

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Деринг Екатерина Даниловна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование импульсного трансформатора и измерение тока
насыщения**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19309

Научный руководитель:

Крылов А. А.

Оценка научного руководителя

«_____» декабря 2020 г.

Преподаватель практикума

ассистент, Краснопевцев С. Е.

Оценка преподавателя практикума

"отлично"

«_____» декабря 2020 г.

Куратор практикума:

к. т. н., Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

«_____» декабря 2020 г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы является изучение процессов, происходящих в импульсном трансформаторе, а также опытная проверка основных характеристик конкретного устройства, данных производителем, на их соответствие реальным показателям.

В частности, помимо измерения сопротивления обмоток, индуктивностей рассеяния и намагничивания LRC-метром, в ходе работы была разработана и собрана схема, позволяющая определить ток насыщения трансформатора.

Ключевые слова: импульсный трансформатор, ток насыщения, индуктивность, ферромагнетик.

Оглавление

Введение	3
Понятие индуктивности и ее связь с магнитной проницаемостью	4
Влияние ферромагнитного сердечника на работу импульсного трансформатора.....	4
Измерение тока насыщения.....	7
Измерение индуктивностей рассеяния и намагничивания	8
Сравнение экспериментально полученных значений с параметрами, указанными производителем.....	11
Заключение	12
Список литературы	12

Введение

Трансформатор – это устройство, предназначенное для преобразования сигнала (увеличения, уменьшения, или гальванической развязки цепи), без изменения его частоты. Импульсный трансформатор используется для работы с короткими повторяющимися сигналами, так как благодаря своей конструкции минимально искажает их форму.

В первом приближении в качестве эквивалентной схемы такого трансформатора можно использовать две катушки, объединенные единым сердечником, через одну из которых протекает ток. В данной работе мы будем использовать следующее приближение (см. рис. 1), в котором учитывается сопротивление катушек, индуктивность намагничивания и индуктивность рассеивания (она возникает в силу того, что часть магнитного поля, создаваемого в первой катушке, не попадает во вторичную обмотку, а выходит наружу, рассеивается), поскольку эти параметры необходимо измерить в ходе работы. Межвитковая емкость нами не учитывается, поскольку в обмотках рассматриваемого трансформатора мало витков, и расположены они редко.

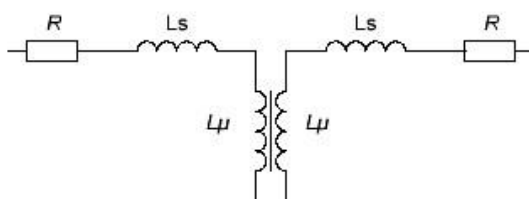


Рис 1. Эквивалентная схема трансформатора. Здесь L_{μ} - индуктивность намагничивания, L_s – индуктивность рассеивания, R - сопротивление обмоток.

Целью является изучение процессов, происходящих в импульсном трансформаторе, а также опытная проверка основных характеристик конкретного устройства, данных производителем, на их соответствие реальным показателям.

Понятие индуктивности и ее связь с магнитной проницаемостью

Для неферромагнитных веществ, справедливо, что поток магнитного поля Φ через некоторый контур площади S прямо пропорционален току I . В СГС:

$$\Phi = \frac{1}{c} LI \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью и зависит только от свойств самого витка.

Найдем, чему будет равна индуктивность катушки из N витков, длиной l . Индукция B магнитного поля будет выражаться по следующей формуле:

$$B = \frac{4\pi}{c} \frac{IN\mu}{l}$$

Здесь μ – магнитная проницаемость вещества, находящегося в соленоиде, связывающая индукцию и напряженность магнитного поля. Поскольку магнитный поток равен BS , то:

$$\Phi = \frac{4\pi}{c} \frac{IN^2S\mu}{l}$$

Отсюда по формуле 1 получается, что

$$L = \frac{4\pi\mu N^2S}{l} \quad (2)$$

Таким образом, индуктивность катушки прямо пропорциональна магнитной проницаемости вещества.

Влияние ферромагнитного сердечника на работу импульсного трансформатора

Ферромагнетики — это вещества, способные благодаря своей структуре, быть намагниченными даже при отсутствии внешнего магнитного поля. Они состоят из доменов – самопроизвольно намагниченных частей небольшого размера, внутри которых спиновые магнитные моменты отдельных частиц направлены в одну сторону, из-за чего магнитный момент всего домена не нулевой. В отсутствие внешнего магнитного поля, суммарное поле, создаваемое доменами равно нулю из-за того, что их магнитные моменты направлены по-разному.

