

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайского государственного  
университета им. И.И. Ползунова

**С.А. ГОНЧАРОВ**  
**И.А. МАЦАНКЕ**  
**А.Н. ТАТАРНИКОВА**

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ**

Методические указания к лабораторным работам  
по теоретическим основам электротехники для студентов  
направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника»  
всех форм обучения

Рубцовск 2021

Гончаров С.А., Мацанке И.А., Татарникова А.Н. Нелинейные электрические цепи: Методические указания к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения. – Рубцовский индустриальный институт. - Рубцовск, 2021. - 23 с. [ЭР].

Приведены описания лабораторных работ по теоретическим основам электротехники по разделу «Нелинейные электрические цепи» с теоретическими пояснениями и методическими указаниями по их выполнению.

Методические указания  
рассмотрены и одобрены на  
заседании кафедры ЭЭ РИИ.  
Протокол № 2 от 26.02.2021

## РАБОТА №1

### 1 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: ознакомиться с опытным определением вольт-амперных характеристик нелинейных элементов и распределением токов и напряжений в разветвленных нелинейных цепях постоянного тока, а также методами их анализа.

#### 1.1 Некоторые теоретические положения

На практике встречаются цепи постоянного тока с нелинейными элементами, вольт-амперные характеристики (в.а.х.) которых  $I = f(U)$  отличаются от прямой линии. Для расчета таких цепей из-за нелинейности их в.а.х. неприменимы методы анализа линейных электрических цепей. Часто расчет нелинейных цепей проводят графическим методом, который имеет целью построение в.а.х. всей нелинейной электрической цепи или ее части. При этом нелинейные элементы вводятся своими в.а.х., а порядок расчета зависит от конфигурации цепи.

Рассмотрим примеры расчета цепей с последовательным и параллельным соединениями нелинейных элементов. На рисунке 1.1,а приведена схема замещения нелинейной цепи, состоящей из двух последовательно соединенных нелинейных элементов  $R_1(I)$  и  $R_2(I)$ , в.а.х. которых  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$  известны (рисунок 1.1,б).

Очевидно, что при любом значении тока  $I$  в цепи, согласно второму закону Кирхгофа, приложенное к цепи напряжение  $U$  равно сумме напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , т.е.  $U = U_1 + U_2$ .

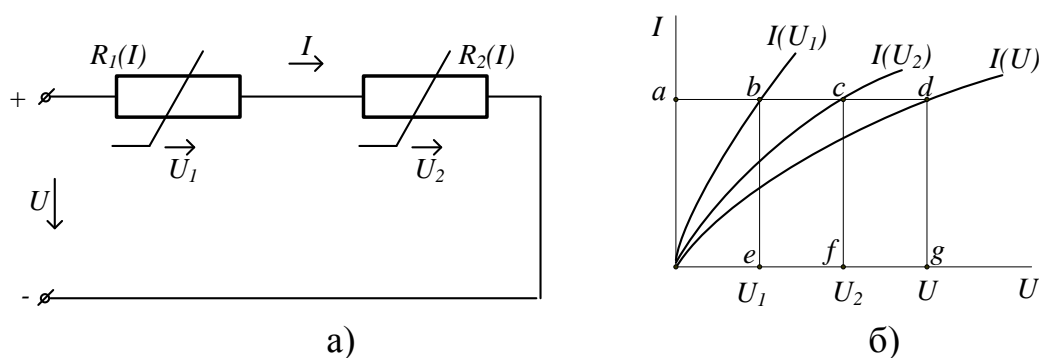


Рисунок 1.1 – Схема замещения последовательного соединения нелинейных элементов и их вольт-амперные характеристики

Поэтому для замены цепи с двумя последовательно включенными нелинейными элементами схемой с одним эквивалентным нелинейным элементом  $R(I)$  (рисунок 1.2) и построения результирующей в.а.х.  $I(U)$ , выражающей зависимость тока  $I$  в цепи от приложенного напряжения  $U$ , достаточно просуммировать абсциссы кривых  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$  при нескольких

произвольно выбранных значениях тока. Так, например, для получения точки  $d$ , принадлежащей в.а.х.  $I(U)$ , необходимо сложить отрезки  $ab$  и  $ac$ , т.е.  $\vec{ad} = \vec{ab} + \vec{ac}$ . Аналогично получают и все другие точки в.а.х.  $I(U)$  эквивалентного нелинейного элемента.

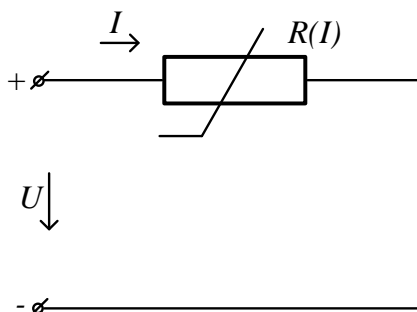


Рисунок 1.2 – Схема замещения с эквивалентным нелинейным элементом

Пользуясь полученной характеристикой  $I(U)$ , можно решать различные для данной цепи задачи. Например, по известному току в цепи  $I$  определить приложенное напряжение  $U$  и напряжения на элементах цепи  $U_1$  и  $U_2$ . Это делается следующим образом. На оси ординат находим точку  $a$ , соответствующую заданному значению тока, и проводим через нее прямую, параллельную оси напряжений. Из точек пересечения ее с характеристиками  $I(U_1)$ ,  $I(U_2)$  и  $I(U)$  опускаем перпендикуляры на ось абсцисс, пересечения которых с осью определяют искомые напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U$  (точки  $e$ ,  $f$ ,  $g$ ). Если задано напряжение  $U$ , то сначала по в.а.х.  $I(U)$  определяют ток  $I$  в цепи, а затем напряжения  $U_1$  и  $U_2$ .

Если последовательно с нелинейным элементом соединен линейный резистор, то расчет такой цепи будет аналогичным, за исключением того, что в.а.х. резистора представляет прямую линию.

При параллельном соединении двух нелинейных элементов с известными в.а.х.  $I_1(U)$  и  $I_2(U)$  (рисунок 1.3,а) напряжение  $U$  является общим, а ток  $I$  в неразветвленной части цепи равен, согласно первому закону Кирхгофа, сумме токов в ветвях, т.е.  $I = I_1 + I_2$ .

