

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Оренбургский государственный университет"

Кафедра общей физики

А.А. Чакак, А.В. Михайличенко

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Оренбургский государственный университет" в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по естественнонаучным и техническим специальностям и направлениям подготовки

Оренбург
2012

УДК 621.314.21 (076.5)

ББК 31.261.8я 7

Ч 16

Рецензент – кандидат физико-математических наук, доцент А.Г. Четверикова

Чакак, А.А.

Ч 16 Принцип действия трансформатора: методические указания к лабораторным работам / А.А. Чакак, А.В. Михайличенко, Оренбургский гос. ун-т – Оренбург: ОГУ, 2012. – 20 с.

Методические указания предназначены для студентов естественно-научных и технических специальностей и направлений подготовки, выполняющих лабораторные работы по курсу общей физики. В указаниях рассмотрены процессы, происходящие в трансформаторе. Указания включают теоретическое изложение материала, описание методики проведения опыта и контрольные вопросы для самоподготовки.

Методические указания рекомендованы к изданию кафедрой общей физики ОГУ.

УДК 621.314.21 (076.5)

ББК 31.261.8я 7

© Чакак А.А.,

© Михайличенко А.В., 2012

© ОГУ, 2012

Содержание

1 Принцип действия трансформатора	4
2 Измерения и обработка результатов измерений	10
2.1 Задание 1. Исследование работы трансформатора в режиме холостого хода	10
2.2 Задание 2. Исследование работы трансформатора в режиме короткого замыкания	13
2.3 Задание 3. Исследование работы трансформатора при нагрузке	15
3 Контрольные вопросы	19
4 Литература, рекомендуемая для изучения физики	20

1 Принцип действия трансформатора

Главное преимущество переменного тока над постоянным – простота и эффективность, с которыми переменное напряжение можно повышать и понижать. Потери энергии на нагревание проводов прямо пропорциональны квадрату силы тока в линии электропередачи. При передаче электроэнергии заданной мощности на большие расстояния потери из-за выделения джоулева тепла можно уменьшить, повышая напряжение и уменьшая силу тока. Мощность тока равна произведению силы тока на напряжение. Чтобы при уменьшении силы тока в линии не уменьшалась передаваемая мощность, следует увеличить напряжение во столько же раз, во сколько раз была уменьшена сила тока.

При высоком напряжении переменный ток передаётся на большие расстояния с малыми потерями, но для использования на промышленных предприятиях, транспорте, в быту необходимо понижение напряжения. Повышение и понижение напряжения переменного тока при неизменной частоте осуществляется трансформаторами.

Электрический трансформатор – это устройство, преобразующее при неизменной частоте переменный ток одного напряжения, в переменный ток другого напряжения. Он состоит из сердечника (магнитопровода) и изолированных обмоток, охватываемых общим магнитным потоком.

Трансформатор был изобретён в 1875 г. русским электротехником П.Н. Яблочковым (1847 – 1894) и усовершенствован русским физиком И.Ф. Усагиным. В отличие от электрических машин, трансформатор не имеет движущихся частей, поэтому он не имеет и механических потерь при работе. К потерям, имеющим место при работе трансформатора, относятся потери на гистерезис (в результате постоянного циклического перемагничивания сердечника), на вихревые токи и на нагревание проводов обмоток. Других потерь в трансформаторе практически нет.

Простейший трансформатор имеет сердечник (обычно замкнутой формы) из мягкого железа или иного магнитно-мягкого ферромагнетика, на который намотано две обмотки изолированной проволоки (рисунок 1). Обмотку, подключён-

ную к сети питающего переменного тока (вход трансформатора), называют первичной, другую, к которой подключают нагрузку R , – вторичной. На рисунке приняты следующие обозначения: N_1 и r_1 – число витков и сопротивление первичной обмотки; N_2 и r_2 – число витков и сопротивление вторичной обмотки; R –

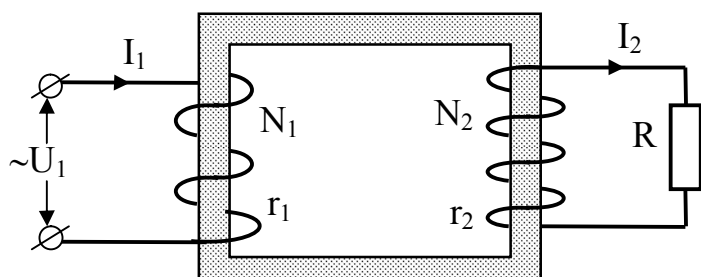


Рисунок 1

сопротивление нагрузки (потребителя электрической энергии); U_1 – входное напряжение (напряжение на первичной обмотке). Сердечник трансформатора (магнитопровод) собирают из отдельных тонких пластин, изолированных друг от друга

слоем лака, с целью уменьшения вихревых токов в нём, т.е. для снижения потерь энергии на нагревание сердечника. Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. ЭДС электромагнитной индукции, возникающая во вторичной обмотке, пропорциональна числу витков в ней, и поэтому, изменяя это число витков, можно изменять в широких пределах напряжение на выходе трансформатора.

