

## 51-52 Лабораторная работа №4 Исследование двухобмоточного силового трансформатора методами холостого хода и короткого замыкания

### Цель работы

Изучить устройство трансформатора и определить параметры его схемы замещения. Изучить круговую векторную диаграмму токов и напряжений

### Краткие сведения из теории

Рассмотрим схему замещения трансформатора

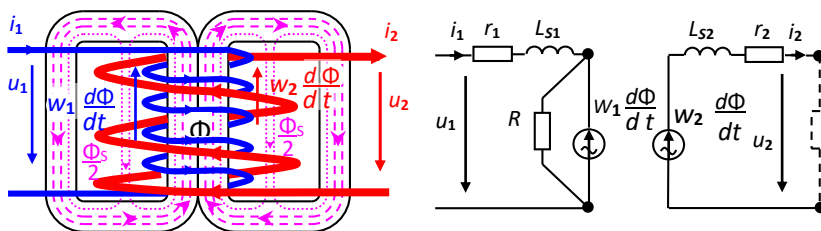


Рисунок 1 – Трансформатор и его схема замещения

Потери в проводах, которыми выполнены обмотки, учтены на схеме замещения в виде активных сопротивлений ( $r_1$  – первичной;  $r_2$  – вторичной). Рассеяние магнитного потока учтено в виде индуктивности рассеяния первичной обмотки  $L_{S1}$  и вторичной обмотки  $L_{S2}$ . Потери при перемагничивании сердечника учтены в виде резистора  $R$ . Электродвижущие силы первичной обмотки  $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$  и вторичной обмотки  $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$  направлены вверх.

Для левой и правой частей схемы замещения можно записать два уравнения, связанных между собой через магнитный поток связи  $\Phi$

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

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 «'»

$$u_2' = k u_2; L_{s2}' = k^2 L_{s2}; r_2' = k^2 r_2; i_2' = i_2 / k$$

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.

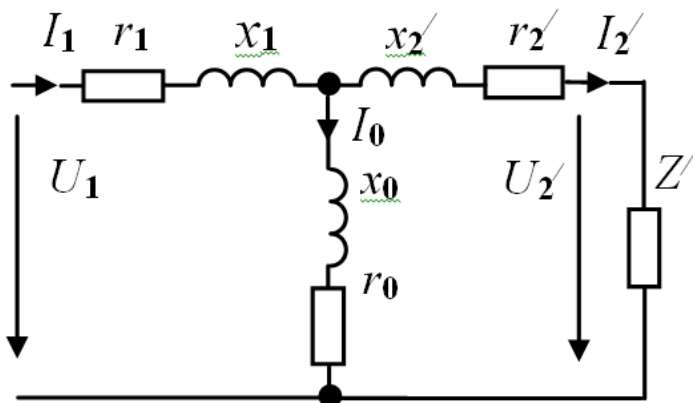


Рисунок 2 – Т-образная схема замещения приведенного трансформатора

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  $x_2' = k^2 x_2 = k^2 \omega L_{s2}$  обмоток, учитывающие магнитные потоки рассеяния;
- ветвь перемагничивания сердечника, состоящую из индуктивного сопротивления  $x_0$ , учитывающего магнитный поток связи, и активного сопротивления  $r_0$ , учитывающего потери от гистерезиса и вихревых токов.

**Опыт холостого хода** проводится для определения коэффициента трансформации и параметров поперечной намагничивающей ветви Т-образной схемы замещения. Схема электрической цепи для проведения опыта ХХ представлена на рисунке 3. Экспериментально коэффициент трансформации можно определить только по результатам измерения напряжений в режиме ХХ. Это объясняется тем, что только при холостом ходе, когда ток  $I_2$  вторичной обмотки отсутствует, напряжение на выходе трансформатора равно ЭДС во вторичной обмотке  $E_2$ .