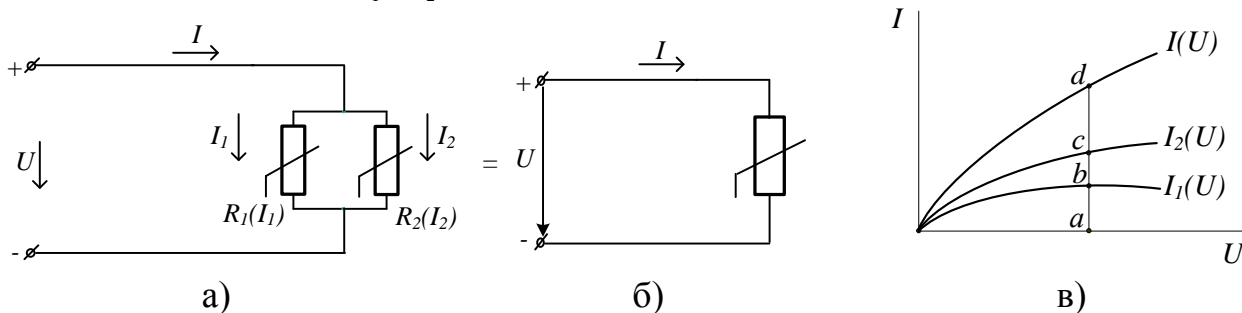


Рисунок 1.3 – Параллельное соединение нелинейных элементов и их вольт-амперные характеристики

Поэтому для замены двух параллельно соединенных нелинейных элементов одним (рисунок 1.3,б) и получения его в.а.х.  $I(U)$  достаточно при нескольких произвольно выбранных значениях напряжений  $U$  просуммировать ординаты характеристик отдельных элементов (рисунок 1.3,в). К примеру, для получения точки  $d$ , принадлежащей в.а.х.  $I(U)$ , необходимо сложить отрезки  $ab$  и  $ac$ . Пользуясь в.а.х.  $I(U)$ , как и в предыдущем случае, можно, например, по известному току  $I$  в неразветвленной части по в.а.х.  $I(U)$  определить приложенное напряжение  $U$ , а затем токи в нелинейных элементах или решить обратную задачу.

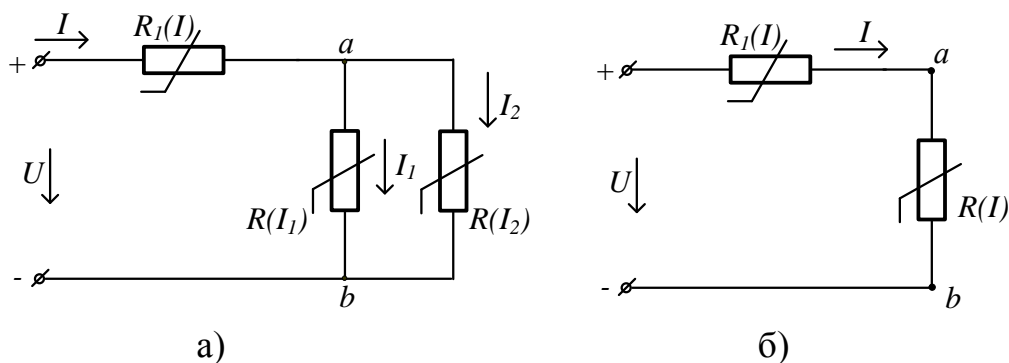


Рисунок 1.4 – Смешанное соединение нелинейных элементов и эквивалентное преобразование

При расчете смешанного соединения нелинейных элементов (рисунок 1.4,а) сначала параллельное соединение нелинейных элементов заменяют эквивалентным нелинейным элементом  $R(I)$  (рисунок 1.4,б), как было показано выше. После такого преобразования схема замещения содержит два нелинейных элемента, соединенных последовательно. Расчет такой цепи также рассмотрен выше.

Если в сложной электрической цепи есть одна ветвь с нелинейным элементом, то определение тока в ней можно проводить по методу эквивалентного генератора. С этой целью выделяют ветвь с нелинейным элементом, а всю оставшуюся линейную часть схемы представляют активным двухполюсником (рисунок 1.5,а).

Известно, что схему линейного активного двухполюсника (рисунок 1.5,а) по отношению к зажимам  $a$  и  $b$  выделенной ветви можно представить эквивалентным генератором (рисунок 1.5,б) с э.д.с.  $E_r$ , равной напряжению на зажимах  $ab$  при разомкнутой ветви ( $U_{ab\text{xx}}$ ), и резистором  $R_r$ , сопротивление которого равно входному сопротивлению  $R_{\text{вх}}$  линейного двухполюсника со стороны зажимов  $ab$ .

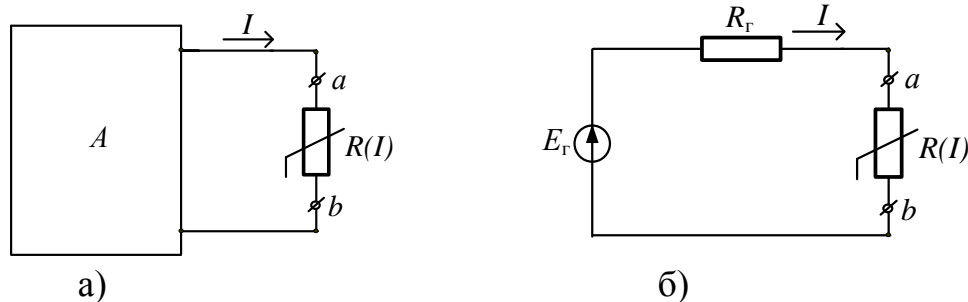


Рисунок 1.5 – Метод эквивалентного генератора при расчете нелинейной цепи

Ток  $I$  можно определить по величине  $E_r$  из предварительно построенной эквивалентной в.а.х. для цепи (рисунок 1.5,б) аналогично тому, как это было показано выше (рисунок 1.1,б).

Ток через нелинейный элемент можно определить и следующим образом. Уравнение по второму закону Кирхгофа для схемы (рисунок 1.5,б)

$$U_{ab}(I) = E_r - I \cdot R_r \quad (1.1)$$

представляет собой внешнюю в.а.х. двухполюсника (линия 1, рисунок 1.6), которую можно построить по двум точкам. При холостом ходе в цепи (рисунок 1.5,б)  $I = 0$ , а напряжение  $U_{ab} = E_r$ . При коротком замыкании  $U_{ab} = 0$ , а ток в цепи  $I = \frac{E_r}{R_r}$ .

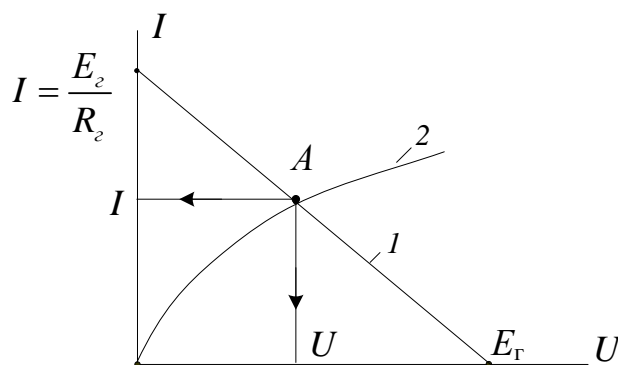


Рисунок 1.6 – Определение тока и напряжения на нелинейном элементе

В то же время  $U_{ab}(I)$  является в.а.х. нелинейного элемента (кривая 2, рисунок 1.6). Очевидно, что рабочий режим схемы (рисунок 1.5,б) должен удовлетворять обеим характеристикам, т.е. должен определяться точкой пересечения А этих характеристик. Перпендикуляры, опущенные из точки А на оси координат, определяют значение тока  $I$  и напряжения  $U$  на нелинейном элементе. При необходимости могут быть найдены токи в ветвях линейной части схемы по законам Ома и Кирхгофа.

