

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра электромеханики и ТОЭ**

*Методические указания  
к выполнению лабораторных работ по  
теоретической электротехнике  
Часть II*

УДК 621.3.01 (07)

Методические указания к выполнению лабораторных работ по теоретической электротехнике. Часть II / Под общей редакцией проф. В.Ф. Денника. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – 72 с.

Настоящие методические указания предназначены для студентов электротехнического факультета, факультета ФЭМА и частично для студентов других факультетов, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам, которые могут быть объединены понятием «Теоретическая электротехника» (ТОЭ, теория электрических и магнитных цепей, теория электромагнитного поля и др.). Они являются продолжением аналогичных методических указаний по первой части выше указанных дисциплин. В указаниях приведено описание лабораторных работ по исследованию нелинейных электрических цепей постоянного и переменного токов, цепей с распределенными параметрами, четырехполусников, а также электростатического и магнитостатического полей.

Составители:

В.Ф. Денник, проф.  
В.А. Эсауленко, проф.  
М.М. Фёдоров, проф.  
В.Ю. Черников, доц.  
А.В. Корощенко, доц.  
В.П. Черноус, доц.  
В.Х. Антамонов, доц.  
В.Е. Михайлов, доц.  
Е.А. Журавель, ст.пр.  
М.В. Апухтин, асс.  
Л.Г. Немолякина, асс.

Отв. за выпуск

В.Ф. Денник, проф.

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 12 .....	15
Лабораторная работа 13.....	20
Лабораторная работа 14.....	24
Лабораторная работа 15.....	30
Лабораторная работа 16.....	35
Лабораторная работа 17.....	39
Лабораторная работа 18.....	45
Лабораторная работа 19.....	50
Лабораторная работа 20.....	55
Лабораторная работа 21. ....	60
Лабораторная работа 22 .....	67
Литература .....	

## Лабораторная работа 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы - исследование вольтамперных характеристик нелинейных сопротивлений, а также графического метода расчета электрических цепей, содержащих нелинейные элементы (НЭ).

#### 1. Пояснения к работе

Сопротивления, для которых не сохраняется прямая пропорциональная зависимость между током и напряжением, называются нелинейными. Если в электрической цепи имеется хотя бы один нелинейный элемент, она называется нелинейной.

В настоящей работе исследуются следующие элементы: лампа накаливания, нелинейное полупроводниковое сопротивление (НПС) и линейное сопротивление.

Примерный вид вольтамперных характеристик лампы накаливания и нелинейного полупроводникового сопротивления приведен соответственно на рис. 12.1 и 12.2.

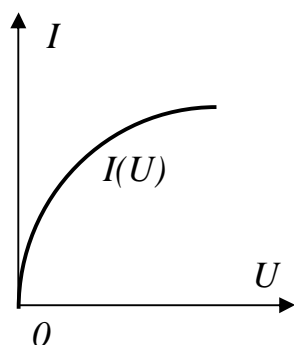


Рис. 12.1. Вольтамперная характеристика лампы накаливания

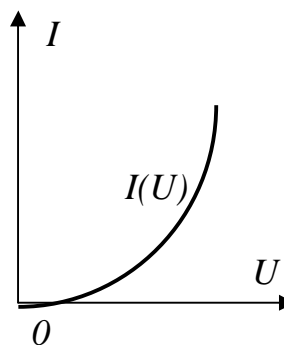


Рис. 12.2. Вольтамперная характеристика нелинейного полупроводникового сопротивления

Для снятия вольтамперных характеристик нелинейных элементов последние подключаются к реостату, включенному по схеме делителей напряжения (рис.12.3).

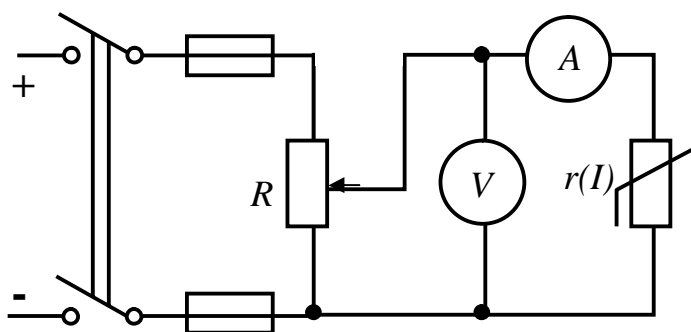


Рис. 12.3. Схема для снятия вольтамперных характеристик нелинейных элементов

При отсчете показаний приборов необходимо помнить, что некоторые нелинейные элементы являются инерционными. Поэтому каждый последующий отсчет необходимо делать спустя 5-10с после установления режима. Снимая вольтамперные



2.5. Собрать схемы, соответствующие п.2.4,а,б,в и экспериментально проверить результаты графического расчета.

