

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### Исследование однофазного двухобмоточного трансформатора

Цель работы.

1. Ознакомление с принципом действия трансформатора.
2. Экспериментальное исследование внешней характеристики трансформатора.

Схема исследуемого трансформатора

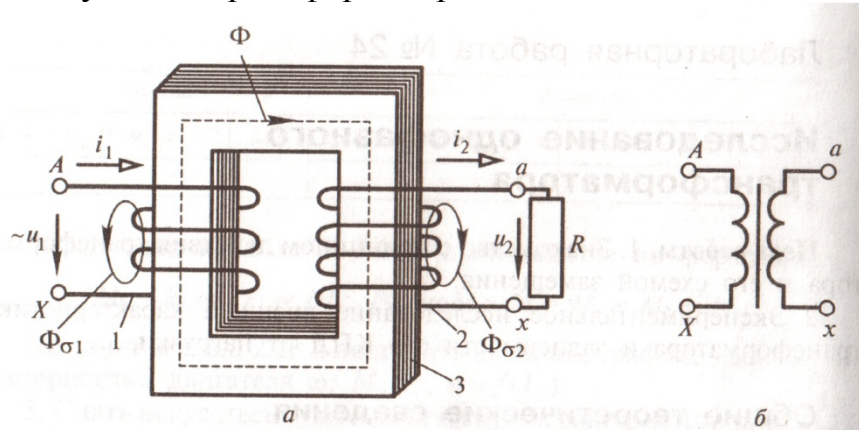


Рис.1 Однофазный двухобмоточный трансформатор:

а) - электромагнитная схема; б) - условное графическое обозначение

#### Общие теоретические сведения.

Трансформатор является электрическим аппаратом, без которого трудно представить себе современную энергетику. Передача электрической энергии на большие расстояния стала возможной благодаря этому уникальному статическому преобразователю электрической энергии, не говоря о других не менее важных его применениях. Поэтому изучение трансформатора необходимо инженеру в области автоматизации, поскольку электромагнитные процессы в трансформаторе дают понимание принципов действия электрических машин, составляющих основу производства.

Теория трансформатора достаточно полно изложена в лекции и в многочисленных рекомендуемых учебных пособий. В лабораторной работе экспериментально определяются внешняя характеристика и КПД трансформатора. Для определения этих характеристик надо знать физическое содержание опытов холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ), предназначенных для определения конструктивных параметров трансформатора.

Кратко напомним назначение этих опытов.

Опыт ХХ позволяет определить коэффициент трансформатора  $K$  и потери мощности  $P_m$ , потребляемой трансформатором в проводниках его обмоток (в меди). В этом опыте вычисляются также активное и индуктивное сопротивления соответственно  $R_0$  и  $X_m$  ветви ХХ.

Опыт КЗ позволяет определить потери мощности  $P_c$  в

магнитопроводе (сердечнике) трансформатора на его перемагничивание и вихревые токи (в стали).

Кроме того в этом опыте вычисляются активные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  индуктивностей рассеяния  $L_{\sigma_1}$  и  $L_{\sigma_2}$  первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Опыт ХХ проводится по схеме, приведенной на рис.2 при номинальном напряжении на первичной обмотке  $U_1=U_{1H}$ , установленном с помощью регулятора напряжения РН. При этом измеряется напряжение на вторичной обмотке  $U_{2x}$ , ток первичной обмотки  $I_{1x}$  и мощность (активная), потребляемая первичной цепью трансформатора  $P_{1x}$ . ветвью холостого хода. Через него проходит ток холостого хода  $I_{1x}$ .

Как уже ранее отмечалось, в режиме ХХ  $I_{1x} \ll I_{1H}$ ,  $P_{1x} = P_{ст}$ ,  $U_1 \approx E_1$ .