Чтобы понять, как ферромагнетик ведет себя в магнитном поле, рассмотрим катушку с током. Поле в ней однородно и в отсутствие среды равно (СГС) $\mathbf{B}_k = \mathbf{H}_k = \frac{2NI}{cr} \mathbf{e}_z$, где N – число витков с током. Если в соленоид поместить ферромагнетик, то поле \mathbf{H} в нем будет также равно $\frac{2NI}{cr} \mathbf{e}_z$, поскольку из уравнений Максвелла следует, что тангенциальная компонента напряженности магнитного поля непрерывна на границе, когда по ней не течет ток. Поэтому, при изменении тока в катушке, меняется поле \mathbf{H} .

В ферромагнетике между напряженностью и магнитной индукцией также существует связь $\mathbf{B} = \mu * \mathbf{H}$, однако μ здесь не является константой из-за его доменной структуры. Действительно, когда ферромагнетик помещают в однородное магнитное поле, домены в нем меняют направление магнитного момента, стремясь ориентироваться по полю, из-за чего \mathbf{B} растет. Увеличивая ток в катушке, мы увеличиваем число ориентированных по полю доменов. Исходя из этого, начиная с какого-то момента все домены будут одинаково ориентированы.

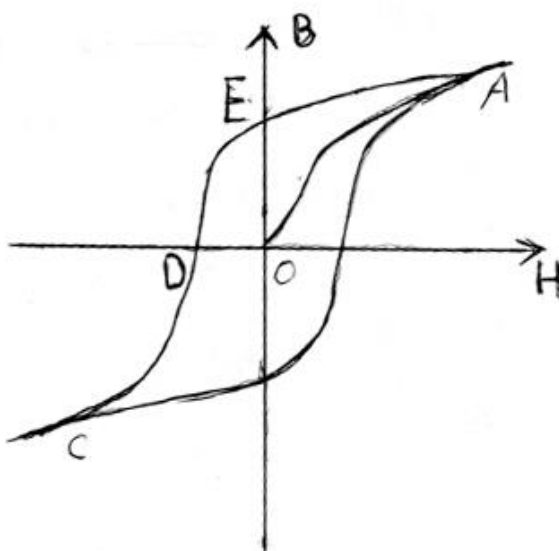


Рис. 2. Зависимость B от H в ферромагнетике

Зависимость $B(H)$ в ферромагнетике называется магнитным гистерезисом, ее график показан на рисунке 2, кривая $AEDC$ называется предельной петлей

гистерезиса. Когда мы от нуля меняем ток через катушку (т.е. увеличиваем \mathbf{H}), поле \mathbf{B} внутри него будет меняться по кривой OA (кривой намагничивания), пока не дойдет до максимального своего значения (все домены в этот момент одинаково ориентированы). Значение тока, при котором поле \mathbf{B} , накопленное в ферромагнетике, перестает меняться, при увеличении \mathbf{H} , называют током насыщения. При уменьшении тока, \mathbf{B} будет меняться по кривой AD , и уже не будет нулевым в отсутствие тока, поскольку отсутствие внешнего поля уже никак не влияет на ориентацию доменов в ферромагнетике.

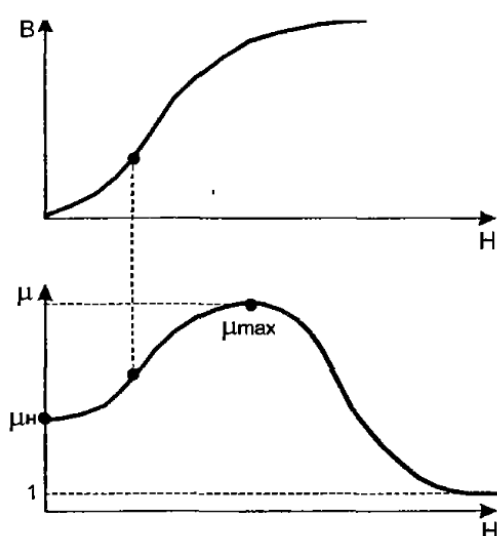


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости от магнитной индукции

На рисунке 3 показано, как будет меняться магнитная проницаемость. В момент насыщения она достигает своего максимального значения, а при превышении тока насыщения, уменьшается обратно пропорционально H .

