

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучение устройства и принципа действия однофазного трансформатора; определение параметров схем замещения трансформатора; Изучение влияния характера нагрузки на выходное напряжение трансформатора.

Краткие сведения из теории

Возможность трансформации – одна из главных причин повсеместного распространения переменного тока в современной технике. Термин «трансформатор» дословно переводится как «преобразователь». Преобразование происходит за счёт разного числа витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток, коэффициент трансформации

$$k = \frac{w_1}{w_2}.$$

Через повышающие трансформаторы электрическая энергия от генераторов подается в высоковольтную линию электропередачи. У повышающего трансформатора во вторичной обмотке витков больше, чем в первичной, $k < 1$. На месте потребления устанавливаются понижающие трансформаторы, обеспечивающие безопасное и удобное использование электроэнергии. У понижающего трансформатора во вторичной обмотке витков меньше, чем в первичной, $k > 1$.

Электрическая энергия передаётся через трансформатор посредством пульсаций магнитного поля, изменяющегося по синусоидальному закону. Применение ферромагнитного сердечника позволяет усилить индукцию поля в сотни и тысячи раз. Пластины сердечников штампуют из листов низкоуглеродистых сталей с добавками до 5 % Si, получивших название кремнистых электротехнических сталей. Кремний увеличивает удельное сопротивление, что снижает вихревые токи, однако делает сталь хрупкой.

Свойства электротехнической стали значительно улучшаются при текстурировании – холодной прокатке и последующем отжиге. Для эффективного использования текстурированных сталей применяют ленточные конструкции сердечников (рисунок 1), когда магнитный поток целиком проходит вдоль направления легкого намагничивания, что позволяет уменьшить массу и габариты силовых трансформаторов на 25 %, а радиотрансформаторов – на 40 %.

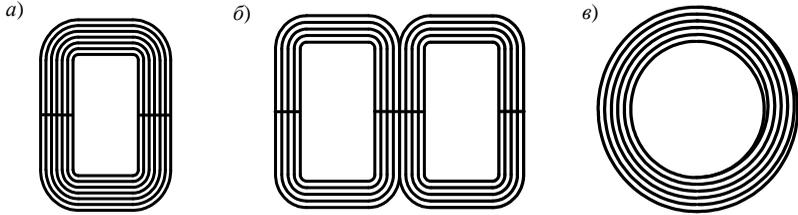


Рисунок 1 – Типы ленточных сердечников трансформаторов:
a – стержневой; *б* – броневой; *в* – тороидальный

Рассмотрим электромагнитные процессы преобразования и передачи энергии в двухобмоточном понижающем трансформаторе (рисунок 2). При подключении первичной обмотки w_1 сопротивлением r_1 к питающей сети переменного тока промышленной частоты напряжением u_1 по ней протекает ток холостого хода i_0 . Магнитодвижущая сила $w_1 i_0$, положительное направление которой на рисунке 2, по правилу буравчика, вверх, создаёт переменное магнитное поле.

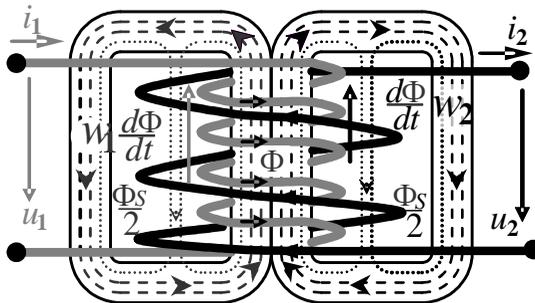


Рисунок 2 – Электромагнитные процессы преобразования и передачи энергии в трансформаторе

Основная часть силовых линий магнитного поля проходит по магнитопроводу, охватывая витки как первичной, так и вторичной обмоток, и образуя магнитный поток связи Φ . Небольшая часть силовых линий магнитного поля, частично или полностью, проходит по воздуху и немагнитным материалам проводов, образуя магнитный поток рассеяния Φ_s , который в сотни раз меньше потока связи (его силовые линии показаны пунктиром).

На рисунке 3 представлены схемы замещения первичной и вторичной обмоток трансформатора.