По данным опыта определяют:

$$- K = \frac{U_{1H}}{U_{2x}} = \frac{E_1}{E_2} \text{ - коэффициент трансформации;}$$

$$- R_0 = \frac{P_{1x}}{I_{1x}^2} \text{ - активное сопротивление ветви ХХ;}$$

$$- \cos \varphi_{1x} = \frac{P_{1x}}{U_{1H} \cdot I_{1x}} \text{ - фазовый сдвиг между напряжением и током в}$$

режиме ХХ;

$$- \delta = 90^\circ - \varphi_{1x} \text{ - угол потерь;}$$

$$- Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{1x}} \text{ - полное сопротивление ветви ХХ;}$$

$$- X_M = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \text{ - реактивное сопротивление ветви ХХ.}$$

Опыт КЗ проводится по схеме, приведенной на рис.3 при закороченной вторичной обмотке.

С помощью регулятора напряжения РН напряжение на первичной обмотке трансформатора постепенно увеличивается до значения  $U_{1к}$ , при котором ток в первичной обмотке достигнет номинального тока  $I_{1H}$ . Это напряжение носит название напряжения короткого замыкания трансформатора. При этом измеряется мощность, потребляемая трансформатором  $P_K$ .

Обычно  $U_{1к} \ll U_{1H}$  ( $U_{1к} \cong (0,05 - 0,15)U_{1H}$ ), поэтому поток в сердечнике, определяемый напряжением мал. Следовательно, в режиме КЗ можно пренебречь потерями в стали трансформатора, исключить ветвь ХХ из схемы замещения и представить эту схему в виде рис. 2.9,

$$\text{где } X_K = \omega L_{1\sigma} + \omega L'_{2\sigma}, \quad R_K = R_1 + R'_2.$$

На основании данных измерений определяют:

$$U_K \% = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\% - \text{процентное напряжение КЗ};$$

и

$$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{I_{1H} \cdot U_{1K}} - \text{фазовый сдвиг между напряжением и током в}$$

режиме КЗ;

$$U_{Ka} \% = U_K \% \cdot \cos\varphi_K = \frac{P_K}{I_{1H} \cdot U_K} \cdot \frac{U_K}{U_{1H}} \cdot 100 = \frac{P_K}{I_{1H} \cdot U_{1H}} \cdot 100 - \text{активная}$$

составляющая напряжения КЗ;

$$U_{Kp} \% = U_K \% \cdot \sin\varphi_K - \text{реактивная составляющая напряжения КЗ.}$$

Поскольку поток в сердечнике трансформатора и потери в стали в режиме КЗ малы, считается, что вся мощность  $P_K$  расходуется в меди первичной и вторичной обмоток. Тогда

$$P_K = I_{1H}^2 \cdot R_K$$

и, следовательно,

$$R_K = R_1 + R_2' = \frac{P_K}{I_{1H}^2} \text{ Ом.}$$

Так как  $w_2' = w_1$ , то  $R_1 \approx R_2' = \frac{R_K}{2}$  и  $R_2 = \frac{R_K}{2K^2}$ .

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{1H}} \text{ Ом,}$$

реактивное сопротивление КЗ

$$X_K = \omega L_{\sigma 1} + \omega L_{\sigma 2}' = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

Поскольку  $w_2' = w_1$ , то  $L_{\sigma 2}' \approx L_{\sigma 1} = \frac{X_K}{2\omega}$  и  $L_{\sigma 2} = \frac{X_K}{2\omega K^2}$ .

В паспорте или каталожных данных на трансформатор часто указывается величины  $U_K\%$ ,  $U_{Ka}\%$  и  $U_{Kp}$ . Зная их, можно рассчитать параметры  $R_K$  и  $X_K$  схемы замещения следующим образом:

Так как  $U_{Ka} \% = \frac{I_{1H} \cdot R_K}{U_{1H}} \cdot 100$ , то  $R_K = \frac{U_{Ka} \% \cdot U_{1H}}{100 \cdot I_{1H}} \cdot 100 \text{ Ом.}$

Так как  $U_{Kp} \% = \frac{I_{1H} \cdot X_K}{U_{1H}} \cdot 100$ , то  $X_K = \frac{U_{Kp} \% \cdot U_{1H}}{100 \cdot I_{1H}} \cdot 100 \text{ Ом.}$

### ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА

При изменении нагрузки трансформатора, его вторичное напряжение  $U_2$  не остается неизменным, как это следует из уравнения Кирхгоффа для вторичной цепи

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 \omega L_{\sigma 2} = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2.$$