## 1.2 Схема электрической цепи

В работе предусматривается получить опытным путем в.а.х. нелинейного элемента, в качестве которого используется обычная лампа накаливания. Предусматривается также измерение токов и напряжений в разветвленной цепи постоянного тока, содержащей один нелинейный элемент.

Для снятия в.а.х. нелинейного элемента используется схема, приведенная на рисунке 1.7.

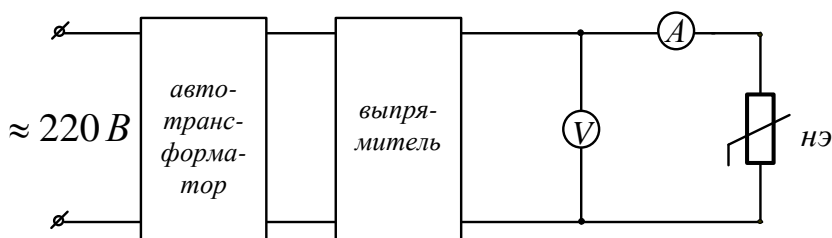


Рисунок 1.7 – Схема для экспериментального получения в.а.х. нелинейного элемента

Распределение токов и напряжений в нелинейной цепи исследуется по схеме (рисунок 1.8). Напряжения на всех участках цепи измеряются поочередно одним вольтметром.

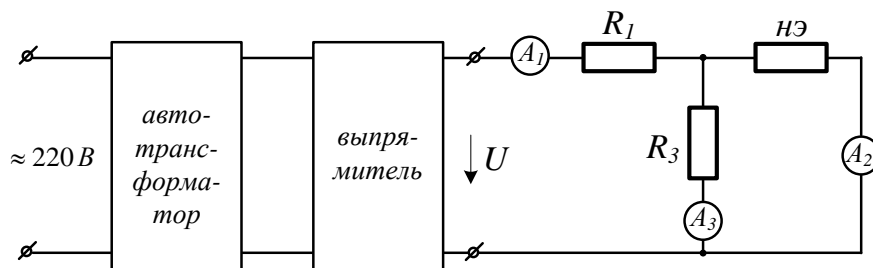


Рисунок 1.8 – Схема для исследования нелинейной цепи постоянного тока

## 1.3 Порядок выполнения работы

1.3.1 Собрать схему, изображенную на рисунке 1.7, и снять в.а.х. нелинейного элемента. В этом опыте необходимо получить данные для 8-10 точек.

Внимание! В.А.Х. снимать до напряжения, не превышающего 75 В.

Результаты опыта занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

U	В	0				
I	А	0				

1.3.2 Собрать схему (рисунок 1.8) и измерить токи и напряжения. Результаты измерений поместить в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

$U$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$U_1$	$U_2=U_3$	$R_1$	$R_3$	Примечание
В	А	А	А	В	В	Ом	Ом	
								Эксперимент
						×	×	Расчет

1.3.3 Задавшись значениями  $U$ ,  $R_1$ ,  $R_3$ , участвовавшими в опыте п.1.3.2, и в.а.х. нелинейного элемента, полученной в п.1.3.1, графическим методом рассчитать токи и напряжения в исследуемой цепи (рисунок 1.8). Результаты расчета занести в таблицу 1.2 и сравнить их с экспериментальными.

1.3.4 Задавшись значениями  $U$ ,  $R_1$ ,  $R_3$ , (п.1.3.2) и в.а.х. нелинейного элемента, определить методом эквивалентного генератора ток и напряжение нелинейного элемента.

### Методические указания

При снятии в.а.х. нелинейного элемента необходимо использовать приборы магнитоэлектрической системы – амперметр с пределом измерения 1 А, вольтметр – 150 В.

При экспериментальном исследовании нелинейной цепи в качестве амперметра  $A_1$  следует использовать прибор с пределом измерения 3 А, а амперметров  $A_2$  и  $A_3$  – приборы с пределом измерения 1 А. Напряжения измеряются вольтметром на 150 В.

### 1.4 Контрольные вопросы

1.4.1 Что понимают под вольт-амперной характеристикой нелинейного элемента?

1.4.2 Определить ток  $I$  в цепи (рисунок 1.9), если  $R_1=5$  Ом, а приложенное напряжение  $U=15$  В. В.а.х. нелинейного элемента задана в таблице 1.3.

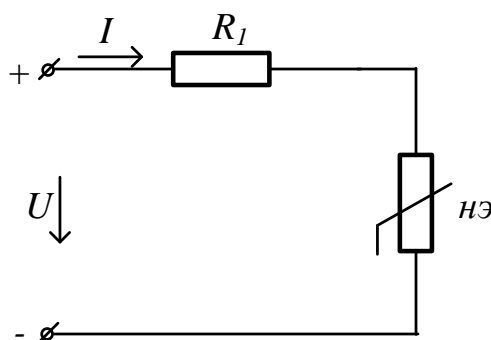


Рисунок 1.9 – Схема замещения нелинейной цепи



Таблица 1.3

$I$	А	0	0,8	1,6	2	2,2	2,5
$U$	В	0	2	6	10	14	20

1.4.3 Определить ток и напряжение на нелинейном элементе (рисунок 1.10) методом эквивалентного генератора, если  $R_1=6$  Ом,  $R_2=4$  Ом,  $R_3=R_4=10$  Ом,  $E=100$  В. В.а.х. нелинейного элемента взять из таблицы 1.3.

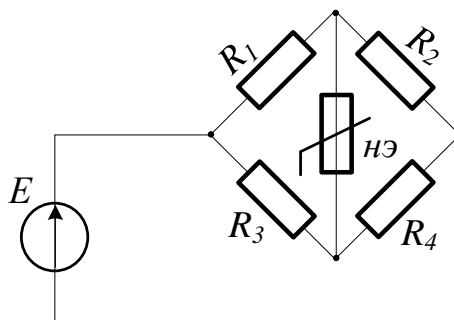


Рисунок 1.10 – Разветвленная электрическая цепь с одним нелинейным элементом

## РАБОТА №2

### 2 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное исследование простейших нелинейных цепей переменного тока и их расчет методом эквивалентных синусоид.

#### 2.1 Некоторые теоретические положения

Наличие нелинейного элемента в цепи переменного тока приводит к тому, что при входном синусоидальном напряжении ток в цепи оказывается несинусоидальным. И наоборот, синусоидальный ток, проходящий по нелинейной электрической цепи, создает на ее зажимах несинусоидальное напряжение. При расчете нелинейных цепей переменного тока получающиеся несинусоидальные кривые напряжений и токов заменяют так называемыми эквивалентными синусоидами, т.е. синусоидами с теми же действующими значениями, что и данные несинусоидальные кривые, и с таким углом сдвига фаз, что потребляемая мощность также остается без изменений. Такая замена позволяет использовать при расчете нелинейных цепей переменного тока векторные диаграммы и комплексный метод.

