

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Базовая кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии

САРАТОВСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ИНСТИТУТА РАДИОТЕХНИКИ И  
ЭЛЕКТРОНИКИ РАН

**Е.П. СЕЛЕЗНЕВ, Б.П. БЕЗРУЧКО,**

## **МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ (ТРАНСФОРМАТОР)**

Учебно-методическое пособие

Саратов 2009

УДК 530.18

Б53

Б53 Селезнев Е.П., Безручко Б.П.,. Магнитные цепи (трансформатор). Учебно-методическое пособие для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий. Саратов, 2009. 34 с.

Рецензент: д.ф.-м.н. Пономаренко В.И..

© Селезнев Е.П., Безручко Б.П. 2009

Даются основные теоретические представления об однофазных трансформаторах, устройстве, принципе работы, основных параметрах, методах измерения параметров. В приложении представлен метод расчета однофазного трансформатора. Предлагаются практические задания для расчета и эксперимента с однофазным трансформатором.

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

## СОДЕРЖАНИЕ.

СОДЕРЖАНИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.....	6
ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	9
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	12
ЛИТЕРАТУРА.....	13

[Примечание](#) . ПРИМЕР РАСЧЕТА ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

..... Ошибка! Закладка не определена.

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

## ВВЕДЕНИЕ.

**Цель работы:** Ознакомиться с устройством и принципом работы однофазного трансформатора, получить навыки исследования работы однофазных трансформаторов.

**Трансформатором** называется статическое (т.е. без движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования одного переменного напряжения в другое (или другие) напряжение той же частоты. Трансформатор имеет не менее двух обмоток с общим магнитным потоком, которые электрически изолированы друг от друга (за исключением автотрансформаторов). Для усиления индуктивной связи и снижения влияния вихревых токов в большинстве трансформаторов обмотки размещаются на магнитопроводе, собранном из листовой электротехнической стали (рис.1). Магнитопровод отсутствует лишь в воздушных трансформаторах, которые применяются при частотах свыше 20 кГц, при которых магнитопровод все равно практически не намагничивается из-за значительного увеличения вихревых токов.

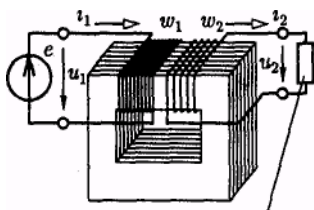


Рис.1.

Обмотка трансформатора, присоединенная к источнику питания (сеть электроснабжения, генератор), называется *первичной*. Соответственно первичными именуется все величины, относящиеся к этой обмотке, — число витков, напряжение, ток и т.д. Буквенные обозначения их снабжаются индексом 1, например  $w_1$ ,  $u_1$ ,  $i_1$  (см. рис.1). Обмотка, к которой подключается приемник (потребитель электроэнергии), и относящиеся к ней величины называются *вторичными* (индекс 2). Различают однофазные (для цепей однофазного тока) и трехфазные (для трехфазных цепей) трансформаторы. У трехфазного трансформатора *первичной* или *вторичной* обмоткой принято называть соответственно совокупности трехфазных обмоток одного напряжения. Рассмотрим работу однофазного двухобмоточного трансформатора.

На рис.2 приведена принципиальная конструкция однофазного трансформатора. Со стороны вторичной обмотки, содержащей  $w_2$  витков, т. е. для приемника с сопротивлением нагрузки  $R_2$ , трансформатор является источником электроэнергии, а со стороны первичной обмотки, содержащей  $w_1$  витков, — приемником энергии от источника питания.

Рассмотрим принцип действия однофазного трансформатора. Предположим сначала, что цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута и при действии источника напряжения  $u_1 = e$  ток в первичной обмотке равен  $i_1$ . Магнитодвижущая сила (МДС)  $i_1 w_1$  возбуждает в магнитопроводе магнитный

поток, положительное направление которого определяется правилом буравчика. Этот магнитный поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $e_{L1}$  и во вторичной обмотке – ЭДС взаимной индукции  $e_{M2}$ . После замыкания цепи вторичной обмотки под действием ЭДС взаимной индукции  $e_{M2}$  в приемнике с сопротивлением нагрузки  $R_2$  возникнет ток  $i_2$ .

