе над проверкой сходимости теоретических выкладок и расчетов с практикой.

Евгений Комиссаров, Москва, февраль 2010г.

# Методика оптимизации SE трансформатора по результатам измерения сердечника.

## Часть 2

### Автоматизированный расчет.

С помощью программы Microsoft Excel можно автоматизировать процесс расчета и построения номограммы.

Исходными данными являются:

$S_c$  (кв.см) – площадь поперечного сечения сердечника

$l_c$  (см) – средняя длина магнитной линии сердечника

$B_{max}$  (Тл) – максимальная рабочая индукция материала сердечника по результатам испытаний или данным производителя

$B_{ном}$  (Тл) – номинальная рабочая индукция, соответствующая середине линейного участка (рабочая точка)

$\mu_{и ном}$  – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода, при номинальной индукции по результатам измерений или данным производителя (кривой намагничивания)

$L_{ном}$  – индуктивность испытательной обмотки

$N_{исп}$  – количество витков испытательной обмотки.

Внесем данные в выделенные желтым цветом ячейки A3-G3

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>Строка вводных данных - измерения сердечника без зазора</b>							
2	$S_c$ кв.см	$l_c$ см	$B_{max}$ Тл	$B_{ном}$ Тл	$\mu_{и ном}$	$L_{ном}$ Гн	$N_{исп}$	$L_{расч}$
3	3,9	12,77	1,5	0,8	12000	0,46	100	0,460304

В ячейке H3 посчитаем индуктивность испытательной обмотки по формуле из первой части статьи и сравним с измеренной величиной, удостоверимся в совпадении.

При работе с однотипными сердечниками, отличающихся только сечением, достаточно испытать один типоразмер, и использовать данные о проницаемости, максимальной и номинальной индукции для расчета трансформаторов другого сечения. Для этого достаточно поменять данные о сечении и средней длине магнитной линии и занести расчетное значение из ячейки H3 в ячейку F3.

В следующих ячейках приступаем к расчету.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
4			1	2	3	4	5	6	7						
5			0,01	0,02	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	Зазоры для расчета можно задавать самостоятельно					
6		L0/L	1,939702	2,879405	5,698512	10,39702	15,09554	19,79405	24,49256						
7		Мином ра	6186,516	4167,528	2105,813	1154,176	794,937	606,2428	489,9447	Проверьте соответствие расчета графикам испытаний					
8		Nлопт	6,349206	12,69841	33,33333	66,66667	100	126,9841	166,6667						

Зададим в ячейках C5-I5 значения зазоров, для которых будем строить номограмму.

В следующей строке (ячейки C6-I6) рассчитаем по формуле (7) коэффициент снижения проницаемости для заданных зазоров.

Ниже для каждого зазора рассчитаем проницаемость сердечника с зазором, зная проницаемость  $\mu_0$  и коэффициент, рассчитанный выше.

В следующей строке (ячейки C8-I8) по формуле (6), зная величину зазора и требуемую рабочую индукцию  $B_{ном}$ , вычислим  $NI$  для каждого зазора.

Затем построим таблицу точек номограммы.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
9	Витки	$l_0$	L	$l_0$	L	$l_0$	L	$l_0$	L	$l_0$
10			1	1	3	3	5	5	7	7
11	1000	46	23,71498	0,006349	8,072283	0,033333	3,047258	0,1	1,878121	0,166667
12	2000	184	94,85991	0,003175	32,28913	0,016667	12,18903	0,05	7,512485	0,083333
13	3000	414	213,4348	0,002116	72,65054	0,011111	27,42533	0,033333	16,90309	0,055556
14	4000	736	379,4396	0,001587	129,1565	0,008333	48,75613	0,025	30,04994	0,041667
15	5000	1150	592,8744	0,00127	201,8071	0,006667	76,18146	0,02	46,95303	0,033333
16			2	2	4	4	6	6		
17	1000	46	15,97552	0,012698	4,424343	0,066667	2,323931	0,126984		
18	2000	184	63,90209	0,006349	17,69737	0,033333	9,295723	0,063492		
19	3000	414	143,7797	0,004233	39,81909	0,022222	20,91538	0,042328		
20	4000	736	255,6084	0,003175	70,78949	0,016667	37,18289	0,031746		
21	5000	1150	399,3881	0,00254	110,6086	0,013333	58,09827	0,025397		

Для построения зададимся предполагаемым количеством витков от 1000 до 5000, занесем в ячейки A11-A15

Затем в ячейках B11-B15 рассчитаем индуктивность обмоток на сердечнике без зазора по формуле  $L=(N/N_{исп})^2 \cdot L_{ном}$ , взяв данные из соответствующих ячеек.