При расчете нелинейные элементы вводятся своими вольт-амперными  $U(I)$  и фазово-амперными  $\varphi(I)$  характеристиками, где  $\varphi$  - условный угол сдвига фаз между эквивалентными синусоидами напряжения и тока. Порядок расчета зависит от конфигурации цепи.

Последовательно соединенные нелинейные элементы (рисунок 2.1.а) с известными вольт-амперными  $U_k(I)$  и фазовоамперными  $\varphi_k(I)$  характеристиками, включенные на переменное напряжение  $U$ , могут быть заменены эквивалентным элементом (рисунок 2.1,б) с новыми характеристиками  $U(I)$  и  $\varphi(I)$ .

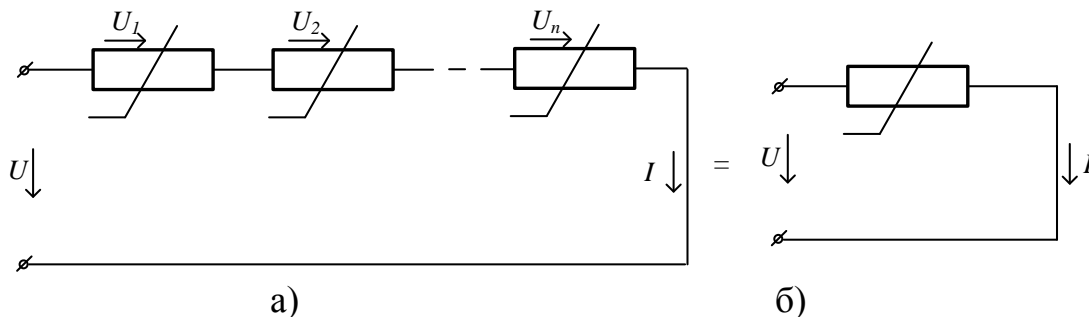


Рисунок 2.1 – Преобразование последовательного соединения нелинейных элементов

Для любого значения тока  $I$  в цепи можно для всех элементов по заданным характеристикам найти напряжения  $U_k$  и углы  $\varphi_k$  сдвига фаз этих напряжений относительно тока, а затем построить векторную диаграмму (рисунок 2.2,а).

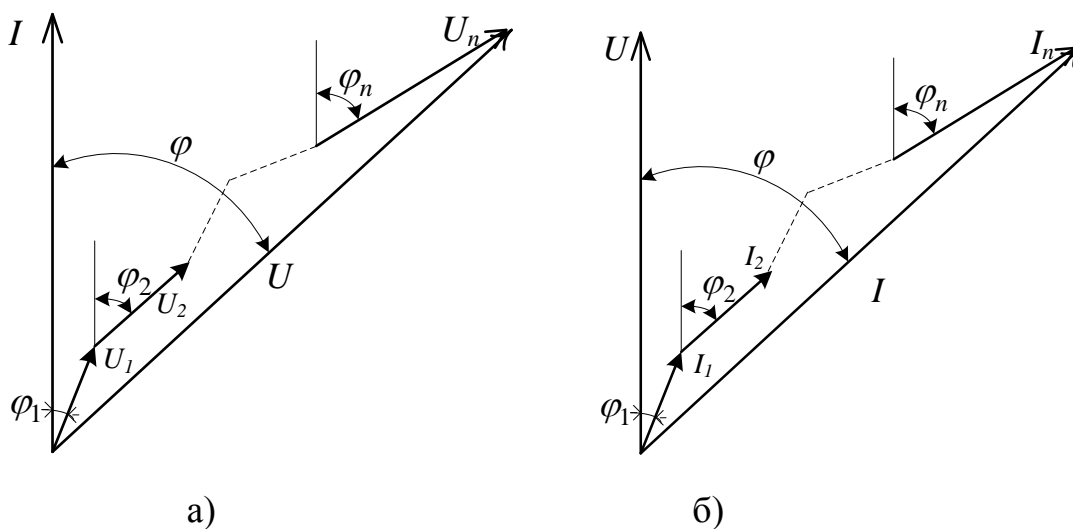


Рисунок 2.2 – К определению эквивалентных и фазовоамперных характеристик последовательного и параллельного соединения

Из диаграммы следует, что напряжение

$$U = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n U_k \cdot \cos \varphi_k\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^n U_k \cdot \sin \varphi_k\right)^2}, \quad (2.1)$$

а угол между током и напряжением  $\varphi = \arctg \frac{\sum_{\kappa=1}^n U_{\kappa} \cdot \sin \varphi_{\kappa}}{\sum_{\kappa=1}^n U_{\kappa} \cdot \cos \varphi_{\kappa}}$ . (2.2)

Таким образом, задавшись несколькими произвольными значениями тока и пользуясь соотношениями (2.1, 2.2), можно построить характеристики  $U(I)$  и  $\varphi(I)$  эквивалентного нелинейного элемента.

Эту же задачу можно решить и в комплексной форме. Для произвольного значения тока  $I$  по зависимостям  $U(I)$  и  $\varphi(I)$  для каждого нелинейного элемента можно записать

$$\underline{U}_{\kappa} = U_{\kappa} \cdot e^{j\varphi_{\kappa}},$$

а точку вольт-амперной  $U(I)$  и фазово-амперной  $\varphi(I)$  характеристик для этого значения тока можно получить из выражения:

$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \dots + \underline{U}_n = \sum_{\kappa=1}^n \underline{U}_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^n U_{\kappa} \cdot e^{j\varphi_{\kappa}} = U e^{j\varphi}. \quad (2.3)$$

Для получения кривых  $U(I)$  и  $\varphi(I)$  следует взять несколько произвольных значений тока.

При параллельном соединении нелинейных элементов (рисунок 2.3,а) отличие расчета заключается в том, что складываются не напряжения, а токи. Векторная диаграмма для параллельного соединения нелинейных элементов приведена на рисунке 2.2,б, а расчетные формулы имеют вид:

$$I = \sqrt{\left(\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} \cdot \cos \varphi_{\kappa}\right)^2 + \left(\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} \cdot \sin \varphi_{\kappa}\right)^2}, \quad (2.4)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} \cdot \sin \varphi_{\kappa}}{\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} \cdot \cos \varphi_{\kappa}}. \quad (2.5)$$

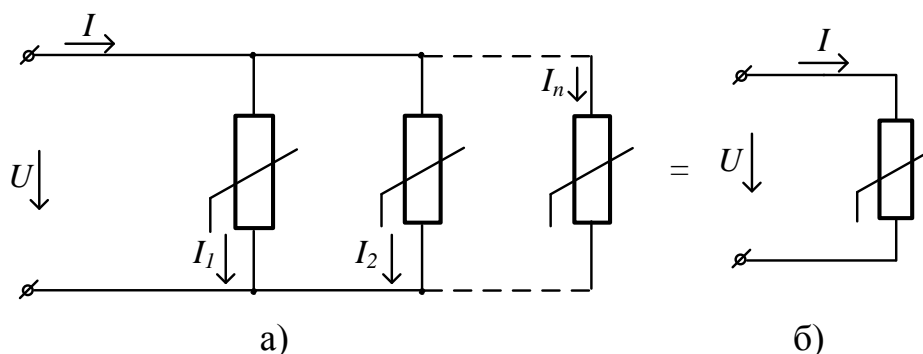


Рисунок 2.3 – Параллельное соединение нелинейных элементов

Аналогично можно определять комплексным методом значения точек зависимостей  $U(I)$  и  $\varphi(I)$  для эквивалентного нелинейного элемента (рисунок