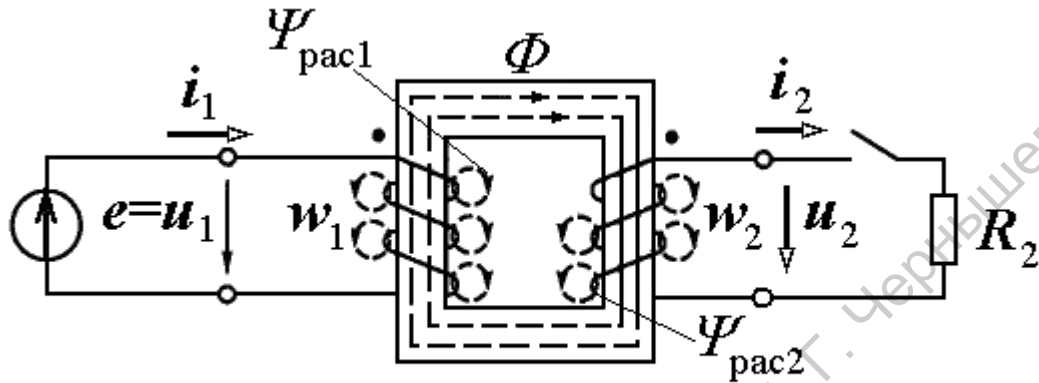


Рис.2.

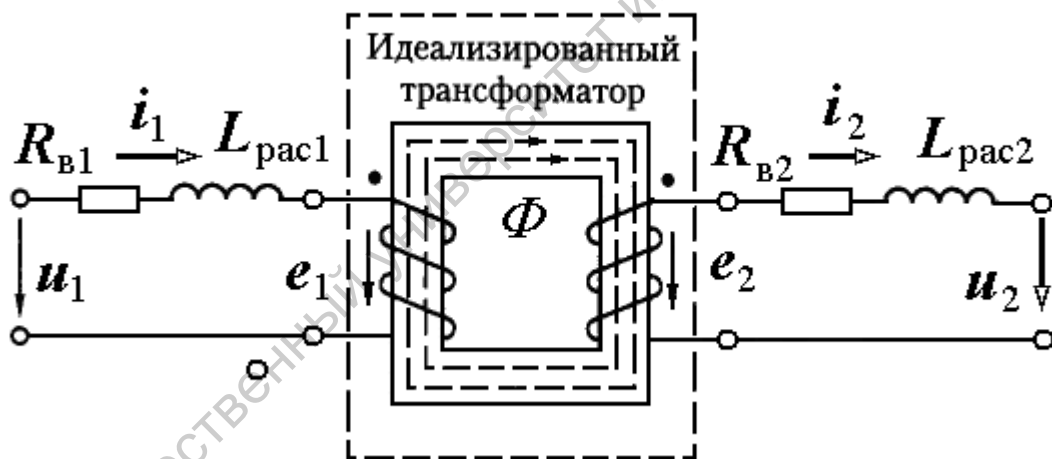


Рис.3.

Для указанных на рис.2 направлений намотки первичной и вторичной обмоток и выбранных положительных направлений токов  $i_1$  и  $i_2$ , МДС  $i_2 w_2$  возбуждает в магнитопроводе поток, направленный навстречу магнитному потоку от действия МДС  $i_1 w_1$ . Следовательно, первичная и вторичная обмотки рассматриваемого трансформатора включены встречно, что условно обозначается разметкой выводов обмоток. Поэтому суммарная МДС первичной и вторичной обмоток равна  $i_1 w_1 - i_2 w_2$ . Эта МДС возбуждает в магнитопроводе общий магнитный поток  $\Phi$ . Кроме того, при анализе работы трансформатора нужно учесть потокоцепления рассеяния первичной  $\Psi_{рас1}$  и вторичной  $\Psi_{рас2}$  обмоток, которые пропорциональны соответственно токам  $i_1$  и  $i_2$ .

На рис.3 показана схема замещения трансформатора с активными сопротивлениями первичной  $R_{B1}$  и вторичной  $R_{B2}$  обмоток и их индуктивностями

рассеяния  $L_{pac1} = \Psi_{pac1} / i_1$  и  $L_{pac2} = \Psi_{pac2} / i_2$ . Трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого не имеют активных сопротивлений и потокосцеплений рассеяния, называется *идеализированным трансформатором*. На рис.2б идеализированный трансформатор выделен штриховой линией.

Положительные направления ЭДС  $e_1$  и тока  $i_1$  в его первичной обмотке совпадают, как и у катушки с магнитопроводом, в которую превращается трансформатор при разомкнутой цепи вторичной обмотки.