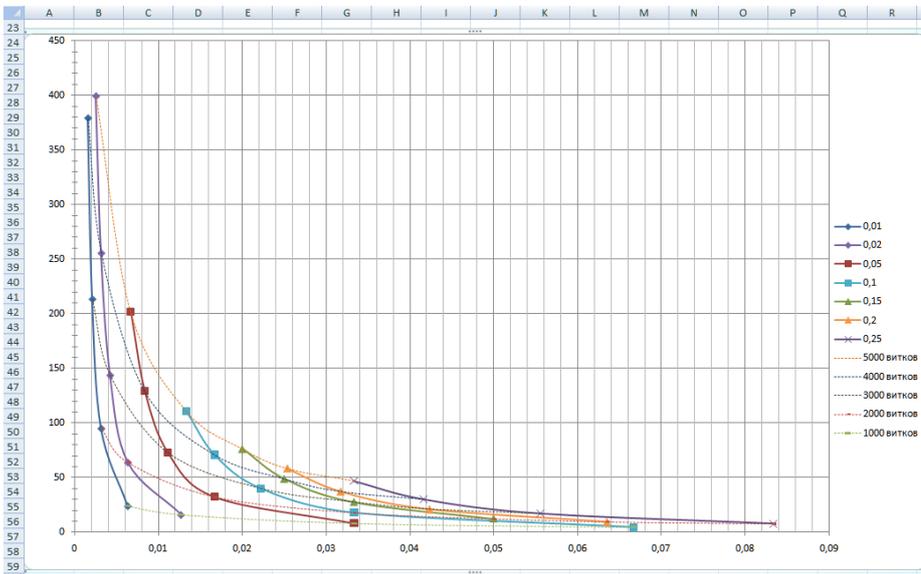
В ячейках C11-C15, используя рассчитанный в ячейке C6 коэффициент, определим индуктивность обмоток с количеством витков от 1000 до 5000 на сердечнике с зазором, заданным в ячейке C5, а в ячейках D11-D15 определим ток в обмотке, при котором в сердечнике достигается индукция  $B_{ном}$ . Для этого поделим значение  $NI_{опт}$  из ячейки C8 на количество витков из ячеек A11-A15.

Такой же расчет произведем для остальных шести зазоров.

На основании этих данных построим номограмму.

На оси абсцисс отложим рабочий ток, по оси ординат – индуктивность.

Пользуясь значениями из ячеек C11-C15 и D11-D15, сплошной линией начертим кривую для первого зазора, и повторим эту операцию для остальных шести случаев, затем соединим точки одинакового количества витков пунктирными линиями.



Номограмма готова!

По ней можно полностью проанализировать поведение сердечника, рассчитать количество витков и зазор для необходимой индуктивности и рабочего тока.

Произведем проверочный расчет.

Предположим, что мы намотали на сердечнике, описанном выше ( $S=4$  кв.см,  $l_c=13$ см,  $\mu=12000$ ) обмотку 2000 витков, ток холостого хода составляет 0,01А, зазор в сердечнике 0,03мм.

Рассчитаем индукцию, создаваемую постоянным током.

Для этого воспользуемся формулой

$$\Phi = \frac{F}{R_m + R_\delta} = \frac{Iw}{\frac{l_c}{\mu * S} + \frac{\delta}{\mu_0 * S}} = \frac{0,01 \times 2000}{\frac{0,13}{12000 \times 4\pi 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}} + \frac{3 \times 10^{-5}}{4\pi 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}}} = 2,46 \times 10^{-4} \text{ Вб}$$