Вначале рассмотрим **режим холостого хода**, когда концы вторичной обмотки разомкнуты (т.е. $R \rightarrow \infty$). В этом случае ток во вторичной цепи $I_2 = 0$, а по первичной обмотке трансформатора протекает небольшой **ток холостого хода** I_x за счёт подключенного к концам первичной обмотки источника переменного тока, а в сердечнике создаётся переменный магнитный поток. Изменяющийся магнитный поток в каждом витке любой из обмоток создаёт одинаковую ЭДС индукции \mathcal{E}_0 . Так как витки в каждой из обмоток соединены последовательно, то ЭДС, возникающая в каждой обмотке, будет пропорциональна числу витков в ней:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_0 N_1 \quad \text{и} \quad \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_0 N_2.$$

Поделив почленно эти два равенства, получаем:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k,$$

где коэффициент k , равный отношению числа витков в первичной – N_1 и вторичной – N_2 обмотках, называют **коэффициентом трансформации**.

Так как вторичная цепь трансформатора разомкнута, напряжение на концах вторичной обмотки $U_2 = \mathcal{E}_2$. Для первичной обмотки согласно закону Ома справедливо равенство:

$$U_1 - \mathcal{E}_1 = I_x r_1.$$

В режиме холостого хода $I_x \approx 0$ и поэтому $I_x r_1 \approx 0$. Следовательно, $U_1 = \mathcal{E}_1$, т.е. при холостом ходе ЭДС самоиндукции в первичной обмотке равна поданному на нее напряжению сети переменного тока, в которую включён трансформатор.

С учётом сказанного для коэффициента трансформации можно написать соотношение:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k,$$

из которого следует, что напряжения на обмотках трансформатора пропорциональны числу витков в них. Если число витков в первичной обмотке больше, чем во вторичной ($N_1 > N_2$), то напряжение во вторичной обмотке ниже, чем в первичной ($U_2 < U_1$). Такой трансформатор называют **понижающим**. И, наоборот, при $N_1 < N_2$ получаем $U_2 > U_1$, а трансформатор называют **повышающим**.

Если вторичную обмотку замкнуть на нагрузку R , имеем **режим рабочего хода**. В этом случае по вторичной обмотке протекает ток I_2 . Ток I_2 создаёт свое магнитное поле и, соответственно, свой магнитный поток, который по правилу Ленца противодействует изменению магнитного потока в сердечнике трансформатора, созданного током I_1 , протекающим в первичной обмотке. Уменьшение скорости изменения магнитного потока приводит к уменьшению ЭДС самоиндукции в первичной обмотке. Как видно из формулы, написанной выше,

$$U_1 - \mathcal{E}_1 = I_x r_1.$$

Уменьшение \mathcal{E}_1 приводит к увеличению силы тока в первичной обмотке от I_x до $I_1 \gg I_x$. Возросший ток I_1 в первичной обмотке компенсирует действие встречного магнитного потока, созданного током I_2 . При этом возрастает потребление энергии трансформатором из сети переменного тока, и эта энергия передаётся потребителям во вторичную цепь.

Найдём соотношение между I_1 и I_2 . В установившемся режиме работы трансформатора обмотки охватывает один и тот же магнитный поток, т.е. $\Phi_1 = \Phi_2$:

$$B_1 S_1 = B_2 S_2,$$

или

$$\mu\mu_0 \frac{N_1}{l} I_1 S = \mu\mu_0 \frac{N_2}{l} I_2 S,$$

где l – длина обмотки,

S – ее сечение,

μ_0 – магнитная постоянная,

μ – магнитная проницаемость сердечника.

Из последнего выражения следует, что

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad \text{или} \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Таким образом, нагрузочные силы токов в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числу витков в них.

Если вторичная обмотка нагружена активным сопротивлением (R), то ток в ней изменяется в одинаковой фазе с вторичной ЭДС. Ток, потребляемый первич-

ной обмоткой, также находится в фазе с внешней ЭДС, питающей первичную обмотку. В идеальном трансформаторе, где потери энергии не происходит, мощность в первичной цепи трансформатора равна мощности во вторичной цепи, т.е.

$$U_1 I_1 = U_2 I_2, \quad \text{откуда} \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

В этом случае эффективные сопротивления первичной обмотки $\left(R_1 = \frac{U_1}{I_1} \right)$ и вторичной обмотки $\left(R_2 = \frac{U_2}{I_2} \right)$ связаны соотношением:

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2.$$

Действительно,

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\left(\frac{N_1}{N_2} \right) U_2}{\left(\frac{N_2}{N_1} \right) I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{U_2}{I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2,$$

откуда и можно выразить искомое выражение. Таким образом, повышающий трансформатор заменяет сопротивление вторичной цепи на меньшее эффективное сопротивление первичной обмотки. И, наоборот.