Так как ЭДС в первичной  $e_1 = -w_1 d\Phi / dt$  и вторичной  $e_2 = -w_2 d\Phi / dt$  обмотках трансформатора индуктируются одним и тем же магнитным потоком  $\Phi$  в магнитопроводе, то положительные направления этих ЭДС относительно одноименных выводов обеих обмоток одинаковые.

Если в цепи первичной обмотки ЭДС  $e_1$  и ток  $i_1$  совпадают по направлению (правило правоходового буравчика для тока, потока и ЭДС), то в цепи вторичной обмотки направление тока  $i_2$  выбрано противоположным направлению ЭДС  $e_2$ . Это способствует физическому представлению о различной роли ЭДС: в первом случае ЭДС препятствует изменению тока, а во втором возбуждает ток.

## ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

На рис.4 приведена блок-схема экспериментальной установки. Она включает в себя измерительный модуль, генератор стандартных сигналов типа ГЗ–112, усилитель типа У7–5 и осциллограф типа С1–103.

В измерительном модуле (рис.5) расположены элементы электрических схем: трансформатор, токовый резистор, нагрузочный резистор и интегрирующая  $RC$  цепь, а также к нему прилагаются соединительные провода.

На рис.5 представлена принципиальная схема измерительного модуля. Усиленный усилителем У7–5 гармонический сигнал генератора ГЗ–112 подается на первичную обмотку трансформатора Тр1. Резистор  $R_1$  является токовым, напряжение на нем пропорционально силе тока в первичной обмотке трансформатора  $U_{R1} = I_1 R_1$ . Напряжение со вторичной обмотки трансформатора Тр1 поступает на последовательное соединение резисторов  $R_2$  и  $R_3$ , которые в сумме являются нагрузочным сопротивлением. Мощность, потребляемая трансформатором можно определить как  $P_1 = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi}{2}$ , где  $P_1$  – мощность, потребляемая трансформатором,  $U_1$  – амплитуда напряжения на первичной обмотке трансформатора,  $I_1$  – амплитуда силы тока в первичной обмотке трансформатора,  $\varphi$  – сдвиг между током и напряжением первичной обмотки.

Мощность, выделяемая в нагрузке, определяется как  $P_2 = \frac{U_2^2}{2(R_2 + R_3)}$ , где  $U_2$  – амплитуда напряжения на резисторе  $R_2$ . Коэффициент полезного действия трансформатора равен  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ .

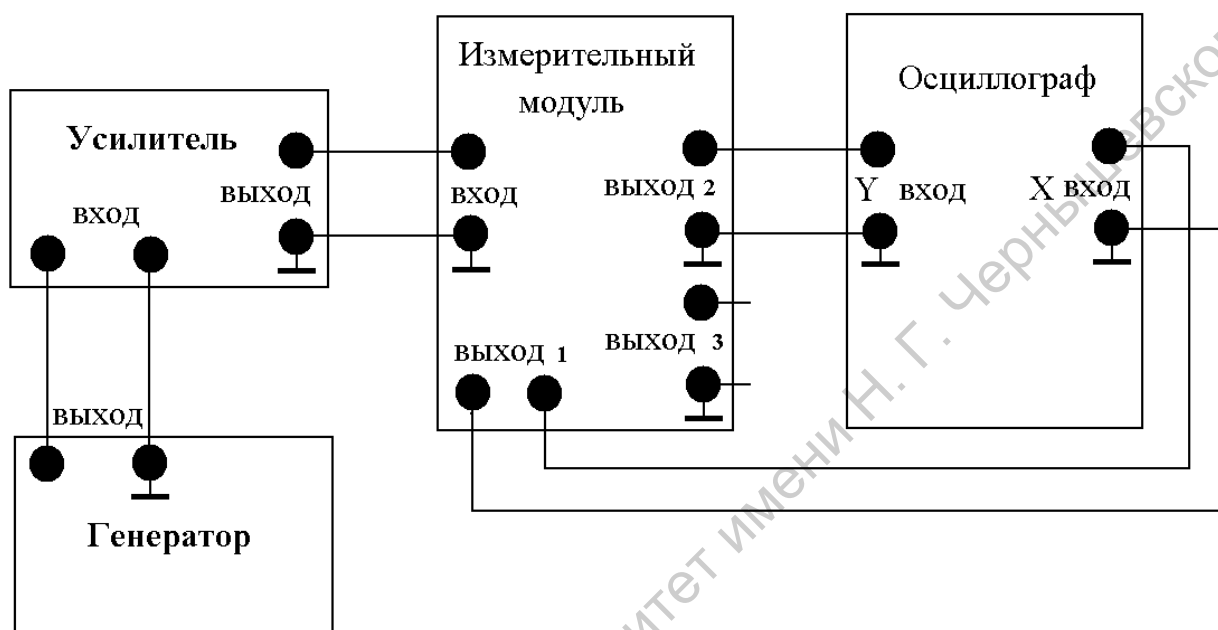


Рис.4.