Ток  $I_{\Sigma}$  измерить для тех же значений напряжений, для которых расчетным путем получены токи  $I_p$ .

Результаты измерений также свести в табл. 12.2.

2.6. В одной системе координат построить зависимости статических сопротивлений нелинейных элементов от напряжения.

### 3. Методические указания к оформлению отчета

3.1. При оформлении отчета, кроме схемы рис.12.3, привести схемы, соответствующие исследованиям п.2.5.

3.2. При графическом расчете нелинейных цепей для наглядности желательно воспользоваться цветными карандашами или фломастерами.

### 4. Вопросы для самопроверки

4.1. Какие цепи называются нелинейными?

4.2. Что называется ВАХ?

4.3. Как определяется статическое и дифференциальное сопротивления НЭ?

4.4. В чем заключается графический расчет при последовательном, параллельном и смешанном соединении НЭ?

4.5. Как изменяется статическое сопротивление лампы накаливания с ростом напряжения?

4.6. Назовите область применения исследуемых в работе нелинейных элементов.

## *Лабораторная работа 13*

### ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШКИ СО СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Цель работы - исследование зависимости параметров схемы замещения и потерь в стали катушки от длины воздушного зазора и напряжения сети.

#### 1. Пояснения к работе

Синусоидальное напряжение на зажимах катушки со стальным сердечником уравнивается ЭДС, индуктируемой основным магнитным потоком в сердечнике, а также падениями напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях ее обмотки, т.е.

$$\underline{U} = -\underline{E} + \underline{I} \cdot r + jx_s \cdot \underline{I} = \underline{I} \cdot \underline{Z} - \underline{E}, \quad (1.1)$$

где:  $r$  - активное сопротивление обмотки (сопротивление меди);  
 $x_s$  - индуктивное сопротивление обмотки, обусловленное магнитным потоком рассеяния;  
 $\underline{Z}$  - комплекс полного сопротивления обмотки;  
 $\underline{E}$  - ЭДС самоиндукции от основного магнитного потока

$$E = 4,44 \cdot f \cdot W \cdot \Phi_m, \quad (1.2)$$

где:  $W$  - число витков катушки;  
 $f$  - частота сети;  
 $\Phi_m$  - амплитуда основного магнитного потока.

Для определения ЭДС  $E$  используется дополнительная обмотка с числом витков  $W_d$ , помещенная на том же сердечнике, что и основная. Измерив напряжение на зажимах этой обмотки  $U_d$ , и зная число витков  $W$  и  $W_d$ , нетрудно определить ЭДС:

$$E = \frac{W}{W_d} \cdot U_d, \quad (1.3)$$

и амплитудное значение магнитной индукции

$$B_m = \frac{U_d}{4,44 \cdot f \cdot W_d \cdot S_c}, \quad (1.4)$$

где  $S_c$  - поперечное сечение сердечника катушки.

Схема замещения катушки со стальным сердечником показана на рис. 13.1. Здесь:  $r_o$  - активное сопротивление, характеризующее тепловые потери в стали;  
 $x_o$  - индуктивное сопротивление, обусловленное основным потоком.

Общее активное сопротивление катушки

$$R = r + r_o, \quad (1.5)$$

а общее реактивное сопротивление

$$x = x_s + x_o. \quad (1.6)$$

Тепловые потери в стали

$$P_c = P_r + P_b, \quad (1.7)$$

где:  $P_r$  - потери на гистерезис;  
 $P_b$  - потери от вихревых токов.