Для вторичной обмотки также справедлив закон Ома:

$$U_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 r_2.$$

В реальных трансформаторах происходят потери, связанные с нагреванием обмоток, потери на перемагничивание сердечника, потери на нагревание сердеч-

ника токами Фуко. У хорошо сбалансированных трансформаторов эти потери не превышают 2-3 %, а КПД мощных трансформаторов превышает 99 %. **Коэффициентом полезного действия трансформатора** η называют отношение полезной мощности, т.е. мощности, отдаваемой потребителю P_2 , к затраченной, т.е. мощности, отбираемой трансформатором от сети переменного тока P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}.$$

Трансформаторы играют огромную роль в современной электротехнике. В мощных линиях электропередачи (ЛЭП) в настоящее время почти исключительно применяют высокие напряжения (тысячи и десятки тысяч вольт). Это позволяет уменьшить силу тока в линии, а значит, и сечение проводов, что приводит к сильному снижению стоимости сооружения линии электропередачи. Однако конструировать генераторы (так же как и различные приборы, потребляющие электрическую энергию), рассчитанные на высокие напряжения, весьма трудно, так как необходимо обеспечить хорошую изоляцию обмоток. Поэтому электрические генераторы строят на низкое напряжение и затем это напряжение увеличивают при помощи повышающих трансформаторов. В местах же потребления электроэнергии ток высокого напряжения преобразуют при помощи понижающих трансформаторов в токи низкого напряжения, на которые рассчитаны различные потребители.

Трансформаторы бывают: силовые – для передачи и распределения электроэнергии; силовые специального назначения (электросварочные, измерительные); однофазные; многофазные. Маломощные импульсные трансформаторы применяются в электронной технике. В мощных трансформаторах магнитопровод с обмоткой помещается в бак с трансформаторным маслом, которое служит для изоляции и охлаждения.

2 Измерения и обработка результатов измерений

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1 Познакомиться с процессами, происходящими в трансформаторе в режиме холостого хода. Определить коэффициент трансформации трансформатора.

2 Познакомиться с режимом рабочего хода трансформатора. Какими параметрами характеризуются трансформаторы?

3 Определить коэффициент полезного действия трансформатора при данном значении нагрузочного сопротивления. Оценить, зависит ли коэффициент полезного действия трансформатора от величины нагрузочного сопротивления.

2.1 Задание 1. Исследование работы трансформатора в режиме холостого хода.

Режим работы трансформатора, при котором его вторичная обмотка разомкнута, называют холостым режимом или холостым ходом (трансформатор работает без нагрузки). Ток холостого хода I_x обычно мал (3-6 % от номинального значения), а падение напряжения U_{x1} на внутреннем сопротивлении равно 0,125-0,2 %. На практике режим холостого хода используется для определения коэффициента трансформации k , тока холостого хода I_x и потерь в трансформаторе на гистерезис и вихревые токи, на так называемые «потери в стали».

Соберите цепь, принципиальная схема которой изображена на рисунке 2, а монтажная схема, собираемая на стенде, – на рисунке

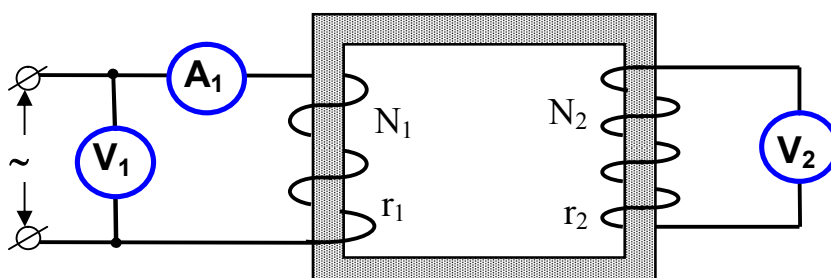


Рисунок 2

3. В качестве вольтметра V

и амперметра A используйте мультиметры. Обозначения на рисунке 24: A_1 и V_1 – амперметр и вольтметр в первичной обмотке, V_2 – вольтметр во вторичной обмотке, N_1 и r_1 – число витков первичной обмотки и ее внутреннее сопротивление,

а N_2 и r_2 – во вторичной обмотке. На монтажной схеме трансформатор обозначен символом "Тр-р".

Первичная обмотка трансформатора подключается к генератору переменного тока, расположенному на стенде, блок 1. Переключатель формы сигнала поставьте в положение " \sim ". В качестве амперметра A_1 с верхним пределом измерения 20 мА и вольтметров V_1 и V_2 с верхними пределами измерения 20 В используйте мультиметры. Величину входного напряжения U_1 и частоту ν генератора можно регулировать ручками, расположенными на стенде, блоки 2 и 3, соответственно.