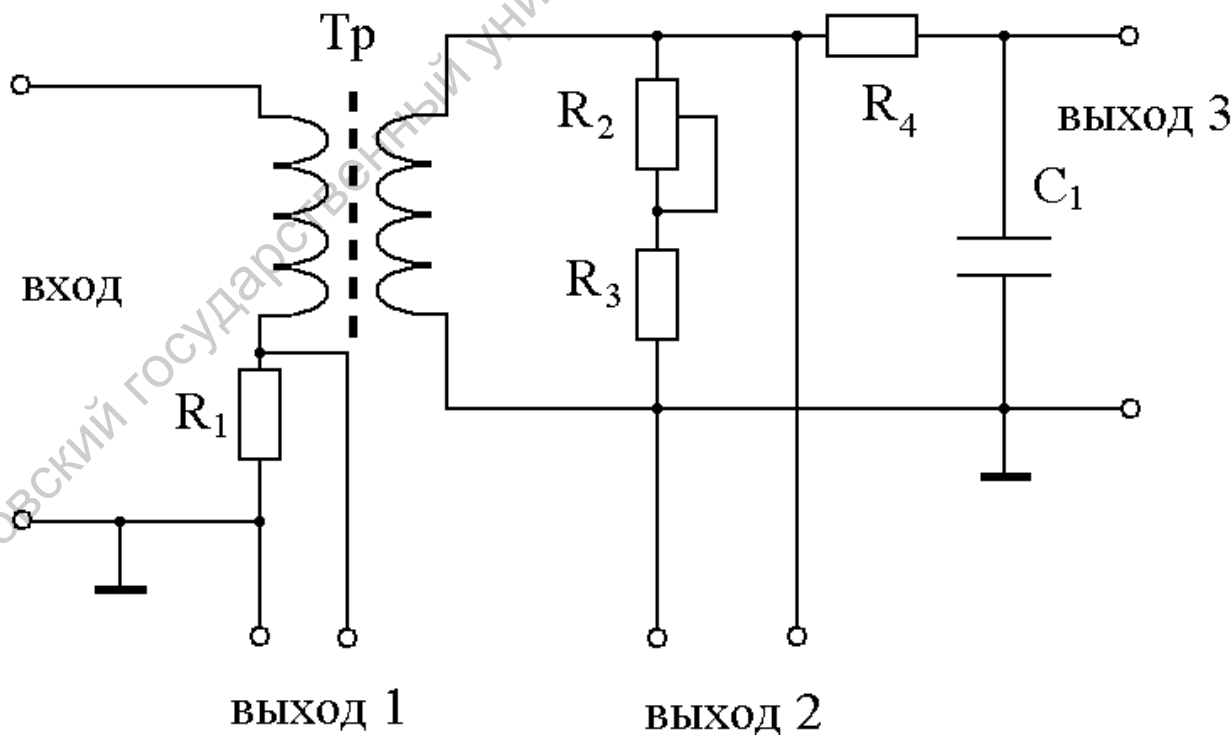


Рис.5.

Коэффициент трансформации можно определить с одной стороны как отношение количества витков вторичной и первичной обмоток

трансформатора  $\frac{N_2}{N_1}$ , а с другой кок отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформатора  $\frac{U_2}{U_1}$ . Если  $\frac{N_2}{N_1} > 1$ , то трансформатор называется повышающим, если  $\frac{N_2}{N_1} < 1$ , то трансформатор называется понижающим.

Интегрирующая цепь  $R_4C_1$  необходима для наблюдения на экране осциллографа кривой намагниченности сердечника трансформатора. Трансформатор изготовлен на основе Ш-образных трансформаторных пластин из электротехнической стали.