2.3,б) при произвольно выбранных значениях приложенного напряжения по выражению:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \dots + \underline{I}_n = \sum_{\kappa=1}^n \underline{I}_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} \cdot e^{j\varphi_{\kappa}} = I e^{j\varphi}. \quad (2.4)$$

## 2.2 Схема электрической цепи

Схема (рисунок 2.4), в которой по ходу работы меняется правая часть между зажимами *a* и *b*, позволяет снять вольт-амперные и фазово-амперные характеристики каждого из нелинейных элементов, а также их последовательного и параллельного соединений. В качестве нелинейных элементов в работе используются лампа накаливания и катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником. Питание осуществляется от сети переменного тока, а регулирование напряжения производится лабораторным автотрансформатором.

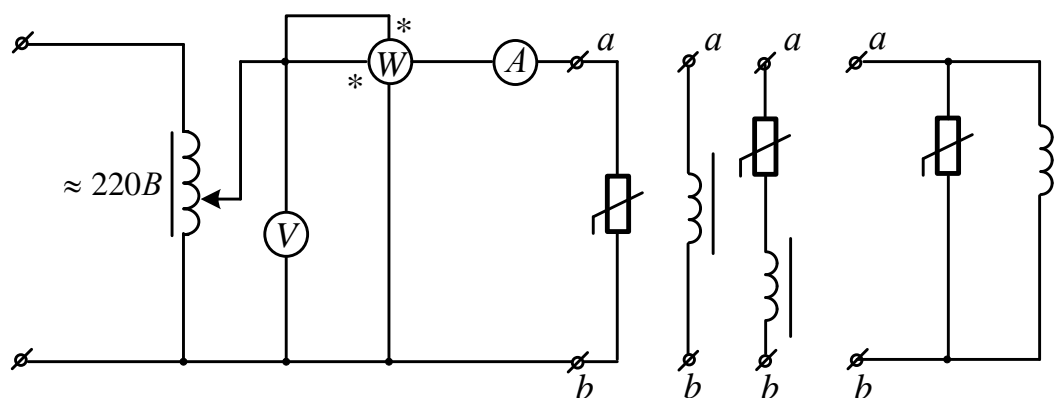


Рисунок 2.4 – Схема для проведения экспериментальной части работы

### Методические указания

В качестве амперметра и вольтметра необходимо взять приборы электромагнитной системы с пределами измерений соответственно на 1 А и 150 В.

## 2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1 Собрать схему (рисунок 2.4) и сделать 6÷8 измерений для получения зависимостей  $U(I)$  и  $\varphi(I)$  лампы накаливания и катушки со стальным сердечником.

2.3.2 Получить зависимости  $U(I)$  и  $\varphi(I)$ , по аналогии с п.2.3.1, для последовательного и параллельного соединения лампы и катушки. Данные опытов занести в таблицу 2.1 и построить зависимости  $U(I)$  и  $\varphi(I)$  лампы катушки и их последовательного и параллельного соединения.

Таблица 2.1

	$U$	$I$	$P$	$\cos\varphi$	$\varphi$	Примечания
	В	А	Вт	-	град	
1 . . 8						Лампа накаливания
1 . . 8						Катушка индуктивности со стальным сердечником
1 . . 8						Последовательное соединение
1 . . 8						Параллельное соединение

2.3.3 Рассчитать вольт-амперные и фазово-амперные характеристики для последовательного и параллельного соединения лампы и катушки. Полученные характеристики построить на тех же графиках, что и в п.2.3.2, и сравнить с опытными.

Для получения названных характеристик при последовательном соединении следует задаться несколькими произвольными значениями тока  $I$  и по характеристикам п.2.3.1 определить напряжение на лампе  $U_l$ , катушке  $U_k$  и угол сдвига фаз  $\varphi_k$  этого напряжения относительно выбранного значения тока. Затем по формуле (2.3) рассчитываются  $U$  и  $\varphi$ . Угол сдвига фаз между током и напряжением на лампе равен нулю.

Таблица 2.2

Последовательное соединение						Параллельное соединение					
$I$	$U_l$	$U_k$	$\varphi_k$	$U$	$\varphi$	$U$	$I_l$	$I_k$	$\varphi_k$	$I$	$\varphi$
А	В	В	град	В	град	В	А	А	град	А	град
1						1					
2						2					
·						·					
·						·					
8						8					

Для расчета зависимостей  $U(I)$  и  $\varphi(I)$  параллельного соединения следует задаться несколькими произвольными значениями напряжения  $U$  и по кривым п.2.3.1 найти токи через лампу  $I_l$  и катушку  $I_k$ , а также угол сдвига тока

катушки  $\varphi_k$  относительно напряжения  $U$ . А затем, пользуясь выражением (2.6), определить  $I$  и  $\varphi$ . Результаты п.2.3.3 поместить в таблицу 2.2. Полученные характеристики построить на тех же графиках, что и в п.2.3.2, и сравнить с опытными.

## 2.4 Контрольные вопросы

2.4.1 Что понимают под методом эквивалентных синусоид и какие характеристики используют при расчете этим методом?

2.4.2 Какой вид имеют вольт-амперная и фазово-амперная характеристики линейного элемента?

2.4.3 Определить входное напряжение  $U$  в схеме (рисунок 2.5), если реактивное сопротивление конденсатора  $X_c=100$  Ом, напряжение на нелинейном сопротивлении  $U_n=120$  В, а вольт-амперная и фазово-амперная характеристики заданы в таблице 2.3.

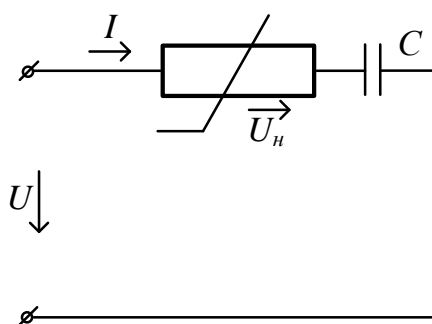


Рисунок 2.5 – Последовательное соединение нелинейного сопротивления и конденсатора

Таблица 2.3

$I$	А	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$U$	В	0	65	77	90	100	108	112	116	120
$\varphi$	град	0	60	45	38	30	25	20	17	15

## РАБОТА №3

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: исследование феррорезонанса напряжений.

#### 3.1 Некоторые теоретические положения

Резонанс в цепи с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора (рисунок 3.1,а), питающейся от источника синусоидального напряжения, называется феррорезонансом напряжений. В отличие от линейной цепи феррорезонанс для данной цепи может быть достигнут не только за счет изменения величины емкости

конденсатора или частоты напряжения источника, но и с помощью изменения входного напряжения  $U$ .