С ростом тока  $I_2$  увеличивается падение напряжения на сопротивлении  $Z_2$ . Зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$  от тока нагрузки  $I_2$  при постоянном напряжении на первичной обмотке  $U_1$  называется внешней характеристикой трансформатора. Изменение вторичного напряжения при переходе от режима ХХ к режиму работы под нагрузкой, выраженное в процентах, определяется выражением

$$\Delta U_2 \% = \frac{U_{2x} - U_2}{U_{2x}} \cdot 100$$

Величина  $\Delta U_2$  зависит как от величины нагрузки, так и от ее характера, определяемого величиной и знаком угла  $\varphi_{2H}$  (фазового сдвига между напряжением и током в нагрузке) и определяется по формуле

$$\Delta U_2 \% = \beta (U_{Ka} \% \cdot \cos \varphi_{2H} + U_{KP} \% \cdot \sin \varphi_{2H})$$

где  $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} = \frac{I_1}{I_{1H}}$  - коэффициент нагрузки трансформатора,

$U_{Ka} \%$  и  $U_{KP} \%$  соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания  $U_K$ .

На рис.1 приведены внешние характеристики трансформатора для различных по характеру нагрузок. При чисто активной нагрузке ( $\cos \varphi_{2H} = 1$ ) и активно-индуктивной нагрузке ( $\cos \varphi_{2H} < 1, \varphi_{2H} > 0$ ) внешние характеристики имеют падающий характер. При активно-емкостной нагрузке ( $\cos \varphi_{2H} < 1, \varphi_{2H} < 0$ ), рост тока нагрузки может сопровождаться увеличением напряжения на выходе: в силу того, что члены с  $\sin \varphi_{2H}$  в формуле (\*) приобретают знак (-).

#### **Заданные значения параметров трансформатора**

- Номинальная мощность -  $S_{ном}$
- Номинальное первичное напряжение -  $U_{1ном}$
- Мощность короткого замыкания -  $P_{кном}$
- Напряжение короткого замыкания -  $u_k$
- Коэффициент мощности режима короткого замыкания -  $\cos \varphi_2$

#### **Принять следующие значения перечисленных параметров:**

$S_{ном}$  кВА = 600, 250, 800, 100, 180, 560, 320, 50, 120, 80.

$U_{1ном}$  кВ = 31.5, 6.3, 31.5, 6.3, 6.3, 10, 10, 3.4, 6.3, 10.

$P_{кном}$  кВт = 20, 1.2, 22, 7, 10, 25, 13, 3.5, 8, 5.4.

$u_k$  % = 8.5, 6.5, 8.5, 5.5, 6.5, 7, 6.5, 5.5, 5.5, 6.

$\cos \varphi_2$  = 0.75\*, 0.85, 0.8\*, 0.7, 1.0, 0.85, 0.9\*, 1.0, 0.8, 0.7

*Примечание:* Значения  $\cos \varphi_2$ , отмеченные индексом \* означают емкостной характер нагрузки.

#### **Задача исследования:**

Экспериментально построить график зависимости изменения вторичного напряжения  $U_2$  от коэффициента нагрузки  $\beta = I_2/I_{2H}$ ,

для заданных параметров трансформатора и сравнить его с расчетным графиком.

При построении графика принять

$$\beta = 0.25; 0.50; 0.75; 1.0;$$

Сделать выводы по работе.

## Методическое указание

Исследование выполняется в электронной лаборатории и ставит своей задачей экспериментальное построение внешней характеристики трансформатора. Результаты эксперимента надо сравнить с расчетными значениями.

Приступая к выполнению лабораторного практикума, следует иметь в виду, что он выполняется в виртуальной (электронной) лаборатории, какой является система электронного моделирования Electronics Workbench. Программа Electronics Workbench использует стандартный интерфейс Windows, что облегчает ее использование.

Описание версии Electronics Workbench 5.12, Professional Edition можно найти в Интернете. Там же можно освоить приемы выполнения лабораторных работ. Применения этой программы хорошо изложено в пособии: А.С. Серебряков “Электротехника и электроника” - М: “Высшая шк”., 2009, 335с.