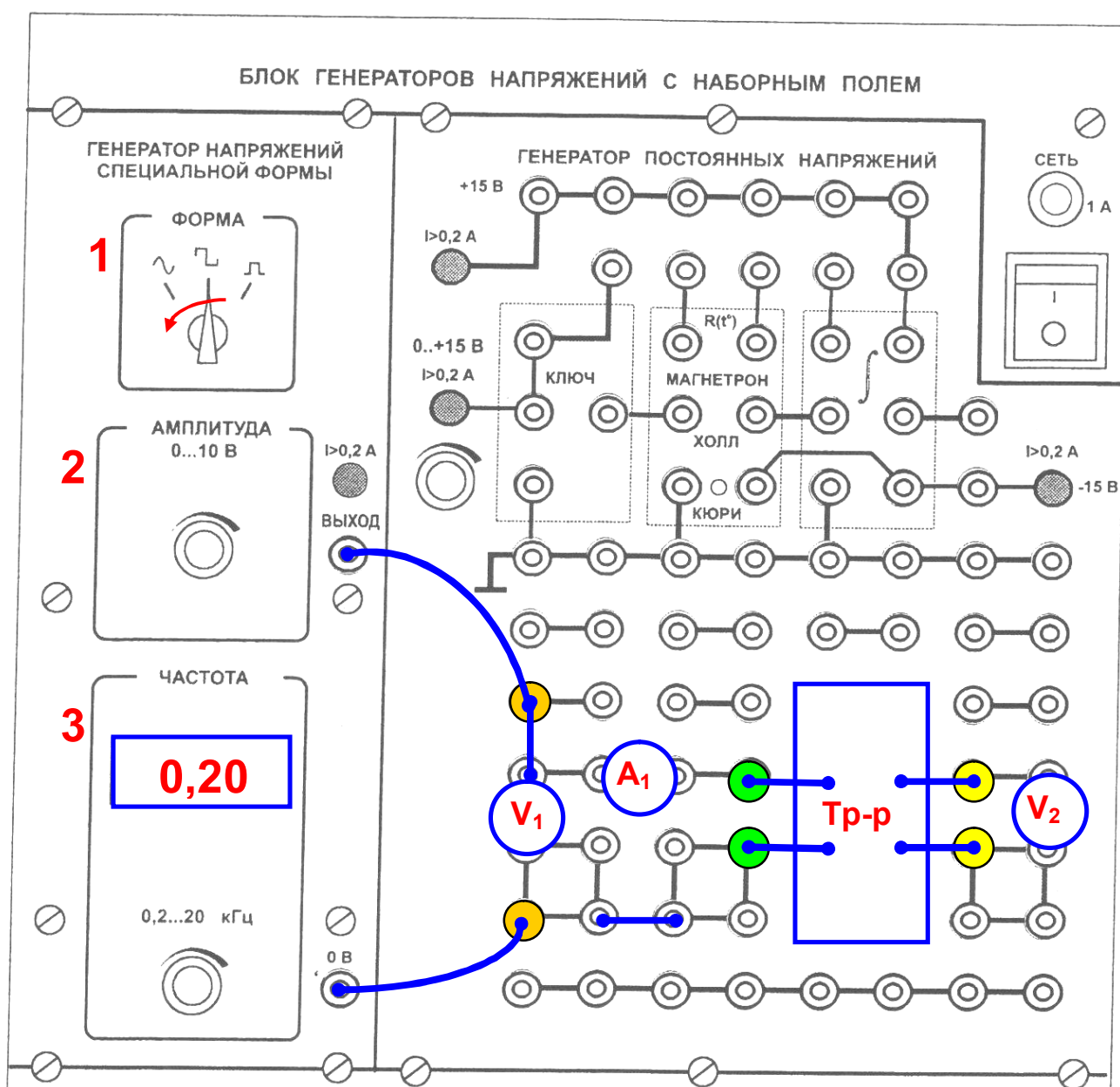


Рисунок 3

Установите частоту генератора $\nu = 0,2$ кГц. Вольтметр V_2 (его показания U_2) подключён к вторичной обмотке трансформатора. Величины активного сопротивления катушек r_1 и r_2 указаны в последней строчке таблицы 1. Также в таблице 1 записаны значения чисел витков в обмотках трансформатора $N_1 = (300 \pm 5)$ витков и $N_2 = 900$ витков.

Снимите зависимость силы тока I_1 в первичной обмотке и выходного напряжения U_2 от входного напряжения U_1 , результаты занесите в таблицу 1. При этом входное напряжение U_1 изменяйте в пределах 0-7 В.

Постройте график зависимости $U_2(U_1)$. По графику определите коэффициент трансформации данного трансформатора $k = \frac{U_1}{U_2}$. По значению k установите –

повышающий или понижающий трансформатор включён в схему. По формуле

$k = \frac{N_1}{N_2}$ сравните числа витков в обмотках трансформатора. По полученным ре-

зультатам проверьте выполнение условия: $r_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2$.

Таблица 1

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_1, \text{В}$									
$U_2, \text{В}$									
$I_1, \text{мА}$									
$\nu = 0,2$ кГц; $r_1 = 4,9$ Ом; $r_2 = 45,3$ Ом; $N_1 = (295 \pm 5)$ витков; $N_2 = 900$ витков.									

Установите значение входного напряжения $U_1 = 3-4$ В и измерьте ток I_1 в первичной обмотке. По формуле $\cos\varphi = I_1 r_1 / U_1$ определите сдвиг по фазе φ между током и напряжением в первичной обмотке. По формулам $Z = \frac{U_1}{I_1}$; $X = \sqrt{Z^2 - r_1^2}$ вычислите импеданс (полное сопротивление) Z и реактивное сопротивление X первичной обмотки: Результаты занесите в таблицу 1.

2.2 Задание 2. Исследование работы трансформатора в режиме короткого замыкания.

Соберите цепь, принципиальная схема которой изображена на рисунке 4, а монтажная схема, собираемая на стенде, – на рисунке 5. Цепь вторичной обмотки трансформатора замкнута накоротко. В качестве вольтметра V и амперметра A используйте мультиметры.

Амперметр A_2 измеряет силу тока короткого замыкания. На монтажной схеме трансформатор обозначен символом "Тр-р".