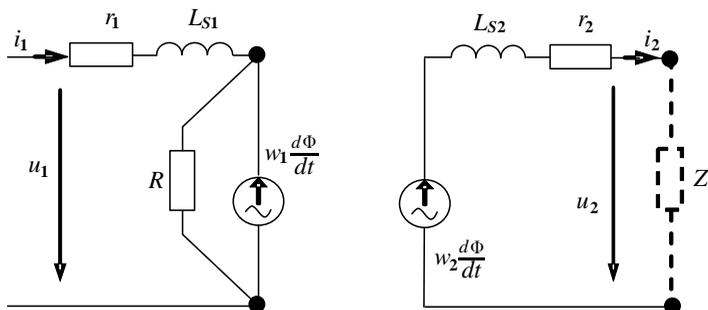


Рисунок 3 – Схемы замещения обмоток трансформатора

Для учёта магнитного потока рассеяния первичной обмотки в схеме замещения предусматривают индуктивность рассеяния L_{S1} .

Пульсации магнитного потока связи Φ индуцируют в витках первичной обмотки электродвижущую силу самоиндукции $e_1 = -w_1 d\Phi / dt$. Знак « \leftarrow » показывает, что, когда магнитный поток нарастает ($d\Phi / dt > 0$), ЭДС самоиндукции направлена навстречу создающему его току и препятствует этому нарастанию, запасая энергию в магнитном поле сердечника. Это учтено в направлении стрелки на схеме замещения. Во вторичной обмотке индуцируется ЭДС $e_2 = -w_2 d\Phi / dt$ такого же направления, как и в первичной, знак « \leftarrow » показывает, что в рассматриваемый момент она направлена от конца обмотки к началу. У вторичной обмотки также есть индуктивность рассеяния L_{S2} и активное сопротивление r_2 . В материале сердечника также индуцируются электродвижущие силы, под действием которых протекают вихревые токи, нагревающие сердечник. Потери энергии от вихревых токов вместе с потерями из-за гистерезиса учтены на схеме замещения в виде эквивалентного сопротивления R . Таким образом, ток холостого хода i_0 может быть представлен как сумма тока перемагничивания сердечника i_m (индуктивного) и тока потерь i_a (активного). Ток перемагничивания существенно несинусоидален, однако при упрощённом расчёте его заменяют эквивалентной синусоидой.

При подключении потребителя Z к вторичной обмотке w_2 по ней протекает ток i_2 , создающий магнитодвижущую силу $w_2 i_2$ (положительное направление на рисунке 2, по правилу буравчика, вниз), которая стремится ослабить магнитный поток связи Φ . Однако снижение Φ приводит к уменьшению ЭДС $e_1 = -w_1 d\Phi / dt$, препятствующей току первичной

обмотки. Увеличение первичного тока i_1 вызывает подмагничивание сердечника и, в результате, магнитный поток Φ уменьшается незначительно (при упрощённых расчётах магнитный поток связи Φ и потери в магнитопроводе считают независимыми от нагрузки). Отбор энергии от трансформатора по вторичной обмотке автоматически увеличивает её поступление из сети по первичной, а пульсирующий магнитный поток Φ обеспечивает передачу этой энергии с мощностью $S = U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ и преобразование с коэффициентом трансформации $k = w_1 / w_2$ (уменьшение напряжения с одновременным увеличением тока).

При протекании тока во вторичной цепи часть магнитного потока также рассеивается, что на схеме замещения учитывается в виде индуктивности рассеяния вторичной обмотки L_{S2} .

Потери в проводах, которыми выполнены обмотки, учтены на схеме замещения в виде активных сопротивлений (r_1 – первичной; r_2 – вторичной).

Для левой и правой частей схемы замещения можно записать два уравнения, связанных между собой через магнитный поток связи Φ :

$$u_1 - r_1 i_1 - L_{S1} di_1 / dt = w_1 d\Phi / dt \quad \text{и} \quad w_2 d\Phi / dt - L_{S2} di_2 / dt - r_2 i_2 = u_2.$$

Левое уравнение показывает, как изменяется напряжение при продвижении энергии от сети до магнитопровода, правое – от магнитопровода к потребителю; они связаны между собой через скорость изменения магнитного потока связи $d\Phi / dt$. Умножим второе уравнение на коэффициент трансформации $k = w_1 / w_2$, причём напряжение умножим на k , индуктивность и сопротивление умножим на k^2 , а ток разделим на k . Такая операция представляет собой приведение параметров вторичной цепи к напряжению первичной, приведенные параметры обозначаются со штрихом «'»:

$$u_2' = k u_2; \quad L_{S2}' = k^2 L_{S2}; \quad r_2' = k^2 r_2; \quad i_2' = i_2 / k.$$

После приведения второе уравнение приобретает вид

$$w_1 d\Phi / dt - L_{S2}' di_2' / dt - r_2' i_2' = u_2'.$$

Подставим левую часть первого уравнения в приведенное второе

$$u_1 - r_1 i_1 - L_{S1} di_1 / dt - L_{S2}' di_2' / dt - r_2' i_2' = u_2'.$$

Уравнение получилось чисто электрическим. Приведение параметров вторичной обмотки к напряжению первичной позволяет условно заменить

магнитную связь между обмотками на электрическую, а на схеме замещения электрически соединить эти обмотки в форме буквы Т (рисунок 4, а).