При частоте  $f = 50$  Гц потери в стали обычно определяются по формуле

$$P_c = P_{1/50} \cdot B_m^2 \cdot G, \quad (1.8)$$

где:  $P_{1/50}$  - удельные потери (в 1 кг стали) при  $f = 50$  Гц и  $B_m = 1$  Тл (зависят от сорта стали и толщины листов шихтованного

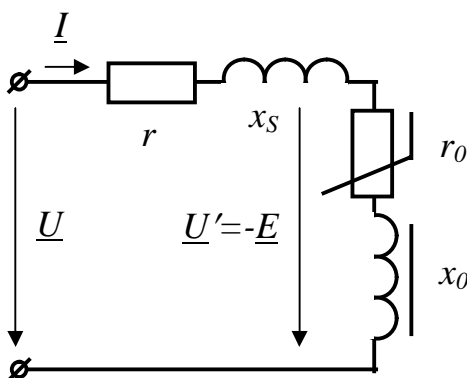


Рис. 13.1. Схема замещения катушки со стальным сердечником

сердечника);

$G$  - масса сердечника.

В катушке со стальным сердечником обычно падение напряжения  $I \cdot Z$  значительно меньше ЭДС  $E$ . Поэтому можно считать, что  $U \approx E$ . Следовательно,  $B_m$  пропорционально  $U$ , и при постоянной частоте потери в стали будут примерно пропорциональны квадрату напряжения сети, т.е.  $P_c \approx U^2$ . Параметры катушки определяют из выражений:

$$Z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2}; \quad P_c = P - I^2 \cdot r; \quad r_0 = \frac{P_c}{I^2} = R - r; \quad Z_0 = \frac{E}{I}; \quad x = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}; \quad x_s = x - x_0. \quad (1.9)$$

Коэффициент мощности катушки  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ .

При изменении воздушного зазора сердечника  $\delta$  или напряжения сети  $U$  сопротивления  $r_0$  и  $x_0$  катушки не будут оставаться постоянными, а следовательно, будет изменяться полное сопротивление  $Z$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , ток  $I$  и потребляемая мощность  $P$ .

Так, например, при увеличении длины воздушного зазора происходит возрастание тока катушки при неизменной величине напряжения сети. Это объясняется тем, что воздушный зазор из-за очень малой, по сравнению со сталью, магнитной проницаемостью оказывает большое сопротивление магнитному потоку. В связи с этим, при увеличении длины зазора падает индуктивность  $L_0$  (коэффициент пропорциональности между потокосцеплением и током) и индуктивное сопротивление  $x_0$  основного магнитного потока. Это приводит к уменьшению полного сопротивления цепи  $Z$ , в составе которого  $x_0$

имеет наибольший удельный вес, и как следствие - к возрастанию тока. Этот факт может быть объяснен и на основании закона полного тока

$$i \cdot W = H_c \cdot l_c + H_b \cdot l_b,$$

если учесть, что амплитуда магнитной индукции  $B_m$ , а значит и напряженности магнитного поля в сердечнике  $H_c$  и в воздухе  $H_b$  поддерживаются подведенным напряжением (1.2) и уменьшаются незначительно, а  $l_b$  возрастает.

Векторная диаграмма катушки со стальным сердечником строится следующим образом (рис.13.2). Заменив несинусоидальные