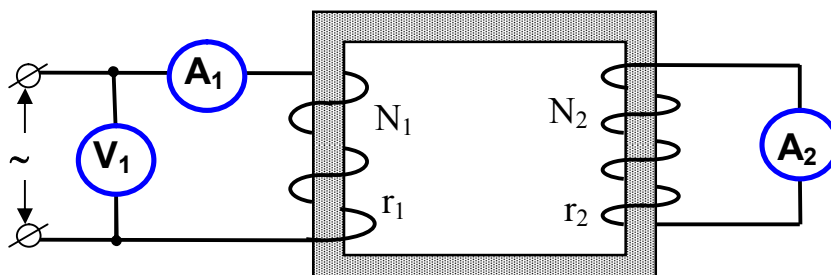


Рисунок 4

В качестве амперметра A с верхним пределом измерения 200 мА и вольтметра V с верхним пределом измерения 20 В используйте мультиметры. Величину входного напряжения U_1 и частоту ν генератора можно регулировать ручками, расположенными на стенде, блоки 2 и 3, соответственно. Установите частоту генератора $\nu = 0,2$ кГц. Снимите зависимость силы тока I_1 в первичной обмотке от величины входного напряжения U_1 ; результаты измерений занесите в таблицу 2. Значения входного напряжения U_1 изменяйте в пределах от 0 до 7 В.

Таблица 2

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_1, \text{В}$									
$I_1, \text{мА}$									
$\cos \varphi$									
$Z, \text{Ом}$									
$X, \text{Ом}$									
$\nu = 0,2$ кГц; $r_1 = 4,9$ Ом; $r_2 = 45,3$ Ом; $N_1 = (295 \pm 5)$ витков; $N_2 = 900$ витков.									

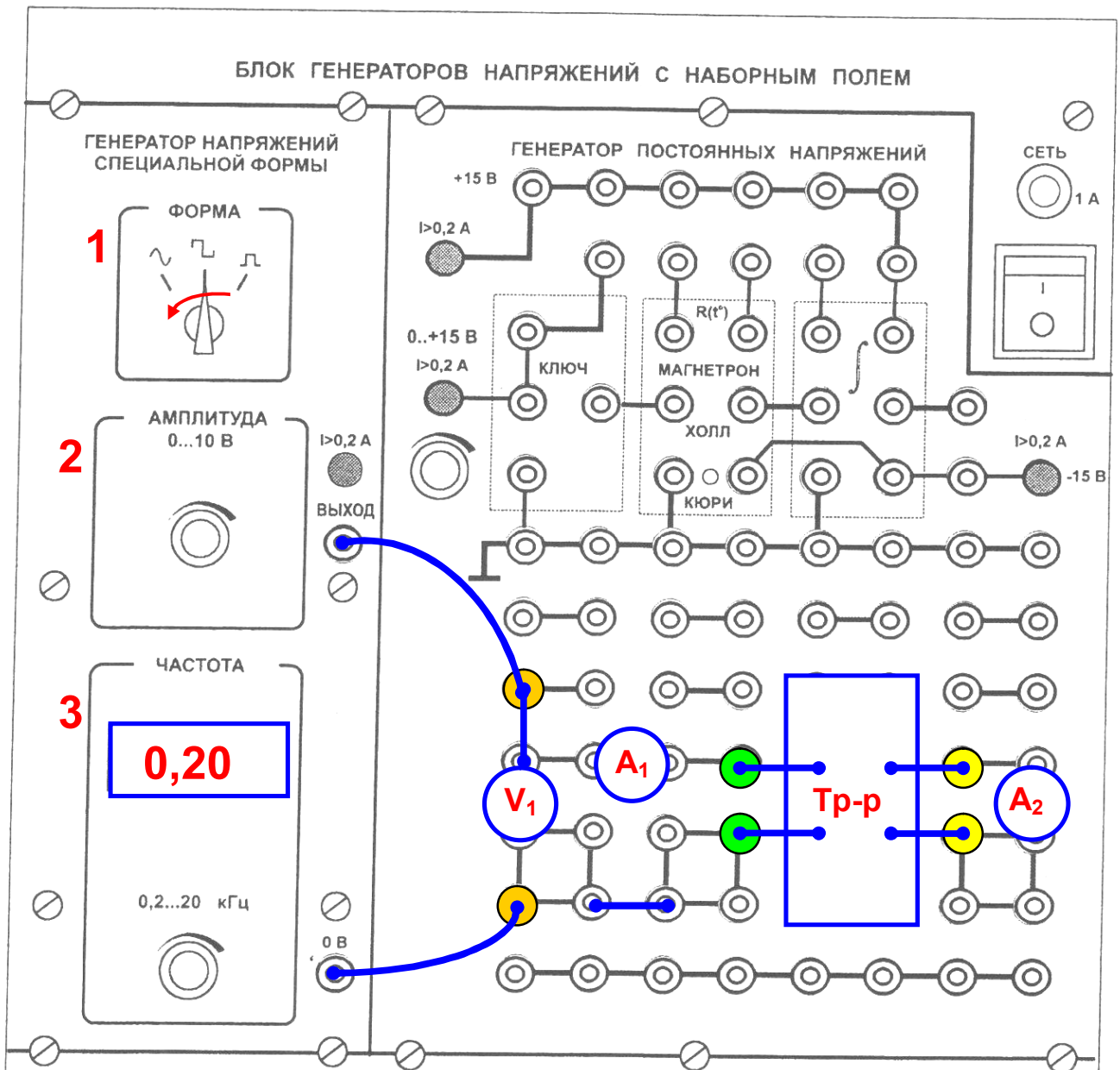


Рисунок 5

Определите полное сопротивление (импеданс) Z и реактивное сопротивление

X первичной обмотки: $Z = \frac{U_1}{I_1}$; $X = \sqrt{Z^2 - r_1^2}$. Результаты занесите в таблицу 2.