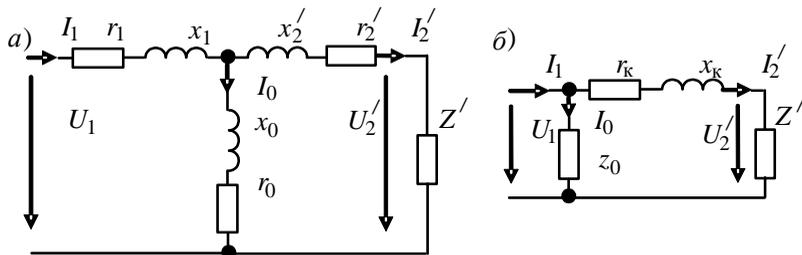


Рисунок 4 – Т-образная (а) и Г-образная схемы (б) замещения трансформатора

Т-образная схема замещения приведенного трансформатора содержит:

- сопротивления проводов обмоток, первичной r_1 и вторичной $r_2' = k^2 r_2$;
- индуктивные сопротивления первичной $x_1 = \omega L_{S1}$ и вторичной обмоток $x_2' = k^2 x_2 = k^2 \omega L_{S2}$, учитывающие магнитные потоки рассеяния;
- ветвь перемagnичивания сердечника, состоящую из индуктивного сопротивления x_0 , учитывающего магнитный поток связи, и активного сопротивления r_0 , учитывающего потери от гистерезиса и вихревых токов.

На Г-образной схеме замещения (рисунок 4, б) ветвь перемagnичивания вынесена к источнику первичного напряжения в виде полного сопротивления холостого хода z_0 , нагрев обмоток учтён в виде активного сопротивления $r_k = r_1 + r_2'$, а рассеяние магнитного потока – в виде индуктивного $x_k = x_1 + x_2'$.

Параметры схемы замещения определяют по паспортным данным трансформатора, где приведены: номинальная мощность; напряжения обмоток; ток $i_{0\%}$ и мощность потерь P_0 холостого хода; напряжение $u_{k\%}$ и мощность потерь P_k короткого замыкания. Их также можно определить экспериментально с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания.

Схемы электрических цепей

Опыт холостого хода проводится при номинальном напряжении на первичной обмотке и разомкнутой вторичной обмотке трансформатора (рисунок 5).

По показаниям ваттметра P_0 , амперметра I_0 и вольтметров U_{1H} и U_{20} определяются параметры намагничивающей ветви схемы замещения и коэффициент трансформации

$$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}; \quad x_0 = \sqrt{(z_0^2 - r_0^2)}; \quad k = \frac{U_{1H}}{U_{20}}.$$

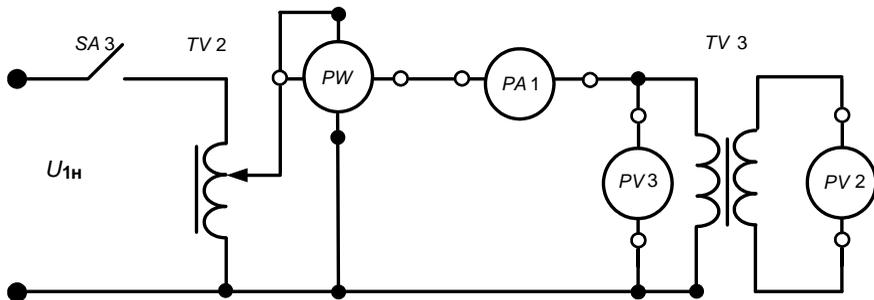


Рисунок 5 – Схема опыта холостого хода трансформатора

Опыт короткого замыкания проводится при пониженном напряжении первичной обмотки $U_{1к}$, замкнутой накоротко вторичной обмотке и номинальном значении силы тока I_{1H} (рисунок 6). Напряжение плавно увеличивается от нуля до значения, при котором устанавливается номинальная сила тока первичной обмотки.