Рассмотрим, как это влияет на работу трансформатора. До достижения тока насыщения, основная часть магнитного поля была сосредоточена внутри ферромагнитного сердечника, так как μ в нем было много больше, чем в воздухе, и лишь малая часть рассеивалась, из-за того, что реальный прибор не идеален. Когда мы сильно превышаем ток насыщения, $\mu \rightarrow 1$, ферромагнетик теряет свои магнитные свойства. Большое поле \mathbf{H} будет проходить через обмотки не по сердечнику, а вне него по воздуху. Поскольку μ падает, то из формулы 2 следует,

что индуктивность уменьшается. Известно, что энергия магнитного поля выражается по формуле:

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

Опираясь на закон сохранения энергии, можно сказать, что уменьшение индуктивности приведет к тому, что ток в обмотках резко возрастет. Это может привести к перегоранию обмоток и выводу трансформатора из строя.

Измерение тока насыщения

Для измерения тока насыщения была собрана следующая схема (рис. 4).

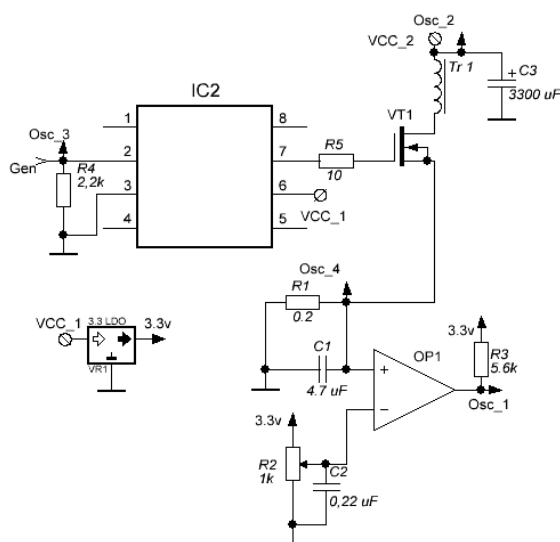


Рис. 4. Схема установки

На вход Gen с генератора подавался прямоугольный сигнал с большой скважностью (отношением длины импульса, к интервалу между ними). В качестве VCC_1 обозначено питающее напряжение величиной 15 В, VCC_2 – силовое питание 30В. Сигнал, пройдя через драйвер, управляет транзистором VT1. Через трансформатор протекает импульсный ток, который отслеживается осциллографом на резисторном шунте R1.

Оценим длительность импульса, который нужно подать, чтобы привести ферромагнетик в насыщение. Связь между током и напряжением в трансформаторе выражается следующей формулой:

$$U = L \frac{dI}{dt}$$

Проинтегрировав правую и левую части (при $t = 0$ считаем $I = 0$), получим, что

$$U * t = I * L$$

Отсюда, полагая $U = 30\text{В}$, $L = 11,2 \text{ мкГн}$ (значение из документации), получим следующую зависимость тока от времени:

$$I = 2,68t * 10^6 \text{ А}$$

Указанный производителем ток насыщения 11 А , следовательно длительность импульса равна 4 мкс .

На осциллограмме наблюдается картина, показанная на рисунке 5. Здесь желтый управляющий сигнал приходит с генератора, зеленый сигнал показывает ток через трансформатор, синий – напряжение на конденсаторе С3, красный – напряжение на выходе с компаратора. Точка перегиба на графике сигнала СН4 соответствует значению тока насыщения, поскольку он начинает резко возрастать при переходе через нее.



Рис. 5. Осциллограмма, полученная в ходе измерения.

Измерение индуктивностей рассеивания и намагничивания

Для того, чтобы измерить данные параметры, использовался LRC – метр. Этот прибор подает на устройство ток определенной частоты, после чего измеряет падение напряжения на нем. По закону Ома рассчитывается импеданс, имеющий комплексную (при измерении емкости или индуктивности, поскольку $X_L = j\omega L$ и $X_C = \frac{1}{j\omega C}$) и вещественную части. В случае, если комплексная часть отрицательна, в элементе преобладает емкостное сопротивление, иначе – индуктивное, исходя из этих значений рассчитываются соответственно сами С и L. Вещественная же часть представляет собой реальное сопротивление R.

Измерения проводились следующим образом: два щупа LRC- метра подключались к разным концам провода в трансформаторе, после чего, менялась частота сигнала от 100 до 100000 Гц.

Принципиальная схема исследуемого устройства показана ниже. Первичные обмотки – 1-3 и 2-4, вторичные – 11-12 и 7-8. Обмотки сделаны из литцендрата (многожильного провода, в котором каждая жила покрыта изолирующим лаковым покрытием) для того, чтобы минимизировать влияние скин-эффекта при работе на больших частотах (в таком случае ток течет по поверхности каждой из множества жил, что увеличивает площадь скин-слоя). Диаметр жил равен 0,1 мм, их число в первичных обмотках – 10, во вторичных – 35.