### Порядок выполнения работы.

1. Составить компьютерную модель трансформатора, приведенную в качестве образца в ПРИЛОЖЕНИИ 1

2. Исследовать на компьютерной модели работу трансформатора при изменении активной нагрузки с помощью резистора R в режиме холостого хода (ключ S1 разомкнут).

Рекомендуется изменять ток в первичной обмотке до десятикратного значения тока холостого хода.

Измеренные значения  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $U_2$ ,  $I_2$ , свести в таблицу.

По этим значениям вычислить:

$$U = U_{2н} - U_2 / U_{2н} \cdot 100\%$$

Напряжение  $U_{2н}$  измерять при холостом ходе.

По данным измерений  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $U_2$ ,  $I_2$ , заданных значений построить зависимость  $U_2 = f(\beta)$ .

### Методические указания.

Отсутствие навыка работы в электронной лаборатории требует повышенного внимания к ее проведению. Поэтому еще раз следует напомнить, что для выполнения лабораторной работы необходимо установить программу Electronics Workbench 5.12 – Portable - Эмулятор электрических схем, которую можно найти в Интернете по адресу: <http://soft-plus.ucoz.ru/load/100-0-261> и бесплатно скачать на рабочий компьютер.

После установки появляется символика программы Electronics Wor...

После запуска программы появляется окно, в котором располагается меню, инструментальная строка и строка библиотеки компонентов.

Ниже появляется не именованное (Untitled) рабочее поле, в котором будет строиться исследуемая схема (нашем случае схема электрической цепи) с необходимыми приборами для выполнения и регистрации результатов моделирования.

Элементы электрической цепи из окон выбора источника (Sources), измерительные приборы амперметр и вольтметр берутся с панели индикатора (Indicators), а осциллограф - с панели инструментов (Instruments).

Измерительные приборы амперметр и вольтметр следует переключить в режим измерения переменного тока AC.

Электронная схема, приведенная ниже, составлена для электрической схемы, подобной заданной. Следует обратить внимание на ключи  $s_1$  и  $s_2$  и подключение измерительных приборов.

На данной схеме показаны значения сопротивлений и показаний измерительных приборов, которые не являются решением поставленной задачи, а приведены только в качестве примера.

В отчете надо привести аналогичную схему с указанием конкретных значений сопротивлений и показаний измерительных приборов, полученных в результате решения поставленной задачи.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Ниже приведены электрические схемы для лабораторных исследований трансформатора в режимах холостого хода (Рис.2) и короткого замыкания (Рис.3).