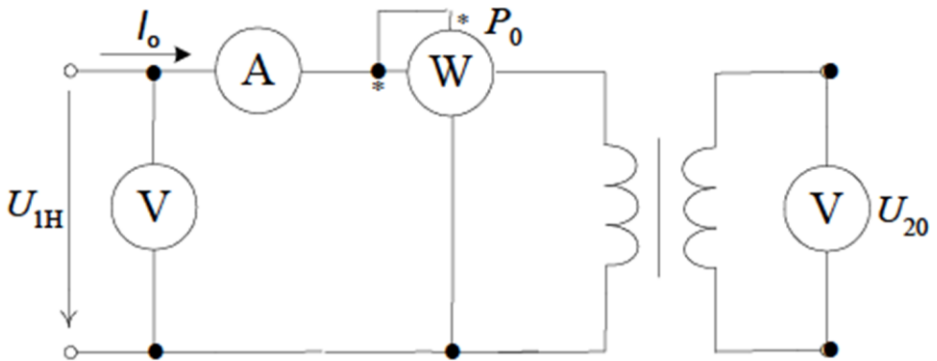


Рисунок 3 – Схема включения трансформатора для проведения опыта холостого хода

По первичной обмотке в режиме холостого хода протекает очень малый ток  $I_1 = I_0$ , вызывающий незначительное падение напряжения  $I_1 Z_1$  на сопротивлении первичной обмотки трансформатора. Поэтому можно считать, что  $U_1 \approx E_1$ .

На основании вышеизложенного, коэффициент трансформации трансформатора, определяемый в ходе проведения опыта холостого хода,  $k = E_1 / E_2 \approx U_{1H} / U_{20}$ .

Так как в режиме холостого хода во вторичной обмотке тока нет, а по первичной протекает незначительный ток, то потерями в обмотках можно пренебречь. Эти потери зависят от квадрата тока и сопротивления обмоток. Следовательно, можно считать, что вся активная мощность  $P_0$ , потребляемая трансформатором в опыте холостого хода и измеряемая ваттметром, идёт на покрытие потерь в магнитопроводе.

При определении параметров намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора учитывается тот факт, что у реальных

трансформаторов  $r_1 \ll r_0$  и  $x_1 \ll x_0$ . Приведенные неравенства позволяют пренебречь влиянием  $r_1$  и  $x_1$  на значение тока холостого хода, протекающего в левом контуре схемы замещения трансформатора и определить *приблизительные* значения параметров намагничивающей ветви.

Активное сопротивление намагничивающей ветви  $r_0 = P_0 / I_0^2$ .

Полное сопротивление намагничивающей ветви  $z_0 = U_{1H} / I_0$ .

Реактивное сопротивление намагничивающей ветви  $x_0$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} .$$

Для новых и отремонтированных трансформаторов проводят **опыт короткого замыкания** (рисунок 4). В этом опыте, при замкнутых выводах вторичной обмотки, на первичную подают такое пониженное напряжение  $U_K$ , при котором по первичной обмотке трансформатора начинает протекать номинальный ток  $I_{1H}$ . Такое напряжение называется напряжением короткого замыкания трансформатора.

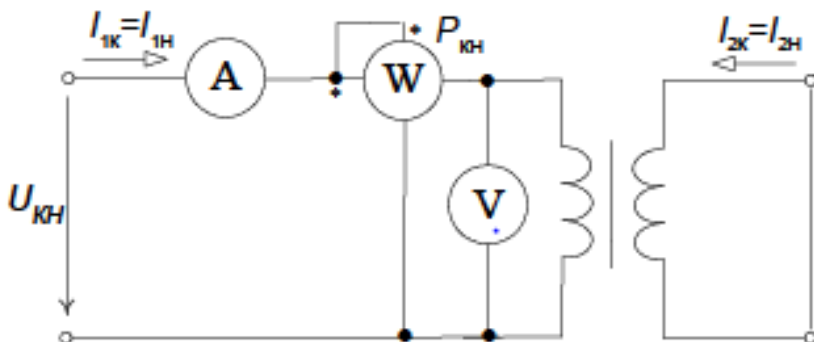


Рисунок 4 – Схема включения трансформатора для проведения опыта короткого замыкания

При напряжении  $U_K$  измеряется активная мощность  $P_K$ , потребляемая из сети. В силовых трансформаторах величина  $U_K$  обычно составляет 5–10 % от  $U_{1H}$ , при этом, чем больше мощность трансформатора, тем меньше процент. На практике напряжение короткого замыкания приводится в процентах,

$$U_{K\%} = U_K / U_{1H} \cdot 100 \% .$$

Опыт короткого замыкания позволяет определить потери в обмотках трансформатора при номинальных токах и рассчитать их сопротивления

в схеме замещения ( $r_1, r'_2$  и  $x_1, x'_2$ ). При определении  $r_1, r'_2$  и  $x_1, x'_2$  учитывается тот факт, что у реальных трансформаторов  $r_1 = r'_2 \ll r_0$  и  $x_1 = x'_2 \ll x_0$ . В опыте КЗ приведенные неравенства позволяют пренебречь током  $I_0$ , протекающим в намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора и перейти к упрощенной Г-образной схеме. В этом случае можно считать что ток  $I_{1н}$ , потребляемый из сети в опыте КЗ определяется только подводимым напряжением  $U_K$  и значениями  $r_K$  и  $x_K$ .