Для измерения сдвига фаз используется метод фигур Лиссажу. Для этого  $X$  – вход осциллографа подключается к выходу измерительного модуля и, соответственно, на него подается выходной сигнал изучаемой цепи, а  $X$  – вход к выходу генератора, соответственно, на него поступает входной сигнал. В случае, когда сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями равен нулю, на экране осциллографа наблюдается отрезок прямой линии. При ненулевом сдвиге фаз на экране осциллографа наблюдается эллипс (рис.6). С помощью регуляторов постоянного смещения луча, эллипс смещается таким образом, что его центр совпадает с центром масштабной сетки осциллографа. Затем определяются: расстояние между точками пересечения эллипса с горизонтальной осью  $U_1$  и его максимальная  $U_2$ . Тангенс угла сдвига фаз определяется  $\sin \varphi = \frac{U_1}{U_2}$ .

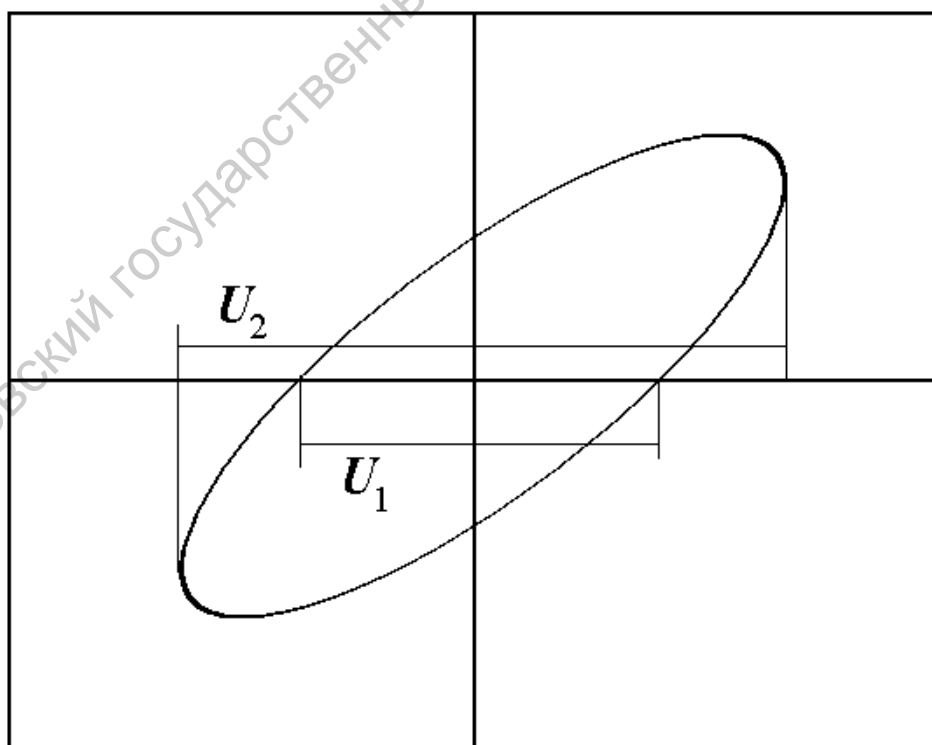


Рис.6.



## ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием лабораторного стенда, занести в отчет по лабораторной работе технические характеристики исследуемого трансформатора.

**Задание 1. Определение основной кривой намагничивания сердечника трансформатора.**

1. Ознакомиться с описанием установки и методами измерения.
2. Установить органы управления на панелях осциллографа положение, обеспечивающее измерение амплитуда и развертку во времени переменного напряжения. Тумблер сигнала синхронизации развертка установить в положение автоматической синхронизации. Подготовить к работе генератор ГЗ–112, регулятор уровня выходного сигнала повернуть в крайнее левое положение, частоту 500 Гц, коэффициент усиления усилителя – 5. Переменное сопротивление  $R_2$  установить в крайнее правое положение.

Собрать схему, представленную на рис.7. После проверки схемы преподавателем или лаборантом присоединить включить приборы тумблерами «Сеть». Дать приборам прогреться в течение 2-3 минут.

Установить следующие параметры выходного сигнала генератора: частота - 500 Гц, размах колебаний напряжения генератора 1 В. Получить устойчивое изображение сигнала генератора на экране. Установить такую длительность развертки, при которой на экране наблюдается 2-3 периода исследуемого сигнала. Отрегулировать окончательно вертикальный размер, изображения сигнала генератора на экране осциллографа с помощью ручки плавной регулировки выходного напряжения генератора. Этот размер изображения сигнала генератора рекомендуется поддерживать постоянным при всех измерениях. Включить осциллограф в режиме измерения X–Y. На экране осциллографа должна наблюдаться кривая намагниченности ферритового сердечника. Исследовать вид кривой в зависимости от амплитуды и частоты генератора. Значение амплитуды изменять в пределах от 0.5 до 2 В, частоты – от 10 до 5000 Гц. Результаты наблюдений перенести на кальку.