По формуле $\cos\varphi = I_1 r_1 / U_1$ определите сдвиг по фазе φ между током и напряжением в первичной обмотке; результаты занесите в таблицу 2.

2.3 Задание 3. Исследование работы трансформатора при нагрузке.

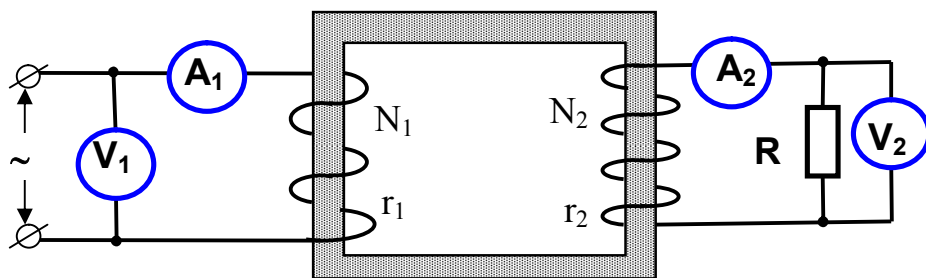


Рисунок 6

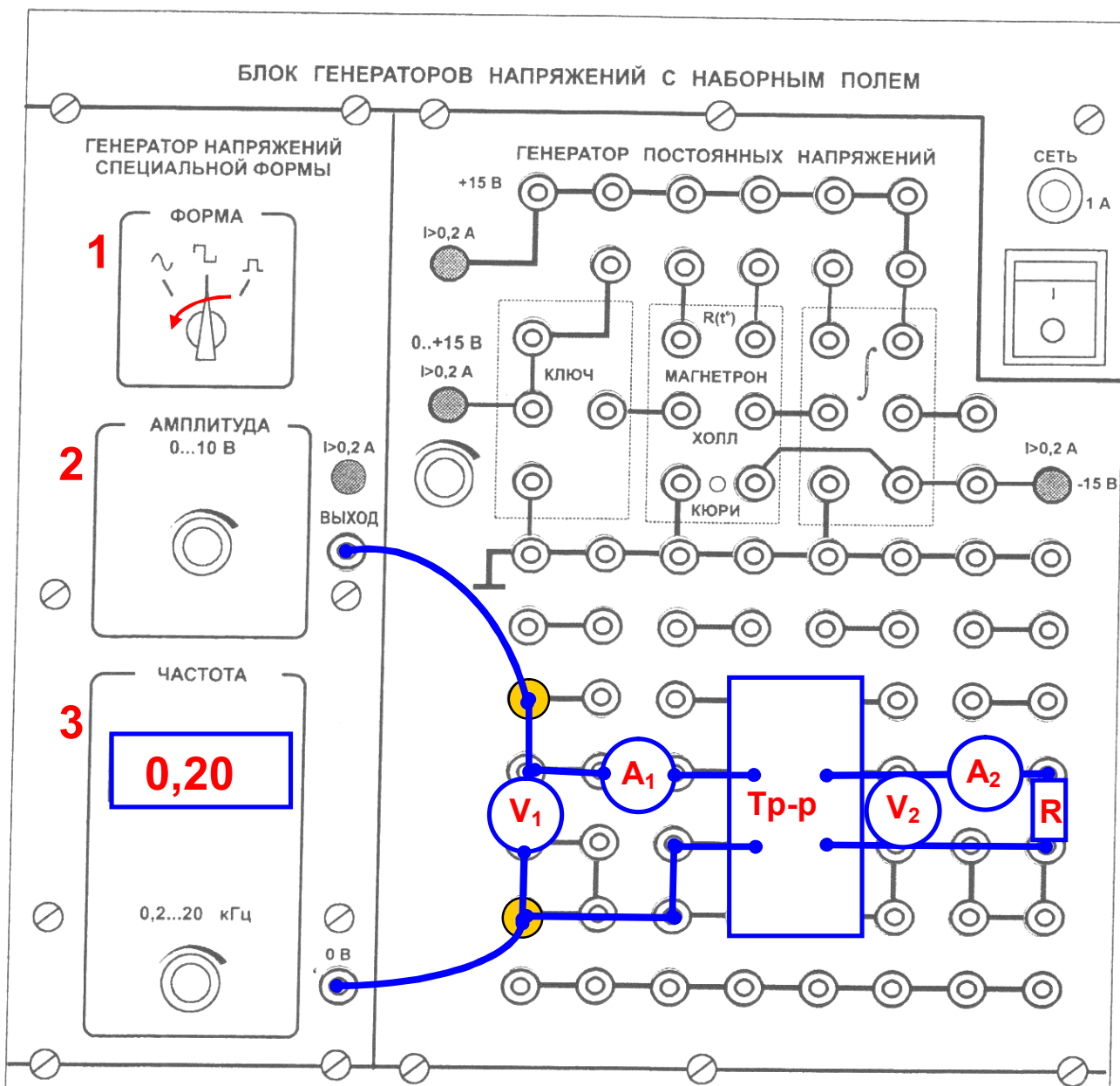


Рисунок 7

1. Рассмотрим случай активного сопротивления нагрузки. Соберите цепь, принципиальная схема которой изображена на рисунке 6, а монтажная схема, собираемая на стенде, – на рисунке 7. Цепь вторичной обмотки трансформатора замкнута на резистор R. На монтажной схеме трансформатор обозначен символом "Тр-р". В качестве вольтметра V и амперметра A используйте мультиметры. Значения силы тока I_1 и I_2 в первичной и вторичной обмотках и напряжения U_2 на вторичной обмотке в зависимости от напряжения U_1 на первичной обмотке занесите в таблицу 3. Значение сопротивления резистора R ($R = \text{const}$) возьмите порядка 1 кОм. Значения напряжения U_1 на первичной обмотке изменяйте в пределах 0-7 В.

Полезную мощность P_2 рассчитывайте по формуле $P_2 = U_2 I_2$, так как $\cos \varphi_2 = 1$ вследствие того, что нагрузка на выходе трансформатора носит чисто активный характер. Результаты вычислений P_2 занесите в таблицу 4.

Коэффициент полезного действия η рассчитывайте по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}.$$

Результаты вычислений запишите в таблицу 3.

Таблица 3

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_1 , мА									
U_1 , В									