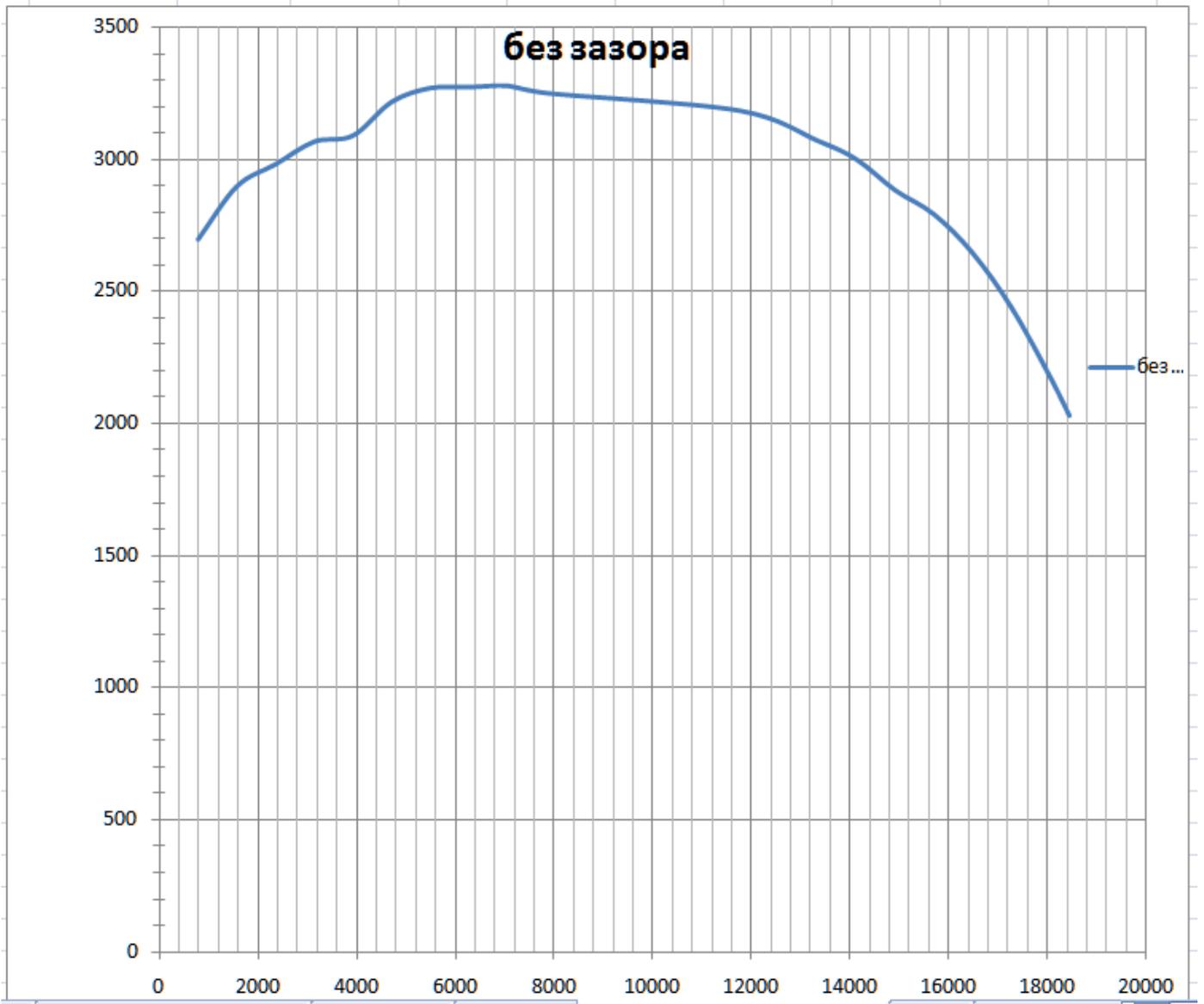
$$\text{Вычислим индукцию } B = \Phi / S = \frac{2,46 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-4}} = 0,615 \text{ Тл.}$$

Легко заметить что при столь малых зазорах влияние магнитного сопротивления материала магнитопровода все еще достаточно велико –  $R_m=21666$ , а  $R_\delta=59683$ , поэтому значение индукции получилось несколько ниже заданного (0,8Тл). При увеличении зазора отклонение от расчетной величины снизится. К тому же следует учитывать, что измеренная проницаемость ниже реальной из-за наличия некоторого технологического зазора.