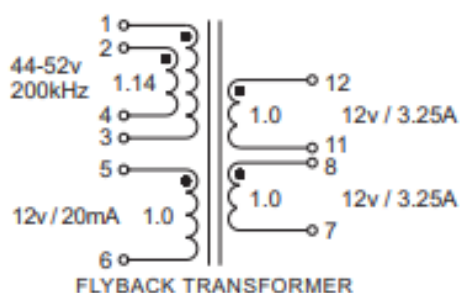


Рис 6. Принципиальная схема трансформатора PA2548NL.

На рисунке 7 и 8 показаны результаты измерения индуктивности намагничивания и сопротивления для первичной и вторичной обмоток. Исследуемый трансформатор рассчитан на работу при высоких частотах, поэтому значения индуктивностей, стоит сравнивать с данными, полученными при $\nu > 200$ кГц (это значение указано производителем). Для сопротивления

стоит рассматривать значения, полученные на низких частотах, поскольку из формы графиков видно, что на высоких появляются общие искажающие факторы, например паразитные емкости и индуктивности между обмотками.

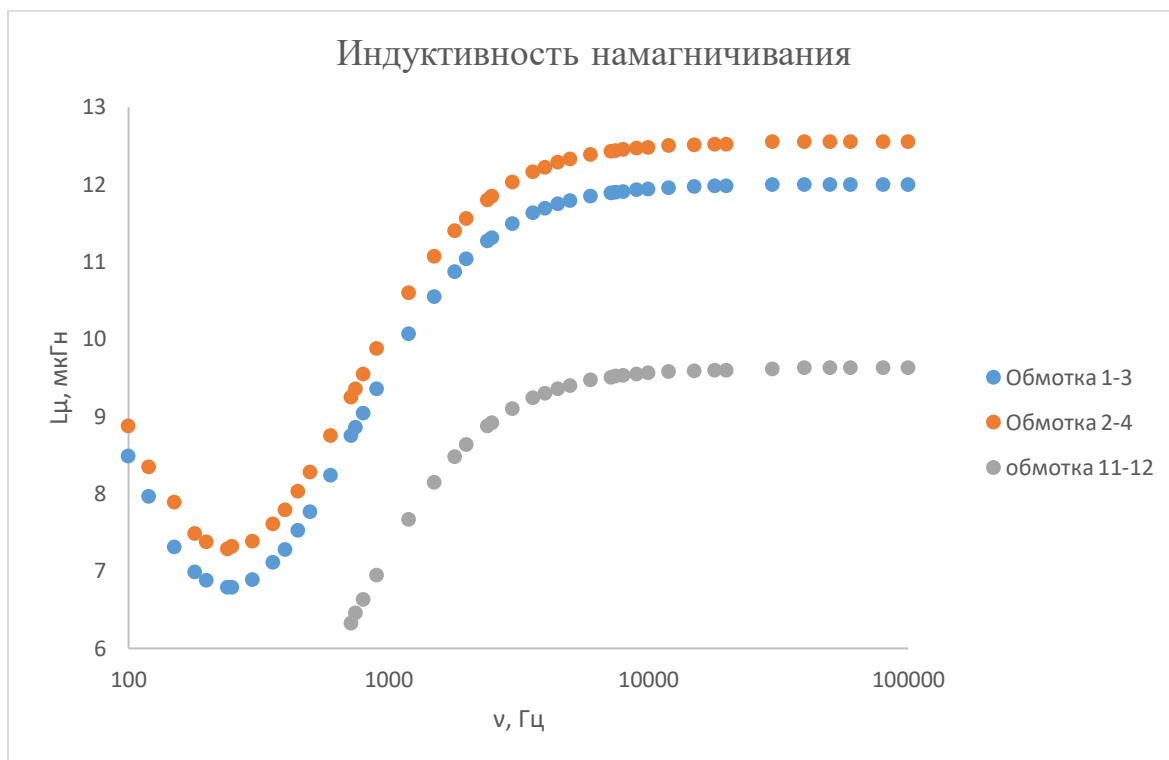


Рис. 7. Значения индуктивности намагничивания, полученные в ходе эксперимента

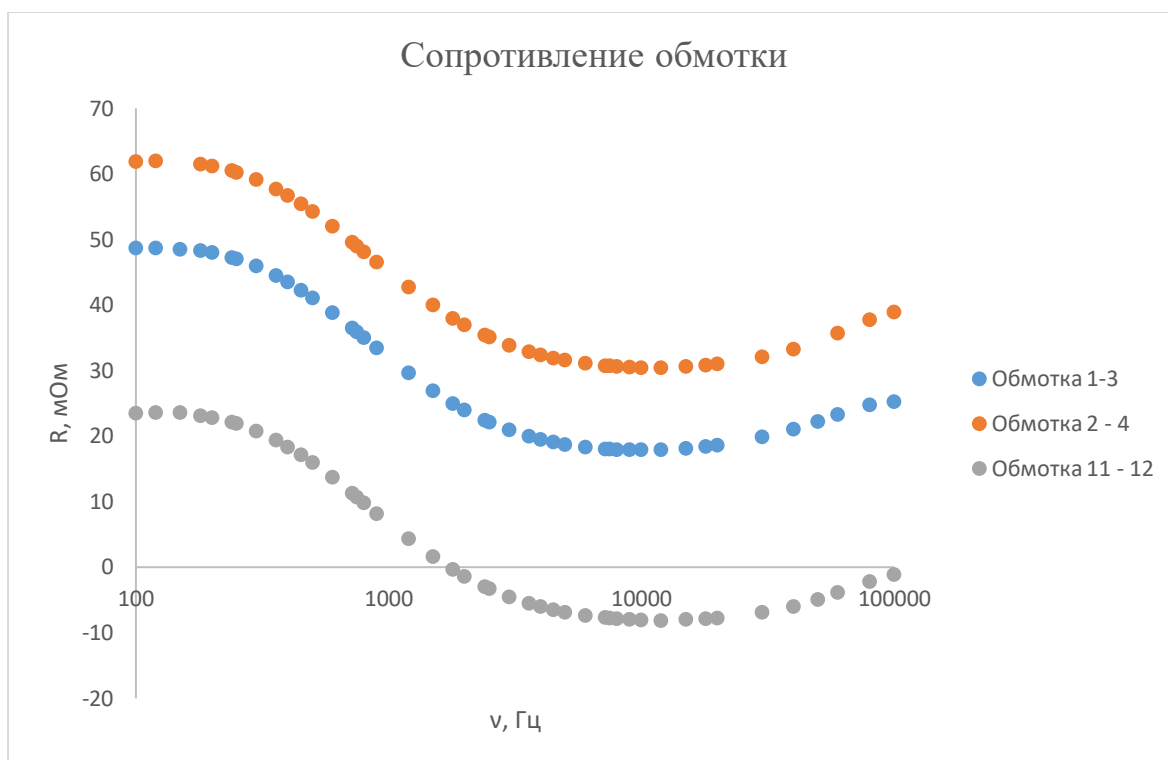


Рис. 8. Значения сопротивления, полученные в ходе эксперимента

Индуктивность рассеяния измеряется при закороченных выводах 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, щупы соединяют выводы 1 и 3 или 2 и 4. Когда вторичная обмотка накоротко замкнута, на ней отсутствует напряжение. Из-за того, что напряжение на первичной обмотке и вторичной связаны не нулевым коэффициентом трансформации, следует, что напряжение на первичной обмотке так же будет нулевым. Следовательно, при измерении LRC-метром, будет проявляться только индуктивность рассеяния (см рис. 1).

На рисунке 9 показаны значения, полученные в эксперименте.