I_2 , мА									
U_2 , В									
P_2 , мВт									
η , %									
$v = 0,2 \text{ кГц}; r_1 = 4,9 \text{ Ом}; r_2 = 45,3 \text{ Ом}; N_1 = (295 \pm 5) \text{ витков}; N_2 = 900 \text{ витков}.$									

2. Рассмотрим случай переменного сопротивления нагрузки трансформатора. Соберите цепь, принципиальная схема которой изображена на рисунке 8, а монтажная схема, собираемая на стенде, – на рисунке 9. Цепь вторичной обмотки трансформатора замкнута на реостат R. На монтажной схеме трансформатор обозначен символом "Тр-р". В качестве вольтметра V и амперметра A используйте мультиметры. Установите напряжения U_1 на первичной обмотке трансформатора $U_1 = 4$ В. Значения силы тока I_1 и I_2 в первичной и вторичной обмотках и напряжения U_1 и U_2 на первичной и вторичной обмотках при различных положениях движка реостата R занесите в таблицу 4.

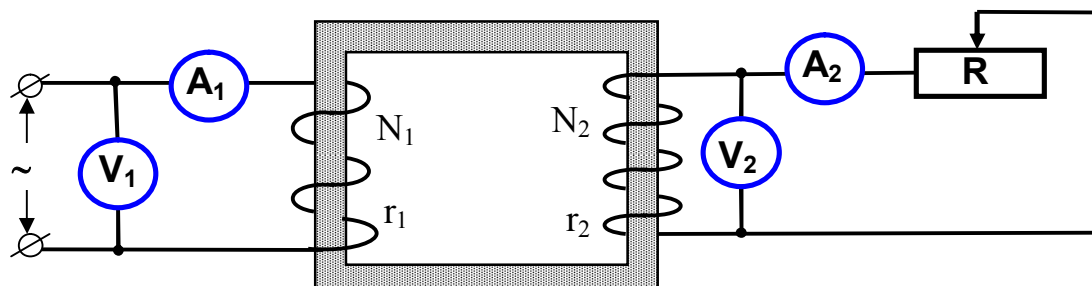


Рисунок 8

Полезную мощность P_2 рассчитывайте по формуле $P_2 = U_2 I_2$, так как $\cos \varphi_2 = 1$ вследствие того, что нагрузка на выходе трансформатора носит чисто активный характер. Результаты вычислений P_2 занесите в таблицу 7.

Таблица 4

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_1 , мА									
U_1 , В									
I_2 , мА									
U_2 , В									
P_2 , мВт									
η , %									
$\nu = 0,2$ кГц; $r_1 = 4,9$ Ом; $r_2 = 45,3$ Ом; $N_1 = (295 \pm 5)$ витков; $N_2 = 900$ витков.									

Коэффициент полезного действия η рассчитывайте по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}$$