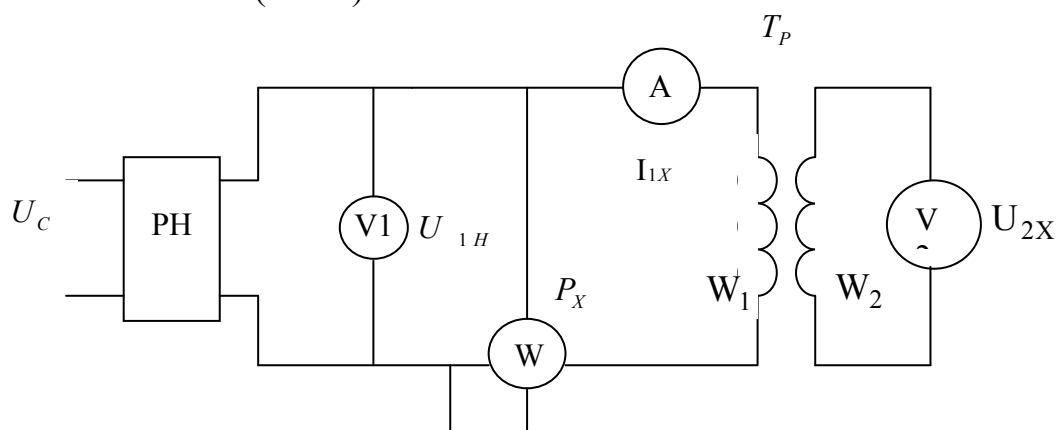


Рис 2

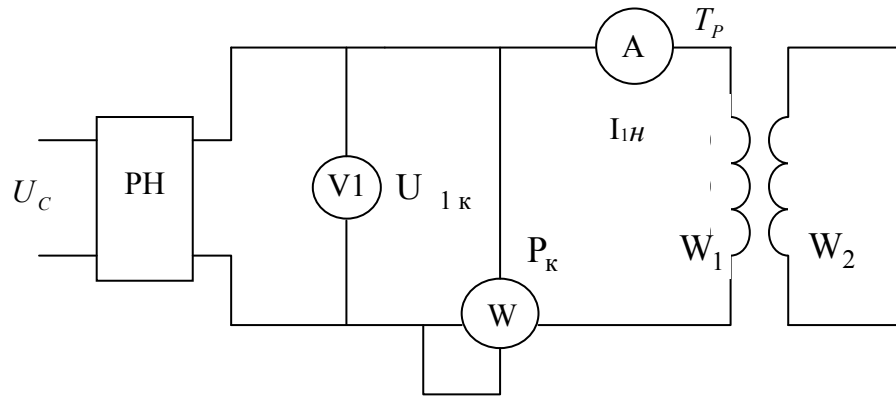


Рис 3

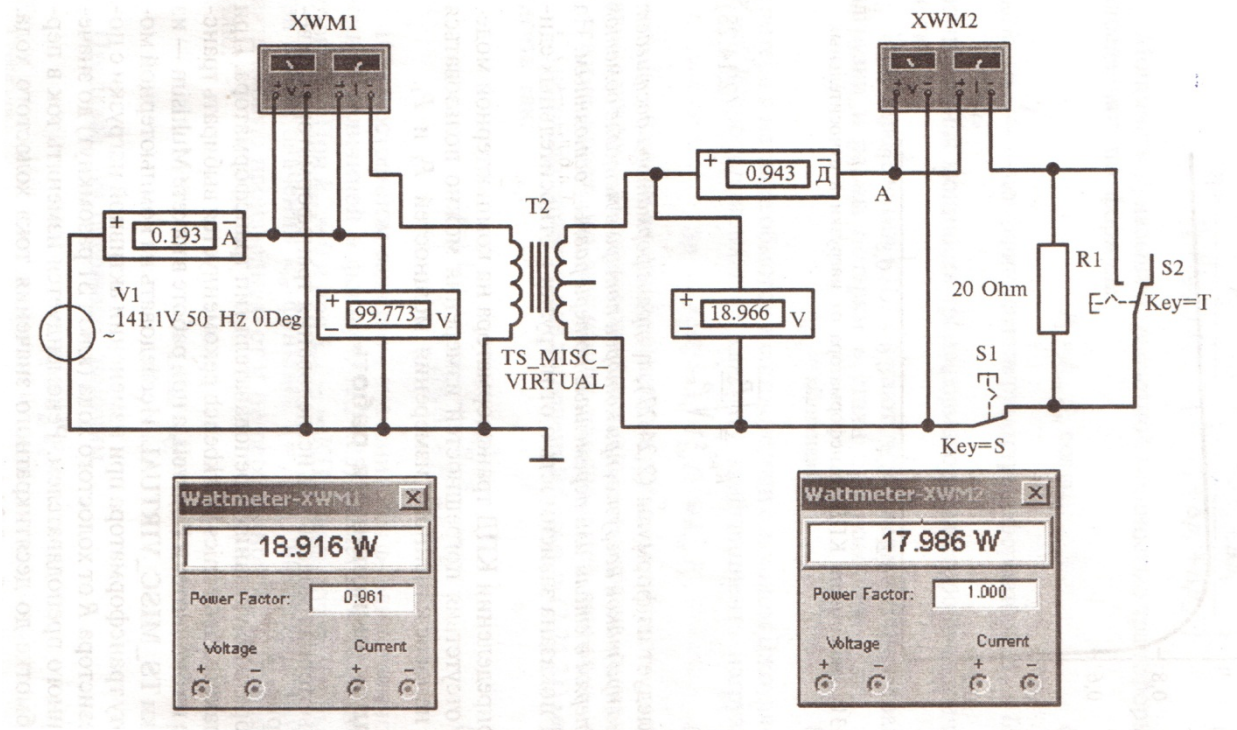


Рис.4 Компьютерная модель для исследования однофазного трансформатора