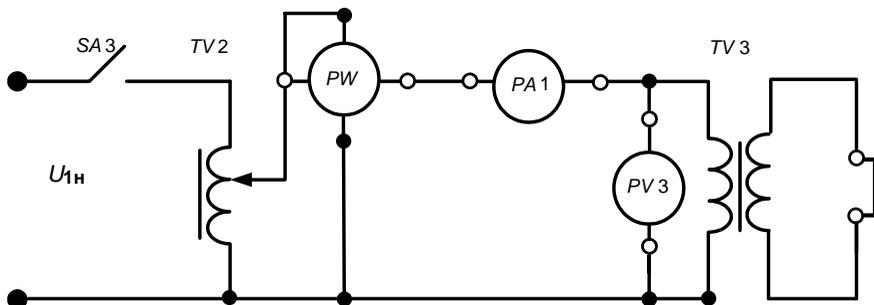


Рисунок 6 – Схема опыта короткого замыкания трансформатора

По показаниям ваттметра P_k , амперметра I_{1H} и вольтметра $U_{1к}$ определяются параметры остальных элементов схем замещения

$$r_k = \frac{P_k}{I_{1H}^2}; \quad z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1H}}; \quad x_k = \sqrt{(z_k^2 - r_k^2)};$$

$$r_1 = r_2' = \frac{r_k}{2}; \quad x_1 = x_2' = \frac{x_k}{2}; \quad r_2 = \frac{r_2'}{k^2}; \quad x_2 = \frac{x_2'}{k^2}.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k},$$

где β – коэффициент загрузки трансформатора, $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$;

S_H – номинальная мощность трансформатора;

$\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки;

P_0, P_k – мощности потерь холостого хода и короткого замыкания, Вт.

Потеря напряжения в трансформаторе под нагрузкой

$$\Delta u_{\%} \approx \beta S_H \frac{r_k \cos \varphi_2 + x_k \sin \varphi_2}{U_{1H}^2} \cdot 100 \% = \frac{r_k P + x_k Q}{U_{1H}^2} \cdot 100 \%..$$

Порядок выполнения работы

1 Собрать схему для проведения опыта холостого хода трансформатора по рисунку 7, используя перемычки для коммутации (места установки перемычек выделены на схеме).

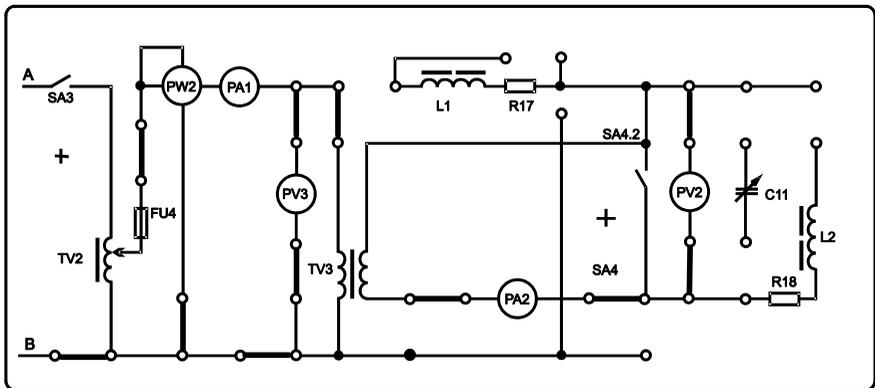


Рисунок 7 – Схема проведения опыта холостого хода трансформатора

2 Тумблером SA3 подключить функциональный блок для проведения опыта холостого хода. (*Примечание* – Тумблер SA4 должен находиться в выключенном положении). С помощью автотрансформатора TV2 (ЛАТР) установить напряжение $U_{1н} = 220$ В (по показанию вольтметра PV3) и измерить силу тока в первичной обмотке I_0 , мощность холостого хода P_0 и напряжение холостого хода вторичной обмотки U_{20} . Результаты измерений внести в таблицу 1.

Таблица 1 – Опыт холостого хода

Из мер ено				Р а с с ч и т а н о			
$U_{1н}$, В	I_0 , А	P_0 , Вт	U_{20} , В	r_0 , Ом	z_0 , Ом	x_0 , Ом	k
220							

3 Рассчитать параметры намагничивающей ветви схемы замещения r_0 , z_0 , x_0 и коэффициент трансформации k .