Активное сопротивление короткого замыкания  $r_K = P_K / I_{1н}^2$ .

Полное сопротивление короткого замыкания  $z_K = U_K / I_{1н}$ .

Реактивное сопротивление короткого замыкания

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$

Активное сопротивление обмоток  $r_1 = r'_2 = r_K / 2$ .

Реактивное сопротивление обмоток  $x_1 = x'_2 = x_K / 2$ .

При определении потерь в обмотках трансформатора учитывается тот факт, что в опыте короткого замыкания  $U_K \ll U_{1н}$ . Малое значение напряжения на первичной обмотке создает пропорционально низкое значение магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора.

Так как потери в магнитопроводе очень сильно зависят от значения магнитной индукции в нём, то в опыте короткого замыкания они настолько малы, что ими можно пренебречь. Следовательно, вся мощность  $P_K$ , потребляемая из сети в опыте короткого замыкания и измеряемая ваттметром, идет на покрытие потерь в обмотках трансформатора при номинальном токе. Потери в обмотках пропорциональны квадрату тока и сопротивлению обмоток.

На Г-образной схеме замещения ветвь перемагничивания вынесена к источнику первичного напряжения в виде полного сопротивления холостого хода  $z_0$ , нагрев обмоток учтён в виде активного сопротивления  $r = r_1 + r'_2$ , а рассеяние магнитного потока – в виде индуктивного сопротивления  $x = x_1 + x'_2$ .

Исследуем зависимость потерь напряжения в трансформаторе от характера нагрузки (активная, индуктивная, емкостная) с помощью круговой диаграммы, составленной по Г-образной схеме замещения. На круговой диаграмме, вектор первичного напряжения  $U_1$  (синий) выходит из т.  $U$  и заканчивается в т.  $O$ ; вектор тока перемагничивания  $I_0$  (фиолетовый) выходит из т.  $1$  и заканчивается в т.  $O$ , они неподвижны.

Вектор приведенного вторичного тока для случая активной нагрузки  $I_2'/R$  (красный сплошной) выходит из т.  $O$  и заканчивается на большой



продолжением тока  $I_2'$ , катет  $-xI_2'$  направлен перпендикулярно току, а вершина описывает дугу потерь, и является концом вектора приведенного вторичного напряжения  $U_2'$ .

Потеря напряжения примерно равна проекции треугольника потерь на вектор первичного напряжения  $U_1$ . При чисто активной нагрузке  $R$  потеря напряжения невелика. При активно-индуктивном характере нагрузки  $rL$  с увеличением индуктивности вектор  $I_2'$  и треугольник потерь поворачиваются по часовой стрелке; потеря напряжения возрастает. При емкостной нагрузке  $C$  вектор  $I_2'$  и треугольник потерь поворачиваются против часовой стрелки; наблюдаем не потерю, а возрастание вторичного напряжения, это проявление резонанса между ёмкостью нагрузки  $C$  и индуктивностью рассеяния трансформатора  $L_s$ .

### **Содержание отчета**

- 1 Наименование и цель работы
- 2 Т-образная схема замещения приведенного трансформатора (рис.2)
- 3 Схема опыта холостого хода (рис.3)
- 4 Схема опыта короткого замыкания (рис. 4)
- 5 Г-образная схема замещения трансформатора и круговая векторная диаграмма токов и напряжений (рис. 5)
- 6 Ответы на контрольные вопросы

### **Контрольные вопросы**

- 1 Из каких частей состоит трансформатор?
- 2 С какой целью параметры вторичной обмотки приводятся к напряжению первичной?
- 3 Какой коэффициент и как используется при приведении?
- 4 Какое напряжение подаётся на первичную обмотку в опыте холостого хода? Что измеряется?
- 5 Что и как рассчитывается по результатам опыта холостого хода?
- 6 Какое напряжение подаётся на первичную обмотку в опыте короткого замыкания? Что измеряется?
- 7 Что и как рассчитывается по результатам опыта короткого замыкания?
- 8 Что обозначают штрихи на схемах замещения и в формулах?
- 9 Где на векторной диаграмме выполняется 1 закон Кирхгофа?
- 10 Где на векторной диаграмме выполняется 2 закон Кирхгофа?