Результаты вычислений запишите в таблицу 7

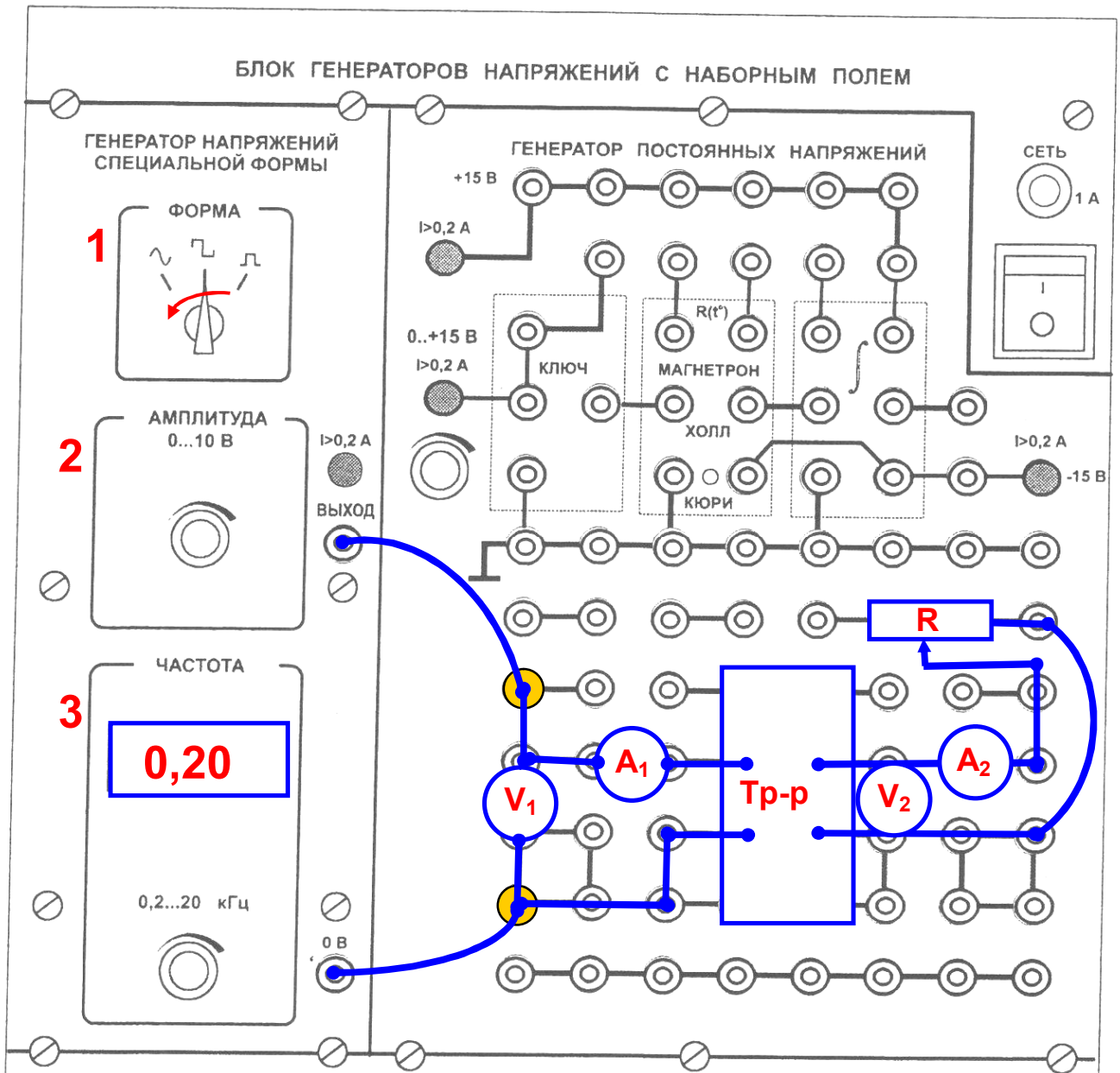


Рисунок 9

Прокомментируйте полученные результаты и сделайте выводы.

3 Вопросы для самоконтроля

- 1 Дайте понятие магнитного потока? В чём он измеряется. Как вычисляется?
- 2 Когда и кем был открыт основной закон электромагнитной индукции? Как он читается?
- 3 Используя закон электромагнитной индукции пояснить принцип действия трансформатора.
- 4 Почему сердечники трансформаторов изготавливают из ферромагнитных материалов?
- 5 Что представляет собой простейший однофазный трансформатор?
- 6 Объясните режим холостого хода трансформатора.
- 7 Что характеризует коэффициент трансформации?
- 8 Объясните режим рабочего хода трансформатора.
- 9 Как согласуются мощности на выходе и входе трансформатора?
10. Что такие токи Фуко? Всегда ли их надо минимизировать?
- 11 Вывести соотношение между эффективными сопротивлениями обмоток трансформатора.
- 12 Как определяют коэффициент полезного действия трансформатора?
- 13 Где находят применение трансформаторы?
- 14 В чём состоит явление самоиндукции. Как вычисляется ЭДС самоиндукции и индуктивность? Единица измерения индуктивности.
- 15 В чём состоит явление взаимной индукции?

4 Литература, рекомендуемая для изучения физики

1 Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники / Ф.Е. Евдокимов.–М.: Академия, 2004.–560 с.

2 Иродов, И.Е. Электромагнетизм. Основные законы / И.Е. Иродов.–М.: Лаборатория Базовых знаний, 2001.–352 с.

3 Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников.–М.: Физматлит, 2003. – 624 с.

4 Касаткин А.С. Электротехника: учеб. пособие для вузов. / А.С. Касаткин, М.В. Немцов:– 9-е изд., стер.–М.: Академия, 2005.–544 с.

5 Китунович Ф.Г. Электротехника. / Ф.Г. Китунович:– 3-е изд., переработанное и дополненное. –Минск: Высшая Школа, 1991.–320 с.

6 Чакак, А.А. Курс физики. Электричество и магнетизм: учебное пособие для студентов заочного отделения высших учебных заведений/ А.А. Чакак. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. – 268 с.