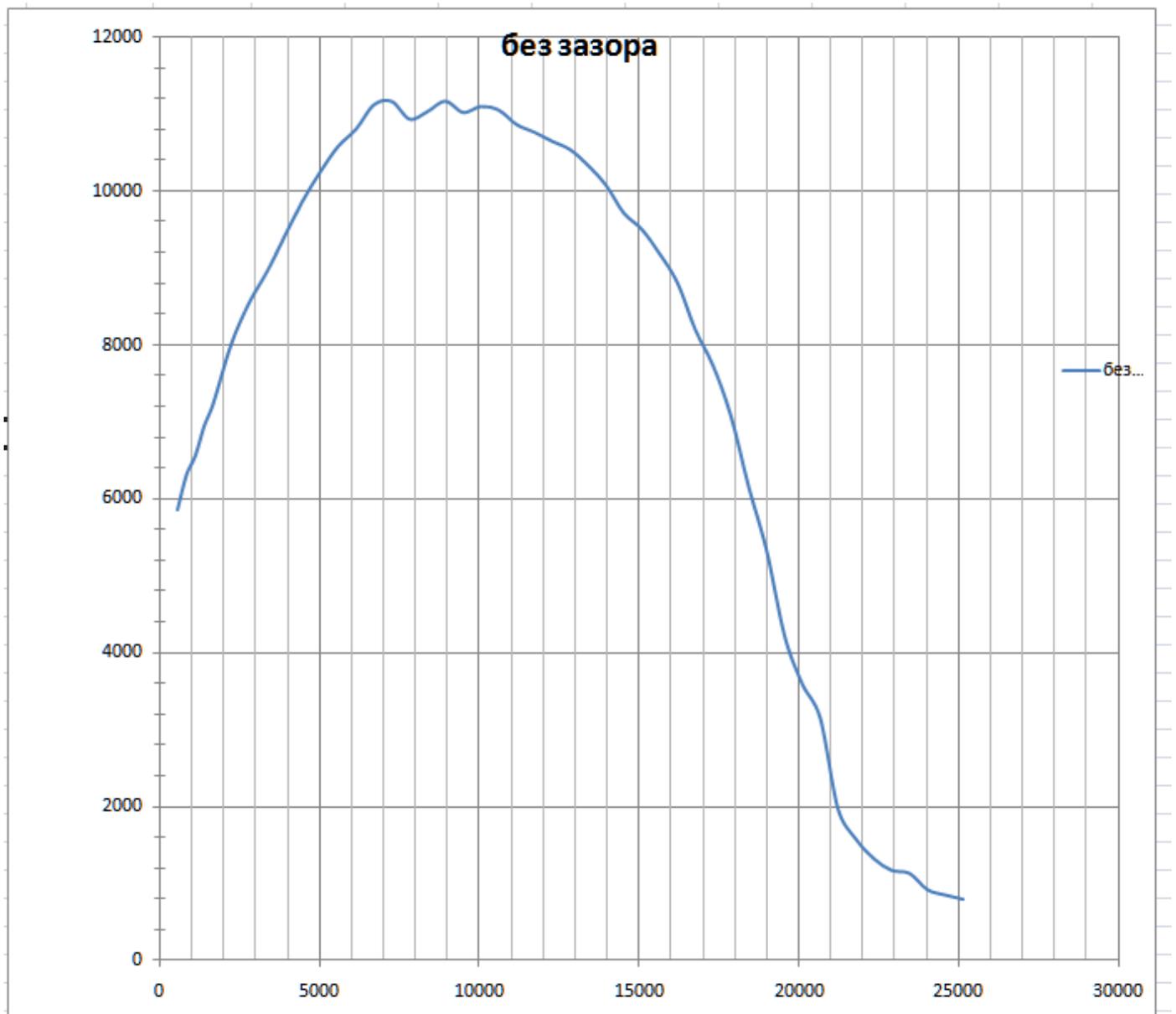
## Приложение 1

### Примеры результатов испытаний сердечников разного типа.