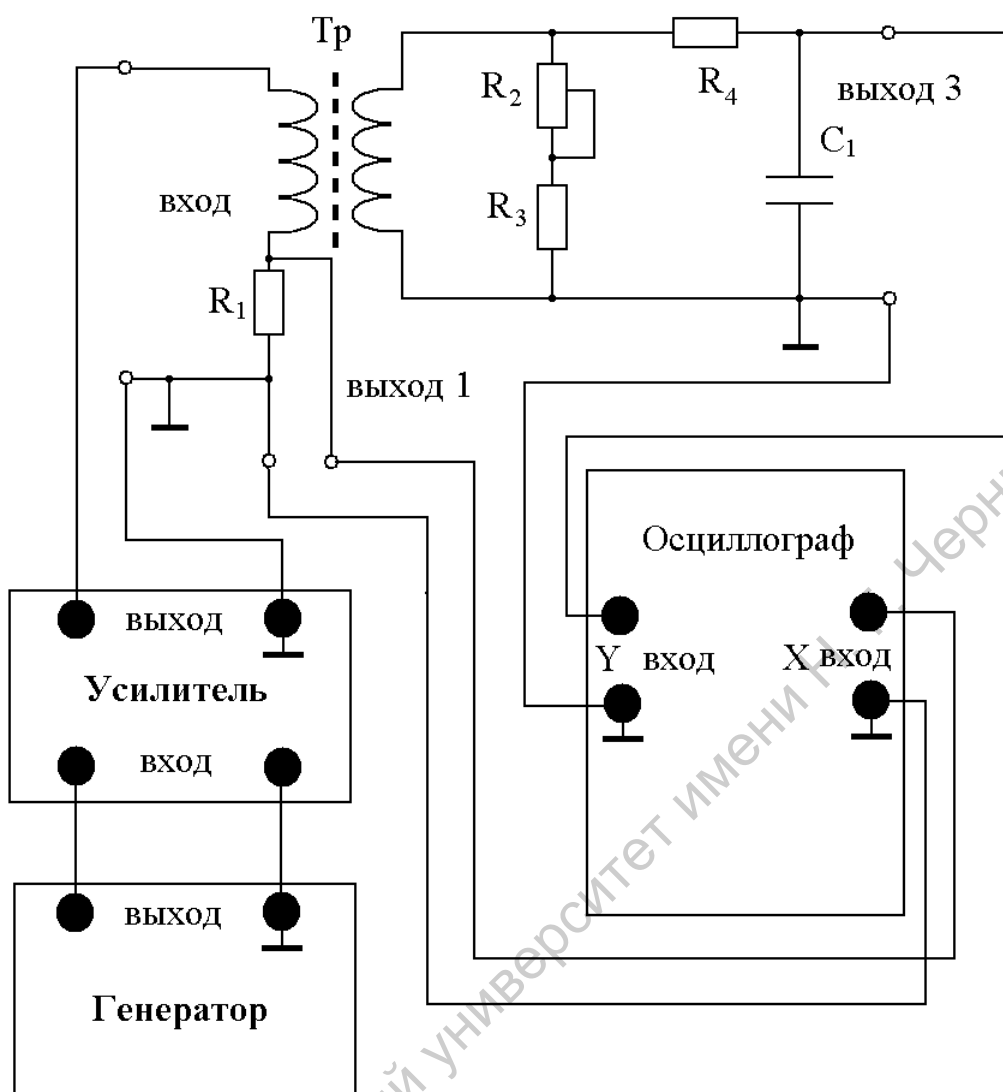


Рис.7.

**Задание 2.** Оценка работы перемагничивания  $A_n$  за один цикл.

1. Получить максимальную петлю гистерезиса и зарисовать на кальке в координатах  $X$ – $Y$ .
2. Скопировать эту петлю на миллиметровую бумагу, измерить ее площадь.
3. Определить работу перемагничивания за один цикл по формуле

$$A_n = \frac{N_1 R_2 C_1 k_x k_y}{2\pi r N_2 S_2} S_1$$

где  $N_1$  – число витков первичной обмотки,  $N_2$  – число витков вторичной обмотки,  $k_x$  – коэффициент отклонения осциллографа по оси  $X$ ,  $k_y$  – коэффициент отклонения осциллографа по оси  $Y$ ,  $r$  – средний радиус сердечника,  $S_2$  – площадь поперечного сечения сердечника,  $S_1$  – площадь петли гистерезиса.