Рис. 9. Полученные значения индуктивности рассеяния

Сравнение экспериментально полученных значений с параметрами, указанными производителем

В документации к импульсному трансформатору PA2548NL производитель указал следующие значения измеренных параметров: L_m для первичных обмоток равно $11,2 \text{ мкГн} \pm 10\%$, R для них – 18 мОм, а для вторичной обмотки – 21 мОм, ток насыщения - 11 А.

Из эксперимента было получено, что индуктивность намагничивания для обмотки 1-3 равно 12 мкГн, для 2-4 - 12,55 мкГн. Для вторичной обмотки это значение равно 9 мкГн. Измеренное сопротивление первичных обмоток равно 27 мОм (считаем, что они соединены параллельно), для вторичной обмотки – 23 мОм. Эти данные примерно соответствуют заявленным производителем. Значение тока насыщения, полученное в эксперименте – 16 А, что в 1,5 раза превышает значение, заявленное производителем.

Заключение

В ходе работы было изучено устройство импульсного трансформатора, рассмотрены процессы, происходящие внутри него, а также измерены параметры трансформатора PA2548NL.

При помощи собранной мною схемы, были получены данные, исходя из которых, можно сказать, что на данный трансформатор можно подавать ток, превышающий ток насыщения 11А, указанный производителем, на 50%.

Список литературы

- Сивухин Д. В. Общий курс физики, том III, электричество М.: Наука, 1977. – 281 с.
- Семенов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов М.: Солон – Р, 2001. – 16 с.