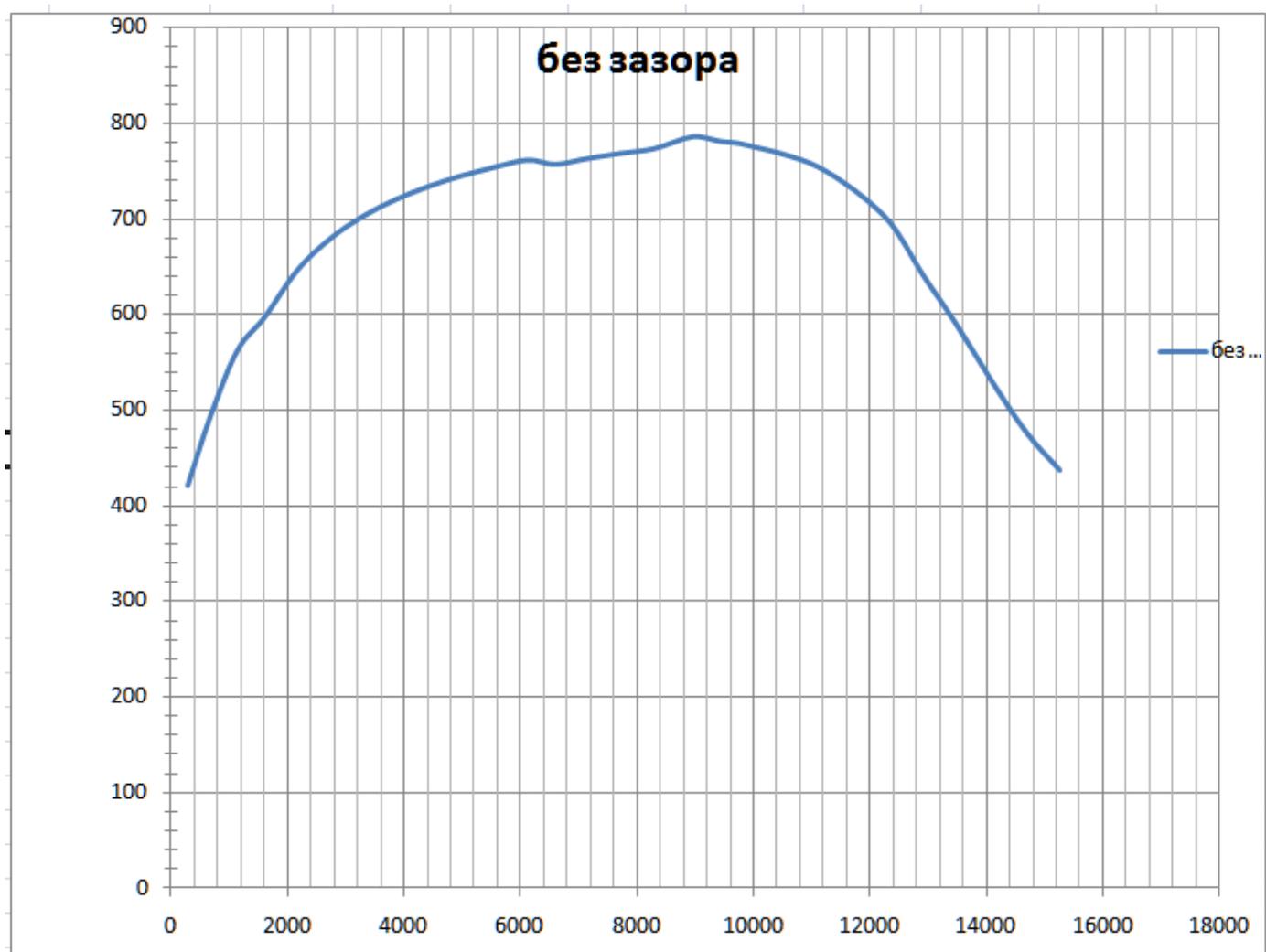
1. ОСМ 19кв.см.  $V_{max}=16000$ Гс,  $V_{ном}=8000$ Гс  $M_{ином}=3250$