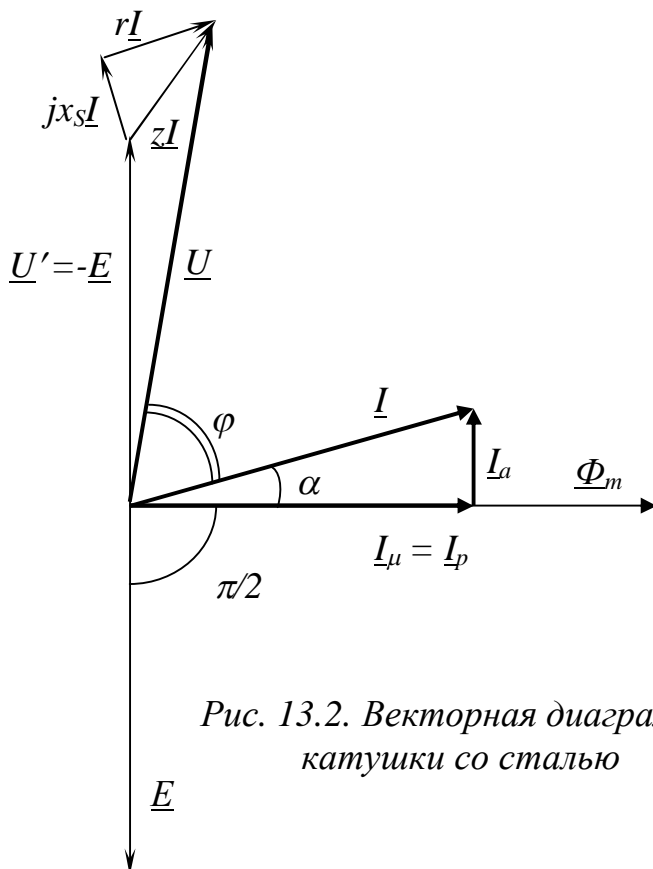


Рис. 13.2. Векторная диаграмма катушки со сталью



функции времени эквивалентными синусоидами, в выбранном масштабе произвольно указывают положение вектора основного магнитного потока  $\Phi_m$ . ЭДС самоиндукции  $\underline{E}$  отстает по фазе на  $90^\circ$  от основного магнитного потока. Активная составляющая тока  $\underline{I}_a$  ( $I_a = P_c/E$ ) совпадает с напряжением  $\underline{U} = -\underline{E}$ , а реактивная составляющая тока  $\underline{I}_p$  ( $I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2}$ ) отстает от этого напряжения (совпадает с  $\Phi_m$ ).

Затем, построив вектор тока  $\underline{I} = \underline{I}_a + \underline{I}_p$ , находят положение вектора напряжения сети  $\underline{U}$  по формуле (1.1).

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с конструкцией катушки со стальным сердечником и записать в табл.13.1 ее основные характеристики: число витков основной  $W$  и дополнительной  $W_D$  обмоток, поперечное сечение сердечника  $S_c$ , и активное сопротивление основной обмотки  $r$ .

Таблица 13.1

Основные характеристики катушки со сталью

$W$	$W_D$	$S_c, \text{см}^2$	$r, \text{Ом}$

2.2. Собрать схему (рис.13.3).

2.3. Провести исследования катушки со стальным сердечником при постоянной величине напряжения  $U$  на ее зажимах и переменном воздушном зазоре  $\delta$ .

2.3.1. Установить и затем поддерживать в процессе проведения экспериментов постоянное значение напряжения на зажимах катушки  $U = 60\text{--}80\text{В}$ .

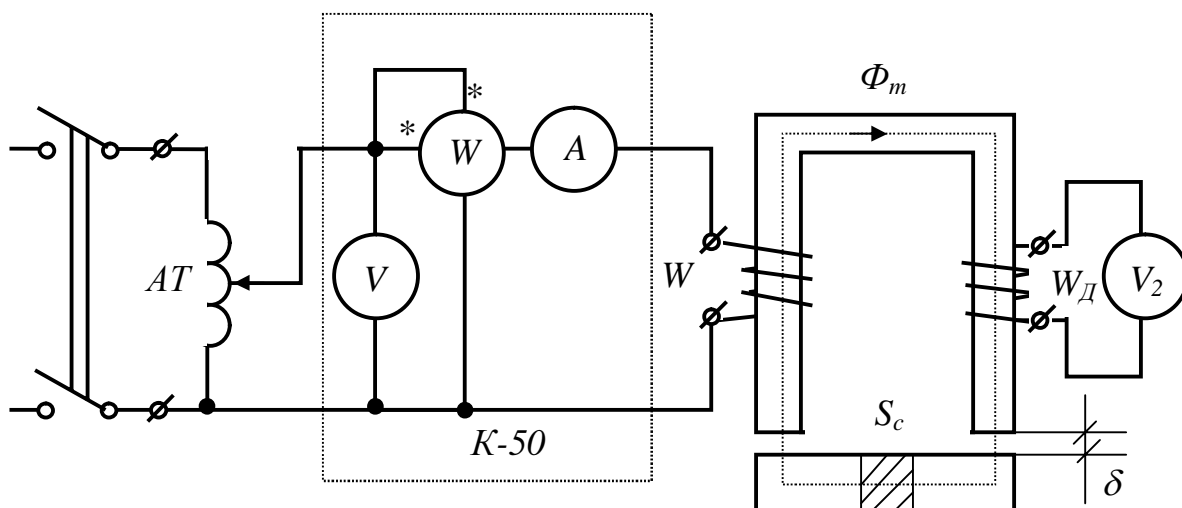


Рис. 13.3. Схема для исследований катушки со стальным сердечником

2.3.2. Изменяя воздушный зазор  $\delta$  в сердечнике катушки от 0 до 50 мм, провести 6-7 измерений тока  $I$ , мощности  $P$  и напряжения  $U_D$  на