4 С помощью автотрансформатора TV2 (ЛАТР) уменьшить напряжение $U_{1н} = 0$ В и включить тумблер SA4. Постепенно увеличивая напряжение автотрансформатора, добиться, чтобы по первичной обмотке протекал номинальный ток $I_{1н}$

$$I_{1н} = \frac{S_n}{U_{1н}},$$

где $S_n = 100$ ВА.

5 Измерить напряжение короткого замыкания $U_{1к}$ и мощность короткого замыкания P_k . Результаты измерений внести в таблицу 2.

Таблица 2 – Опыт короткого замыкания

Из мер ено			Р а с с ч и т а н о						
I_0 , А	$U_{1к}$, В	P_k , Вт	R_k	Z_k	X_k	r_1	r_2	x_1	x_2
			Ом						

6 Определить коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной нагрузке ($\beta = 1$) при коэффициенте мощности $\cos\varphi = 1$.

7 Пользуясь параметрами нагрузки, определёнными в лабораторной работе № 3, рассчитать $\Delta u\%$.

8 Выключить тумблеры SA4, SA3 и собрать схему исследования трансформатора под нагрузкой по рисунку 8.

9 Тумблером SA3 подключить функциональный блок для исследования трансформатора под нагрузкой. (*Примечание* – Тумблер SA4 должен

находиться в выключенном положении). С помощью автотрансформатора $TV2$ (ЛАТР) установить напряжение $U_{1н} = 220$ В (по показанию вольтметра $PV3$) и, изменяя ёмкость конденсатора от нуля до максимальной, измерить силу тока в первичной обмотке I_1 и мощность P , а также напряжение U_2 и силу тока во вторичной обмотке I_2 . Результаты измерений внести в таблицу 3.

10 Построить графики зависимости I_2 и $\Delta u_{\%}$ от ёмкости конденсатора.

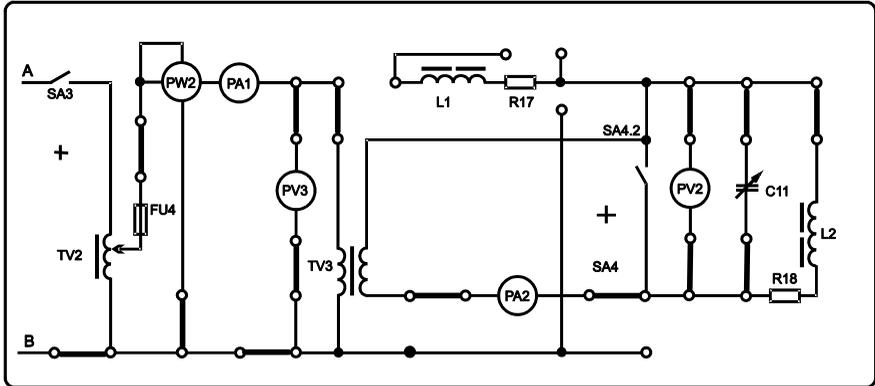


Рисунок 8 – Схема исследования трансформатора под нагрузкой

Таблица 3 – Исследование трансформатора под нагрузкой

C, мкФ	$U_{1н}$, В	Измерено				Рассчитано	
		I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	ΔU , В	$\Delta u_{\%}$
0	220						
10							
20							
40							
60							

11 Рассчитать абсолютную ΔU и относительную $\Delta u_{\%}$ потерю напряжения по формуле

$$\Delta U = U_{20} - U_2 ; \quad \Delta u_{\%} = \frac{\Delta U}{U_{20}} \cdot 100 \% .$$

Содержание отчета

Наименование и цель работы; схемы исследования; таблицы результатов измерений и расчётов; расчёты КПД η и потери напряжения $\Delta u_{\%}$ (по

приближённой формуле); графики зависимости I_2 и $\Delta u_{\%}$ от ёмкости конденсатора; заключение.

Контрольные вопросы

- 1 Каким образом происходит преобразование энергии в трансформаторе?
- 2 С какой целью выполняют приведение параметров вторичной обмотки к первичному напряжению? По каким формулам это делают?
- 3 Опишите Т-образную схему замещения.
- 4 Опишите Г-образную схему замещения.
- 5 Опишите опыт холостого хода. Как определяются параметры намагничивающей ветви схем замещения?
- 6 Опишите опыт короткого замыкания. Как определяются остальные параметры схем замещения?
- 7 Как определяется коэффициент полезного действия трансформатора?
- 8 Как определяется потеря напряжения при загрузке трансформатора?
- 9 Опишите графики зависимости I_2 и $\Delta u_{\%}$ от ёмкости конденсатора.