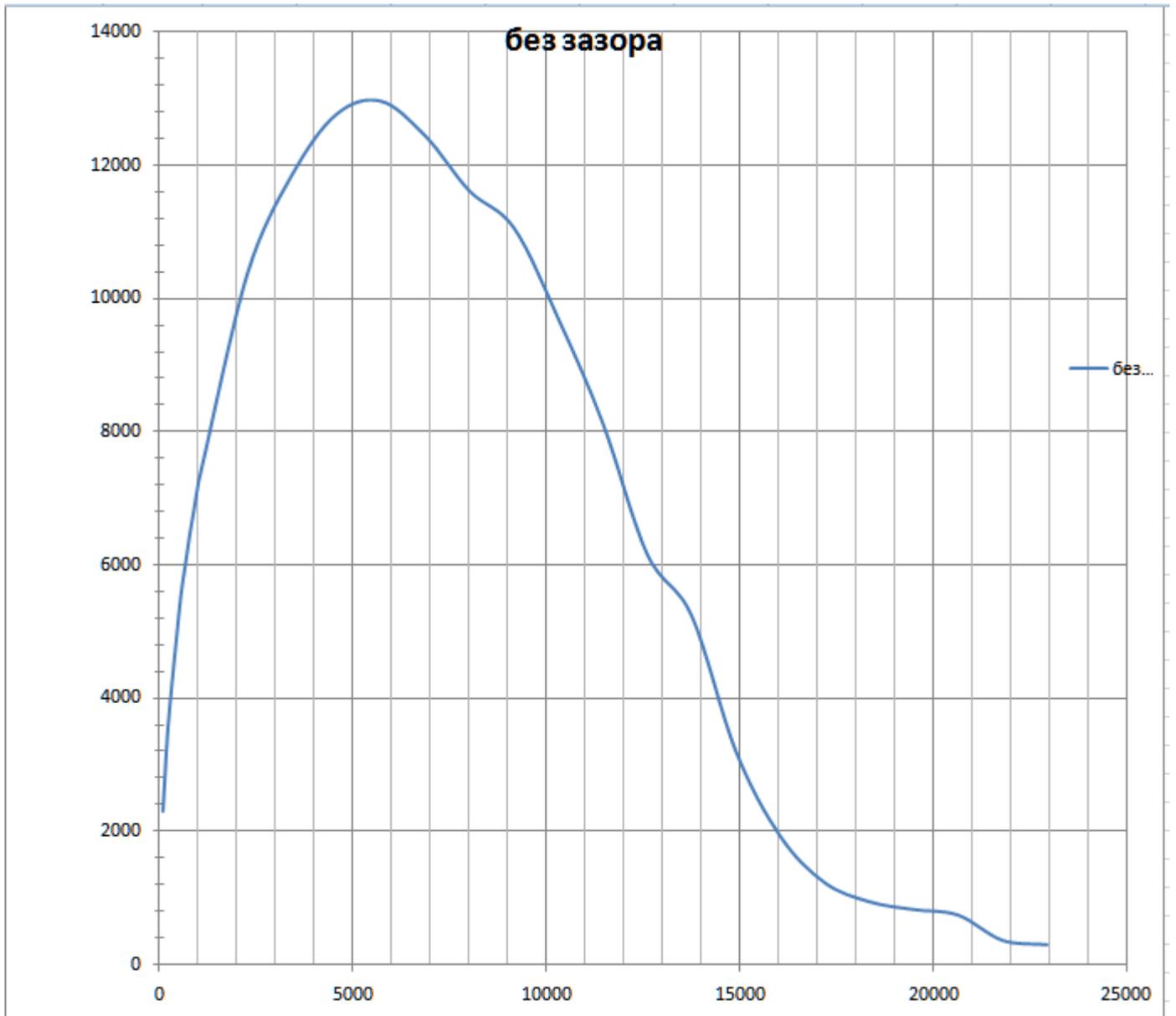
2. Железо М4 Нi-B 16 кв.см.  $V_{max}=18000$ Гс,  $V_{ном}=9000$ Гс  $M_{ином}=11000$