дополнительной обмотке. При этом нужно следить за тем, чтобы ток в катушке не превышал  $3,5 A$ .

По данным измерений определить параметры катушки  $R, x, Z, r_0, x_0, Z_0, x_s$ , а также  $P_c, E, \cos\varphi$  и  $B_m$ .

Результаты измерений и вычислений записать в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Исследование параметров катушки при изменении длины воздушного зазора

№, п/п	Измерено					Вычислено										
	$U,$ $B$	$I,$ $A$	$P,$ $Bm$	$U_d,$ $B$	$\delta,$ $мм$	$E,$ $B$	$B_m,$ $Tл$	$Z,$ $Ом$	$R,$ $Ом$	$x,$ $Ом$	$P_c,$ $Bm$	$Z_0,$ $Ом$	$r_0,$ $Ом$	$x_0,$ $Ом$	$x_s,$ $Ом$	$\cos\varphi$
1																
2																
и т.д.																

2.3.3. По данным табл.13.2 в одной и той же системе координат построить графики зависимостей:  $I(\delta); Z_0(\delta); B_m(\delta)$  при  $U=const$ .

Объяснить характер графиков.

2.4. Исследовать катушку со стальным сердечником при постоянном воздушном зазоре  $\delta$  и изменяющемся напряжении  $U$ , для чего:

а) установить постоянный воздушный зазор в сердечнике  $\delta=0$ ;

б) изменяя с помощью автотрансформатора напряжение  $U$  от нуля до максимально возможного значения, произвести 5-6 измерений тока  $I$ , мощности  $P$  и напряжения  $U_d$ .

По данным измерения определить параметры катушки.

Результаты измерений и вычислений записать в табл.13.3.

Таблица 13.3

Исследование параметров катушки при изменении величины напряжения источника

№, п/п	Измерено					Вычислено										
	$U,$ $B$	$I,$ $A$	$P,$ $Bm$	$U_d,$ $B$	$\delta,$ $мм$	$E,$ $B$	$B_m,$ $Tл$	$Z,$ $Ом$	$R,$ $Ом$	$x,$ $Ом$	$P_c,$ $Bm$	$Z_0,$ $Ом$	$r_0,$ $Ом$	$x_0,$ $Ом$	$x_s,$ $Ом$	$\cos\varphi$
1																
2																
и т.д.																

в) по данным табл.13.3 в одной и той же системе координат построить кривые:  $P_c(U); I(U); Z_0(U); B_m(U)$  при  $\delta = const$ .

Объяснить характер кривых.

г) последовательно с основной обмоткой включить реостат, на котором установить небольшое сопротивление (3-5 Ом). К зажимам этого реостата подключить вход электронного осциллографа. При напряжении  $U$ , равном 240В, 160В и 80В с экрана осциллографа снять кривую напряжения на реостате, которая повторяет кривую тока катушки. Указанные осциллограммы привести

в отчете. Сделать заключение о влиянии напряжения на форму кривой тока катушки.

2.5. Для одного из отсчетов по данным табл.13.3 построить векторную диаграмму (с соблюдением масштабов) и схему замещения катушки со стальным сердечником.

### **3. Вопросы для самопроверки**

3.1. Каково назначение стальных сердечников трансформаторов и электрических машин?

3.2. Почему сердечники трансформаторов и электрических машин выполняются шихтованными из отдельных, изолированных друг от друга, тонких листов?

3.3. Начертите схему замещения и векторную диаграмму катушки со стальным сердечником. Объясните физическую сущность каждого элемента схемы.

3.4. Как и почему изменяется ток катушки при увеличении воздушного зазора в сердечнике?