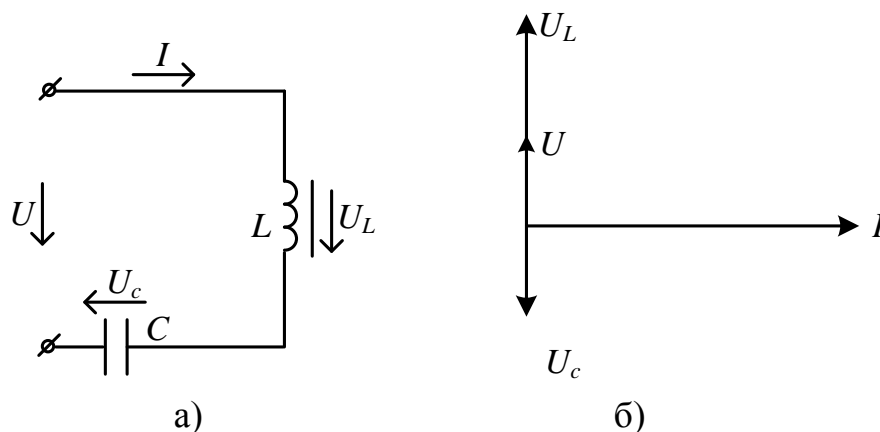


Рисунок 3.1 – Цепь с последовательным соединением нелинейной катушки индуктивности и конденсатора и ее векторная диаграмма

Для упрощения анализа явления феррорезонанса несинусоидальные кривые напряжений и токов заменяют эквивалентными синусоидами и пренебрегают активными потерями в цепи. Учитывая сделанные допущения, можно пользоваться векторной диаграммой (рисунок 3.1,б), из которой видно, что напряжения  $U_L$  и  $U_C$  противоположны по фазе. Поэтому действующее значение приложенного напряжения можно определить как

$$U = |U_L - U_C|. \quad (3.1)$$

Для получения вольт-амперной характеристики цепи  $U = f(I)$  можно воспользоваться уравнением (3.1), взяв снятые отдельно вольт-амперные характеристики катушки  $U_L(I)$  и  $U_C(I)$  конденсатора (рисунок 3.2). Для этого при произвольно выбранных значениях тока графически вычитают характеристики  $|U_L - U_C|$ .

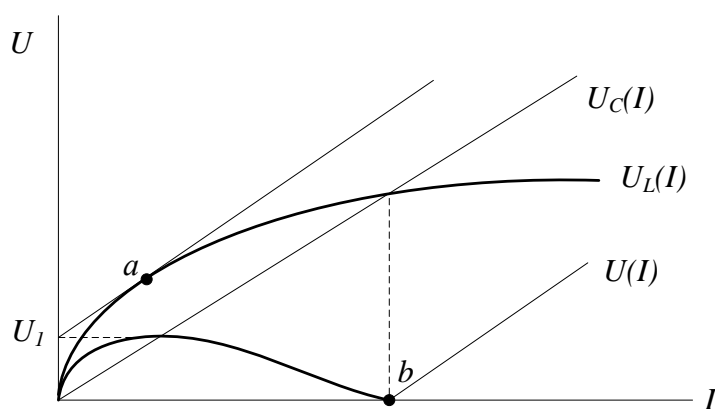


Рисунок 3.2 – Вольт-амперные характеристики нелинейной катушки, конденсатора и их последовательного соединения

Точка  $b$  характеристики  $U(I)$  соответствует режиму резонанса напряжений, так как при этом  $U_L = U_C$ . Точка  $a$  является экстремальной точкой вольт-амперной характеристики цепи  $U(I)$ , поэтому для нее справедливо:

$$\frac{dU(I)}{dI} = \frac{dU_L(I)}{dI} - \frac{dU_C(I)}{dI} = 0, \quad (3.2)$$

или

$$\frac{dU_L(I)}{dI} = \frac{dU_C(I)}{dI}.$$

т.е. наклон касательной к кривой  $U_L(I)$  в точке  $a$  равен наклону вольт-амперной характеристики конденсатора. Это позволяет подобрать необходимую емкость конденсатора, обеспечивающего заданное значение напряжения  $U_1$ . Для этого из точки  $U_1$  на оси ординат проводят касательную (рисунок 3.2) к известной вольт-амперной характеристике катушки  $U_L(I)$ , а затем из начала координат проводят прямую, параллельную касательной, это и будет вольт-амперная характеристика конденсатора, в каждой точке которой  $\frac{U_C(I)}{I} = X_C = \frac{1}{\omega C}$ .

Откуда определяется значение емкости конденсатора.

Практически из-за потерь в стали и активном сопротивлении катушки и искажения формы кривой тока зависимость  $U(I)$  имеет несколько иной вид (рисунок 3.3).

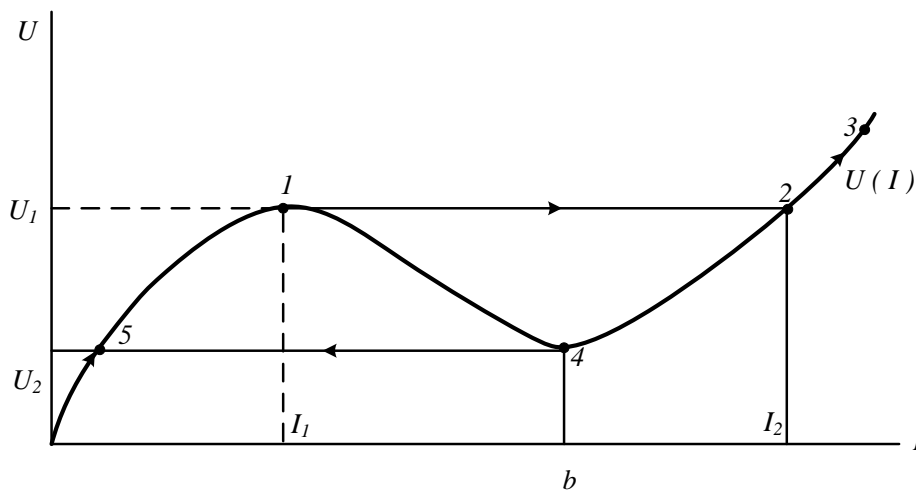


Рисунок 3.3 – Вольт-амперная характеристика цепи с последовательным соединением реальной катушки с сердечником и конденсатора

Экспериментальную кривую  $U(I)$  можно снять только при питании от источника тока. Если же питание осуществить от источника напряжения, то при плавном изменении приложенного напряжения  $U$  (рисунок 3.1,а) в цепи наблюдается релейный (триггерный) эффект. Если постепенно повышать напряжение  $U$ , то ток  $I$  в интервале от 0 до  $I_1$  плавно повышается, а затем при достижении экстремального напряжения  $U_1$  (рисунок 3.3) происходит скачок



тока до величины  $I_2$ . Причем этот скачок сопровождается опрокидыванием фазы: в точке 1 ток отстает от напряжения ( $\varphi > 0$ ), в точке 2 – опережает его ( $\varphi < 0$ ). Дальнейшее увеличение напряжения дает плавный рост тока (точка 3). Снижение напряжения до величины  $U_2$  вновь вызывает скачок тока (точки 4-5), и угол  $\varphi$  станет положительным. В точке 4 угол  $\varphi$  близок к нулю.