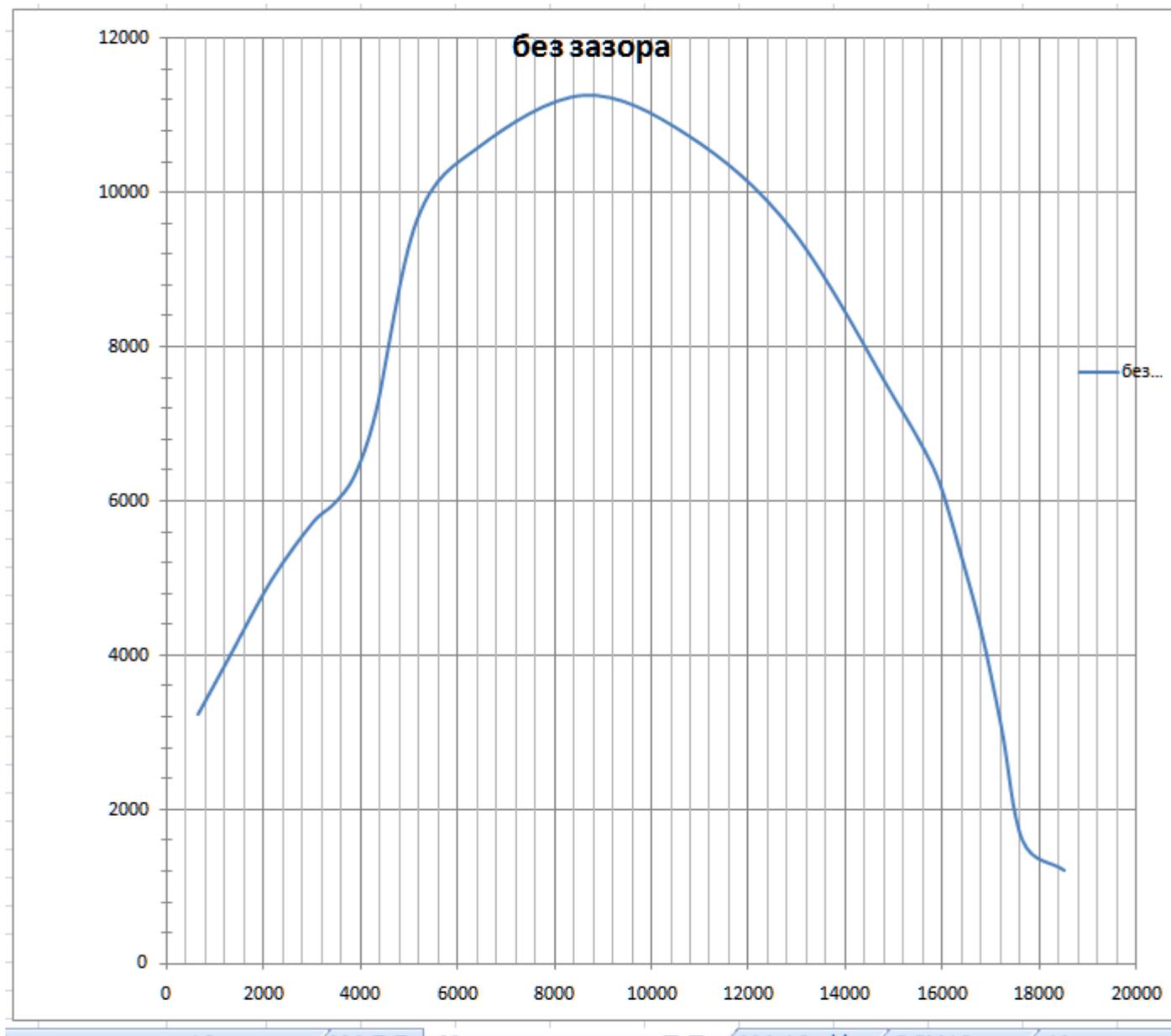
3. Железо SABA выходной трансформатор из старого радиоприемника, 5кв.см.  
 $V_{max}=15000\text{Гс}$ ,  $V_{ном}=7500\text{Гс}$   $M_{ном}=780$



4. Пермаллой 4 кв.см (данные этого сердечника применены в примере построения номограммы)  
 $B_{max}=15000$ Гс,  $B_{ном}=7500$ Гс  $\mu_{ном}=12000$



5. Железо М4 Ni-B 7,7 кв.см.  $V_{max}=18000$ Гс,  $V_{ном}=9000$ Гс  $M_{ном}=11000$ . Обратите внимание на совпадение данных с сердечником 16кв.см.



Следует заметить, что большой разброс максимальной проницаемости для разных сердечников в большей степени связан с качеством обработки и сборки, т.е. от наличия так называемого технологического зазора. Особенно он заметен на Ш – образных сердечниках, которые при небольших токах можно использовать без прокладок.

В расчетную таблицу следует вносить взятые с графиков значения проницаемости, тогда технологический зазор будет автоматически учтен.

Благодарю за помощь в наборе статистики Марка Фельдшера (Израиль), Дмитрия Андреева (Москва), Валерия Волкова (Москва).