3.5. Объясните характер вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником.

3.6. Как и почему изменяется реактивное сопротивление катушки при увеличении питающего напряжения?

3.7. Какие виды потерь имеются в стали? Как зависят потери в стали от частоты? От подведенного напряжения?

## ***Лабораторная работа 14***

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ КАТУШКИ СО СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ И КОНДЕНСАТОРА**

Цель работы - изучение основных свойств цепи переменного тока с последовательным соединением нелинейной индуктивности и емкости: явление феррорезонанса напряжений и стабилизации напряжения.

#### **1. Пояснения к работе**

Свойства цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки со стальным сердечником и конденсатора (рис.14.2), следует изучать на основании их вольтамперных характеристик.

Для снятия вольтамперных характеристик катушки и конденсатора можно воспользоваться схемой (рис. 14.1).

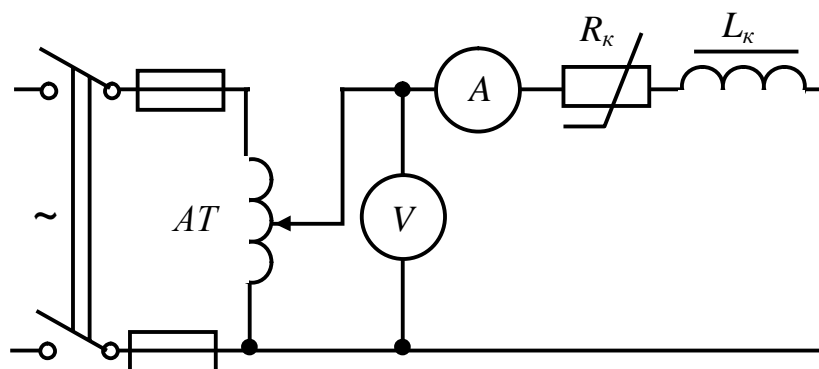


Рис. 14.1. Схема для снятия вольтамперной характеристики катушки

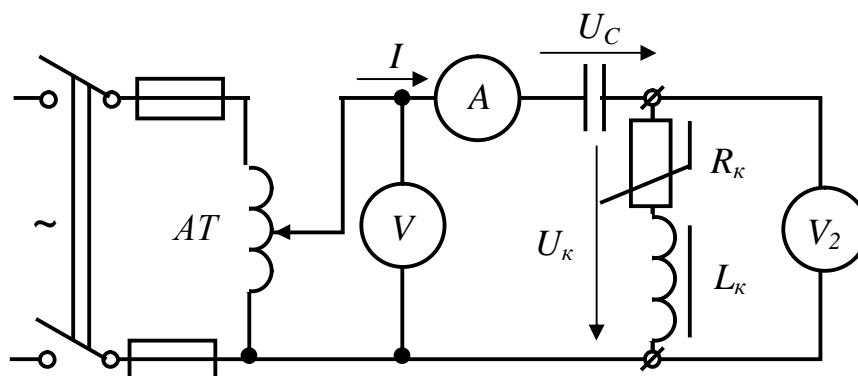


Рис. 14.2. Схема для исследования цепи, состоящей из последовательно включенных катушки со сталью и конденсатора

Вольтамперная характеристика катушки с насыщающимся стальным сердечником близка по форме к кривой намагничивания. Так как для цепи, состоящей из последовательно включенных катушки и конденсатора, напряжения на индуктивности  $U_L$  и на емкости  $U_C$  находятся в противофазе, то при построении вольтамперных характеристик значения  $U_L$  откладываются вверх относительно оси абсцисс (оси тока  $I$ ), а значение  $-U_C$  - вниз (рис. 14.3).

Напряжение на зажимах этой цепи (для эквивалентных синусоид)

$$\underline{U} = \underline{U}_a + \underline{U}_L + \underline{U}_C, \quad (1.1)$$

где:  $U_a$  и  $U_L$  - активное и индуктивное падение напряжений на катушке;  $U_C$  - падение напряжения на конденсаторе.