### 3.2 Схема электрической цепи

В работе используется цепь, схема замещения которой представлена на рисунке 3.4. Автотрансформатором АТ производится плавное регулирование напряжения, а плавное регулирование тока в исследуемой цепи осуществляется реостатом  $R$ .

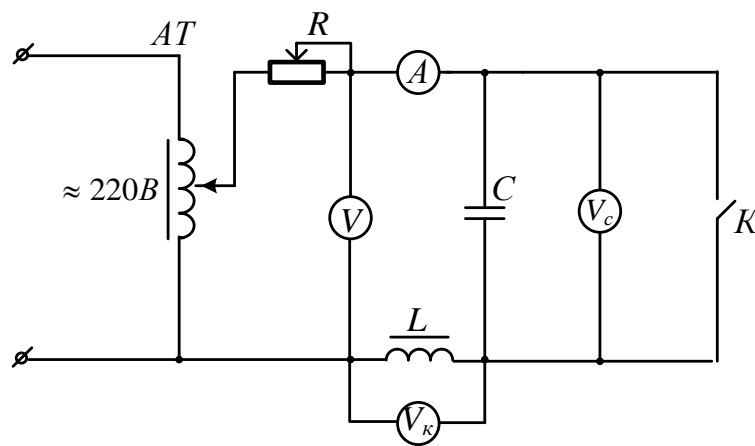


Рисунок 3.4 – Схема для проведения экспериментов

### 3.3 Порядок работы

Программа работы

3.3.1 Собрать схему (рисунок 3.4) и временно замкнуть накоротко (ключ  $K$  замкнут) конденсатор  $C$ , снять вольт-амперную характеристику катушки со стальным сердечником при выведенном реостате ( $R=0$ ). Данные для 8-10 точек поместить в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

$U_{\kappa}$	В									
$I$	А									

3.3.2 Построив вольт-амперную характеристику катушки по данным п.3.3.1 и пренебрегая влиянием активных потерь и наличием высших гармоник, рассчитать значение емкости конденсатора  $C$ , при котором в схеме (рисунок 3.4) будет иметь место триггерный эффект на увеличение тока при напряжении скачка  $U_1$ , заданном преподавателем ( $30 \div 50$  В).

3.3.3 Определив величину емкости конденсатора  $C$ , построить его вольт-амперную характеристику и идеализированную характеристику  $U(I)$  на том же графике, что и в п.3.3.2. Оценить, с какого значения ток увеличивается скачком.

3.3.4 Отключить ключ  $K$  (рисунок 3.4) и установить значение емкости, близкое к расчетной. Плавно изменяя напряжение автотрансформатором при выведенном реостате  $R$  ( $R=0$ ), снять зависимости  $U(I)$ ,  $U_k(I)$  при плавном увеличении, а затем при плавном уменьшении напряжения. Зафиксировать скачки тока, получив по два его значения при одном и том же напряжении. Результаты опытов занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

$U$	$I$	$U_k$	$U_c$	Примечание
В	А	В	В	
				Плавное увеличение напряжения (8-10 точек)
				Плавное уменьшение напряжения (8-10 точек)
				Плавное изменение тока (8-10 точек)

3.5 Снять вольт-амперную характеристику цепи при плавном изменении тока, для чего установить автотрансформатором напряжение большее, чем напряжение скачка, и, вводя реостат  $R$ , снять зависимости  $U(I)$ ,  $U_k(I)$ ,  $U_c(I)$ . Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

3.6 По данным пп.3.3.4, 3.3.5 построить кривые  $U(I)$ ,  $U_k(I)$  и  $U_c(I)$  на том же графике, что и кривые пп.3.3.2 и 3.3.3. Сравнить экспериментальные кривые с расчетными.

### Методические указания

Для измерения напряжения на конденсаторе используется цифровой прибор Щ 4300. Амперметр и вольтметры – приборы электродинамической системы с пределами измерения соответственно на 1 А и 150 В.

### 3.4 Контрольные вопросы

3.4.1 В чем принципиальное отличие нелинейного резонанса от линейного?

3.4.2 Как по характеристике реальной феррорезонансной цепи определить активное сопротивление, считая его неизменным и включенным последовательно в цепь?

3.4.3 Почему явление скачка тока в феррорезонансной цепи называется опрокидыванием фазы входного напряжения?

3.4.4 Для цепи (рисунок 3.5) при  $f=50$  Гц определить значение конденсатора  $C$ , обеспечивающего триггерный эффект при  $U_I=45$  В.

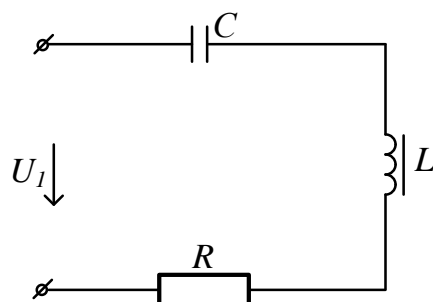


Рисунок 3.5 – Схема получения триггерного эффекта тока

Вольт-амперная характеристика катушки задана в таблице 3.3.

Таблица 3.3

$I$	А	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	1,8
$U$	В	0	50	80	90	93	95	100	105

## РАБОТА №4

### 4 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: исследование свойств магнитного усилителя и определение его основных характеристик.

#### 4.1 Некоторые теоретические положения

Магнитный усилитель (МУ) – ферромагнитное устройство с подмагничиванием постоянным током, позволяющее управлять значительной мощностью в нагрузке при незначительной мощности в управляющей цепи. Действие МУ основано на использовании явления насыщения ферромагнитных материалов.

Схема простейшего МУ представлена на рисунке 4.1.

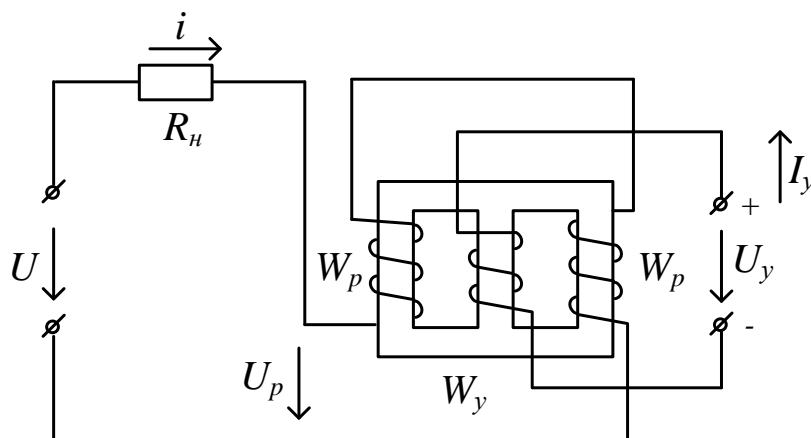


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема МУ

Рабочей цепью усилителя служат две одинаковые обмотки переменного тока с числом витков  $W_p$  каждая, расположенные на крайних стержнях ферромагнитного сердечника и соединенные последовательно таким образом, чтобы магнитные потоки, созданные ими, были направлены противоположно в среднем стержне. На среднем стержне находится обмотка управления  $W_y$ , которая питается постоянным током.