**Задание 3.** Определение коэрцитивной силы.

1. По максимальной петле гистерезиса найти координату  $x$ , соответствующую коэрцитивной силе.

2. По формуле

$$H_c = \frac{N_1 k_x x}{2\pi r R_1} = \alpha k_x x$$

рассчитать коэрцитивную силу.

3. По полученному значению определить группу ферромагнетика (мягкий или жесткий).

**Задание 4.** Определение нагрузочных параметров трансформатора.

Провести опыт холостого хода исследуемого однофазного трансформатора, для этого собрать схему, показанную на рис. 8.

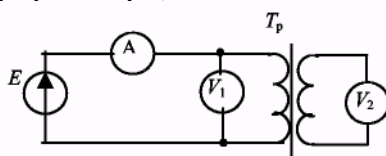
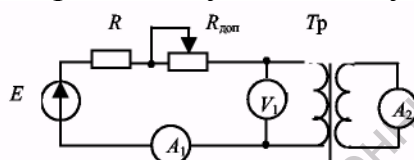


Рис.8.

Определить ток холостого хода в первичной обмотке, напряжение холостого хода на вторичной обмотке, напряжение холостого хода на первичной обмотке.

Осуществить режим нагрузки однофазного трансформатора путем включения во вторичную цепь нагрузочных сопротивлений различных номиналов.

Провести опыт короткого замыкания однофазного трансформатора, для этого собрать схему, показанную на рис. 9.



Определить ток короткого замыкания.

**Задание 5.** Определение коэффициента полезного действия.

1. Выключить приборы. Установить органы управления на панелях осциллографа положение, обеспечивающее измерение амплитуда и развертку во времени переменного напряжения. Тумблер сигнала синхронизации развертка установить в положение автоматической синхронизации. Подготовить к работе генератор ГЗ–112, регулятор уровня выходного сигнала повернуть в крайнее левое положение, частоту 500 Гц. Переменное сопротивление  $R_2$  установить в крайнее левое положение. Собрать схему, представленную на рис.9. После проверки схемы преподавателем или лаборантом присоединить включить приборы тумблерами «Сеть». Дать приборам прогреться в течение 2-3 минут.

2. Установить амплитуду напряжения на входе равной 10 В. Определить амплитуду напряжения на выходе 2.

3. Подключить вход X осциллографа к выходу 1 модуля и определить методом фигур Лиссажу сдвиг фаз между током и напряжением на первичной обмотке трансформатора.

4. По формулам определить мощности сигнала на входе и выходе трансформатора. Определите коэффициент полезного действия трансформатора.

5. Повторите пункты 1–4 для пар значений параметров напряжения на входе измерительного модуля: а) напряжение 10В, частота 50 Гц

**Задание 6. Изучение зависимости силы тока первичной обмотки трансформатора от силы тока нагрузки.**

Задать постоянное напряжение на входе трансформатора. Установить регулятор переменного сопротивления  $R_2$  в крайнее правое положение. Плавно уменьшая сопротивление  $R_2$ , снять зависимость (с помощью осциллографа) амплитуды тока первичной обмотки от амплитуды тока вторичной обмотки трансформатора.

Оформить все полученные результаты в виде таблиц и графиков, дать объяснение полученным результатам.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какова причина спонтанной намагниченности доменов в ферромагнетиках?

2. Как ведут себя домены при увеличении напряженности внешнего магнитного поля? Что означает насыщение ферромагнетика?

3. В чем заключается явление магнитного гистерезиса?

4. Что такое трансформатор, для чего он используется?

5. Опишите устройство и принцип работы трансформатора.

6. Что такое коэффициент трансформации, как он определяется и от чего зависит?

7. Какие параметры трансформатора определяются в опыте холостого хода?

8. Какие параметры трансформатора определяются в опыте короткого замыкания?

9. Какие потери энергии возникают в трансформаторе в процессе передачи электрической энергии из первичной обмотки во вторичную?

10. В каких случаях применяется параллельная работа трансформаторов, и какие условия при этом должны быть соблюдены?

11. В чем заключаются особенности эксплуатации измерительных трансформаторов?

12. Каким образом ток нагрузки влияет на напряжение вторичной обмотки трансформатора?

13. Трансформатор – это усилитель?

14. Коэффициент полезного действия трансформатора, от чего он зависит?