Параметры цепи, питающейся от источника синусоидального напряжения  $U$ , подобраны таким образом, что при отсутствии управляющего тока ( $I_y=0$ ) сердечник не насыщен. При наличии подмагничивания постоянным током степень насыщения увеличивается, амплитуда изменения магнитного потока в крайних стержнях уменьшается, а следовательно, уменьшается действующее значение  $U_p$  напряжения на рабочих обмотках. При неизменном действующем значении  $U$  напряжения сети переменного тока это приводит к увеличению тока в рабочей цепи. При соответствующих обмоточных данных мощность  $P_y = I_y U_y$ , подводимая к обмотке управления, оказывается значительно меньше изменения мощности, потребляемой в нагрузке  $P = I^2 \cdot R_n$ .

Одна из важнейших характеристик МУ - коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \frac{\Delta P}{P_y} = \frac{P - P_0}{P_y}, \quad (4.1)$$

где  $P_0$  - мощность в нагрузке при  $I_y=0$ .

Для определения зависимости  $P(P_y)$  и  $K_p(P_y)$  обычно используют семейство в.а.х.  $U_p = f(I, I_y)$ . Если пренебречь активными потерями в рабочих обмотках и высшими гармониками, которые возникают вследствие нелинейности цепи, то для рабочей цепи (рисунок 4.1) можно записать уравнение по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений:

$$iR_n + U_p = U.$$

Для действующих значений это уравнение будет иметь вид:

$$U^2 = U_p^2 + (I \cdot R_n)^2. \quad (4.2)$$

Уравнение 4.2 представляет собой окружность с центром в начале системы координат  $U_p$ ,  $I \cdot R_n$  и радиусом  $U$ . Точки пересечения окружности с семейством характеристик  $U_p = f(I \cdot R_n)$  при различных значениях  $I_y$  позволяют найти зависимость  $I(I_y)$  при заданном значении  $U$ , а затем и зависимость  $P(P_y)$  и  $K_p(P_y)$ .

## 4.2 Схема электрической цепи

В работе используется схема, приведенная на рисунке 4.2.

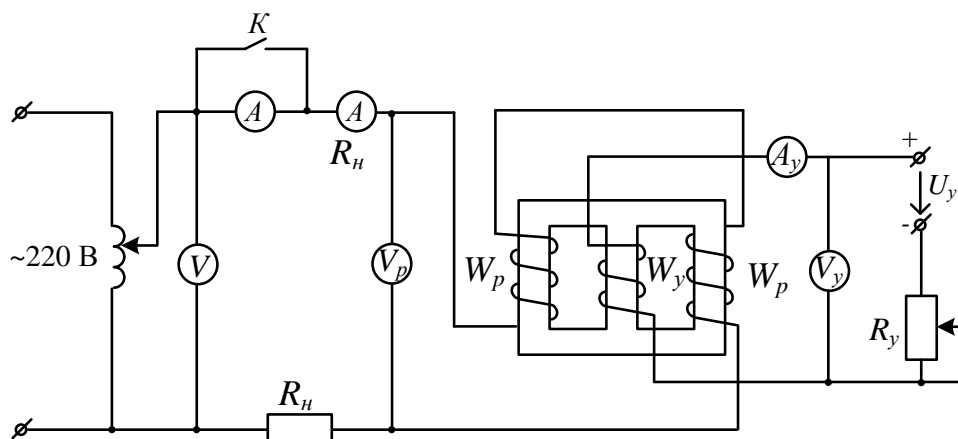


Рисунок 4.2 – Схема для исследования МУ

Рабочие обмотки МУ подключены к цепи переменного тока, напряжение на входе которых можно регулировать с помощью автотрансформатора.

Для более точного измерения тока в достаточно широких пределах в цепи переменного тока используются два амперметра на 0,5 А и 3 А.

При токах  $I \geq 0,5$  А прибор на 0,5 А шунтируется ключом  $K$ . Резистор  $R_h$  перед сборкой схемы измеряется омметром.

Обмотки управления подключаются к источнику постоянного напряжения, а ток в ней  $I_y$  регулируется с помощью резистора  $R_y$ .

## 4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1 Собрать схему (рисунок 4.2) и снять характеристики  $U_p(I)$  при значениях управляющего тока  $I_y = 0; 0,2; 0,3; 0,4$  А. Результаты измерений (6÷8 точек для каждой характеристики) поместить в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

$I_y$	$U_y$	$U$	$U_p$	$I$	$I \cdot R_h$	Примечание
А	В	В	В	А	В	
0						$R_h =$ Ом
0,2						
0,3						
0,4						

4.3.2 По данным п.4.3.1 вычислить  $I \cdot R_n$  (результаты поместить в таблицу 4.1) и построить семейство характеристик  $U_p = f(I \cdot R_n)$ , выбрав одинаковые масштабы на координатных осях.

4.3.3 По кривым  $U_p = f(I \cdot R_n)$  для напряжения  $U$ , заданного преподавателем, найти зависимость  $I(I_y)$ . Результаты расчета поместить в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

$I_y$	А	0	0,2	0,3	0,4	Примечание
$I$	А					$U =$ В

4.3.4 При этом же значении  $U$  снять зависимость  $I(I_y)$ . Снять  $8 \div 10$  точек. Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.3

$I_y$	$U_y$	$I$	$P_y = U_y \cdot I_y$	$P = I^2 \cdot R_n$	$K_p$
А	В	А	Вт	Вт	

4.3.5 По расчетным и экспериментальным данным построить зависимости  $I(I_y)$ .

4.3.6 По результатам измерений определить и построить зависимости  $P(P_y)$ ,  $K_p(P_y)$  при  $U = const$ . Результаты внести в таблицу 4.3.

#### 4.4 Контрольные вопросы

4.4.1 Как (согласно или встречно) включаются рабочие обмотки магнитного усилителя? Объяснить необходимость такого включения.

4.4.2 Почему в кривой тока нагрузки отсутствуют четные гармоники?

## Список литературы

1. Никольский О.К. Теоретические основы электротехники. [Электронный ресурс] – 2-е изд., перераб. и доп. – Барнаул. 2006. – 768 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2006 г. – 701 с. – 55 экз.
3. Воробьев Н.П. Теоретические основы электротехники. [Электронный ресурс]: Учебное пособие для вузов. В 2-х томах. - 2-е изд., перераб. и доп. – Электрон. дан. – Барнаул: Алт.гос.тех.ун-т. Им. И.И. Ползунова, 2005. – 330 с.
4. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов./ К.С. Демирчян, Н.В Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 6 экз.
5. Гетманов В.Т. Нелинейные электрические цепи. Курс лекций по теоретическим основам электротехники: Учебное пособие для студентов специальности 140211 – Электроснабжение всех форм обучения. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2007-65с. – 100 экз.