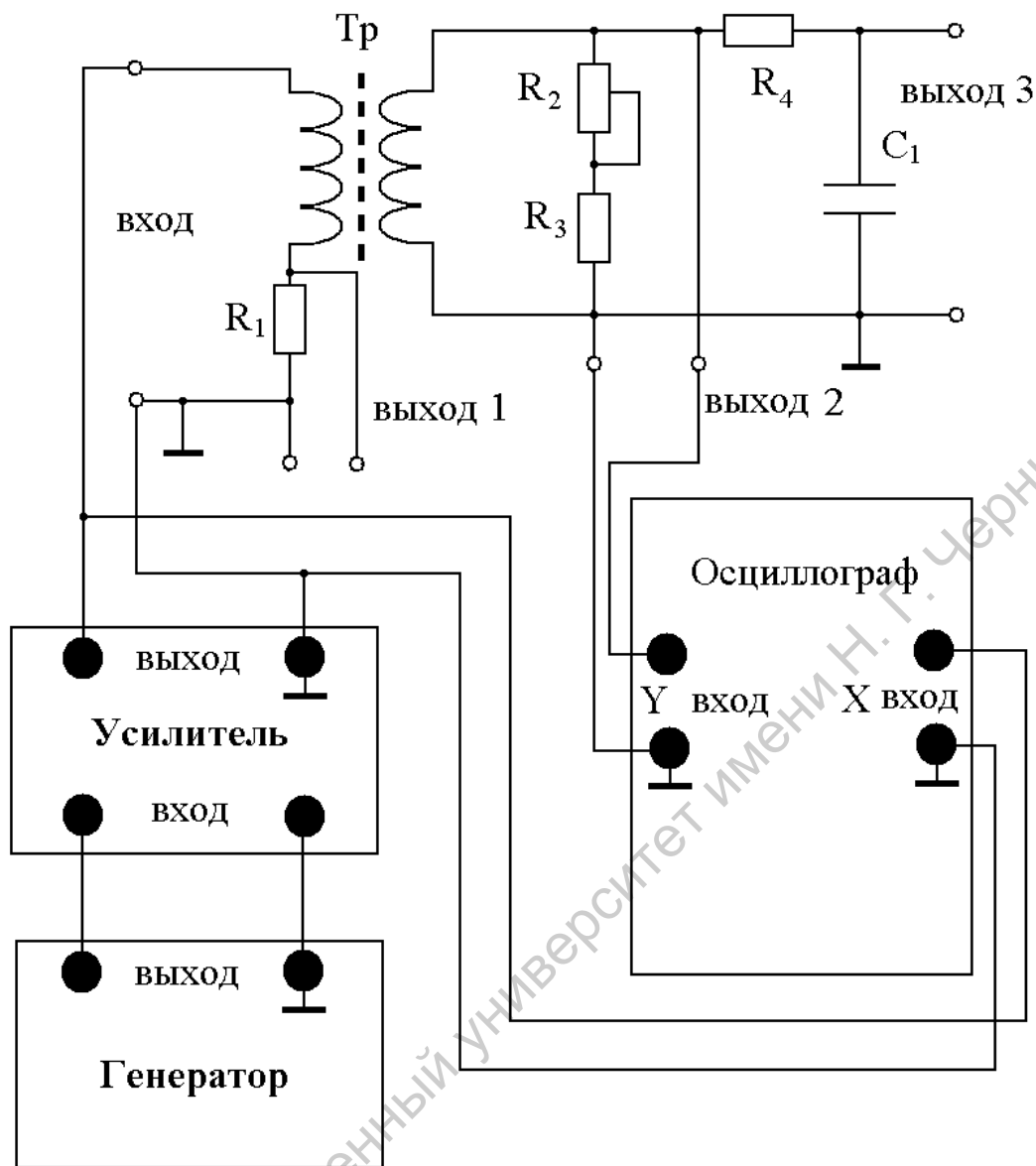


Рис.9.

## ЛИТЕРАТУРА.

- 1 Электротехника и основы электроники / Под ред. О.П. Глудкина, Б.П. Соколова. М.: Высш. школа, 1993, 445 с.
- 2 Касаткин А.С., Немцов Н.М. Электротехника. М.: Высшая школа, 2002. 542 с.
- 3 Панфилов Д.И. и др. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench. М.: Додека, 1999. 304 с.
- 4 Электротехника / Под ред. В.С. Пантюшина. М.: Высш. шк., 1976. 560 с.
- 5 <http://www.twirpx.com/file/14680/>