Напряжение на катушке

$$U_K = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \quad (1.2)$$

Часто в катушках со стальными сердечниками активное сопротивление значительно меньше индуктивного, поэтому в таких случаях можно принять

$$U_K \approx U_L, U \approx U_L - U_C. \quad (1.3)$$

Вольтамперная характеристика  $U(I)$  цепи (рис. 14.2) представляет собой сложную кривую. При увеличении напряжения  $U$  от нуля до значения  $U_A$  ток будет плавно увеличиваться от нуля до  $I_A$  (рис. 14.3).

Как только напряжение  $U$  станет больше  $U_A$ , режим цепи переходит из точки "А" характеристики  $U(I)$  в точку "Д", чему соответствует скачок тока от  $I_A$  до  $I_D$ . При дальнейшем увеличении напряжения ток будет плавно увеличиваться по кривой ДК.

Таким образом, в точке А происходит скачок тока, сопровождающийся "опрокидыванием" его фазы, так как до скачка  $U_L > U_C$ , а после скачка  $U_L < U_C$ .

Если теперь начать уменьшать напряжение  $U$ , то ток плавно будет уменьшаться до значения  $I_B$  (при этом напряжение  $U = U_B$ ).

При дальнейшем, даже незначительном уменьшении напряжения  $U$  ток скачкообразно уменьшается до значения  $I_E$ . Вместе с обратным скачком тока происходит обратное изменение его фазы. При дальнейшем уменьшении напряжения ток плавно будет уменьшаться до нуля.

В точке "В" характеристики  $U(I)$  индуктивное сопротивление катушки становится равным емкостному сопротивлению конденсатора  $x_L = x_C$ , при этом  $U_L \approx U_C$ ,  $U_B = IR$ ,  $\varphi \approx 0$ .

Точка "В" на вольтамперной характеристике  $U(I)$  характеризует феррорезонансный режим (феррорезонанс напряжений).

При питании цепи (рис. 14.2) от автотрансформатора (от источника ЭДС)

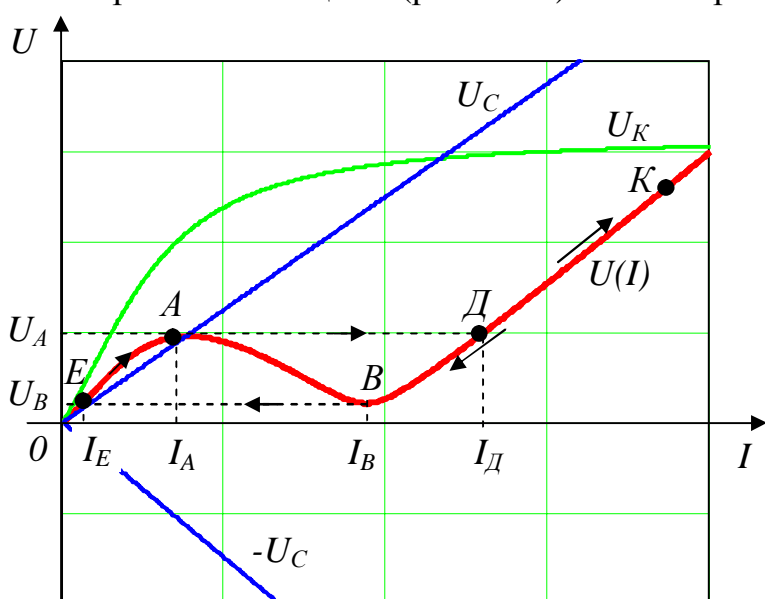


Рис. 14.3. Вольтамперные характеристики для цепи, состоящей из последовательно включенных катушки со сталью и конденсатора

участок ВАХ АВ (рис. 14.3) является неустойчивым и практически быть снятым экспериментально не может. Нелинейные свойства цепи (рис.14.2) дают возможность использовать ее как простейший стабилизатор напряжения. Приемник энергии при этом подключается параллельно катушке с насыщающимся стальным сердечником.

На рис. 14.4 пояснены действия стабилизатора напряжения в режиме холостого хода: изменение напряжения на приемнике  $\Delta U_2$  оказывается значительно

меньшим изменения входного напряжения  $\Delta U_1$ . Однако следует заметить, что при нагружении стабилизатора его стабилизирующие свойства ухудшаются.

Стабилизация выходного напряжения имеет место после "скачка" тока, когда ток достигает значительной величины.

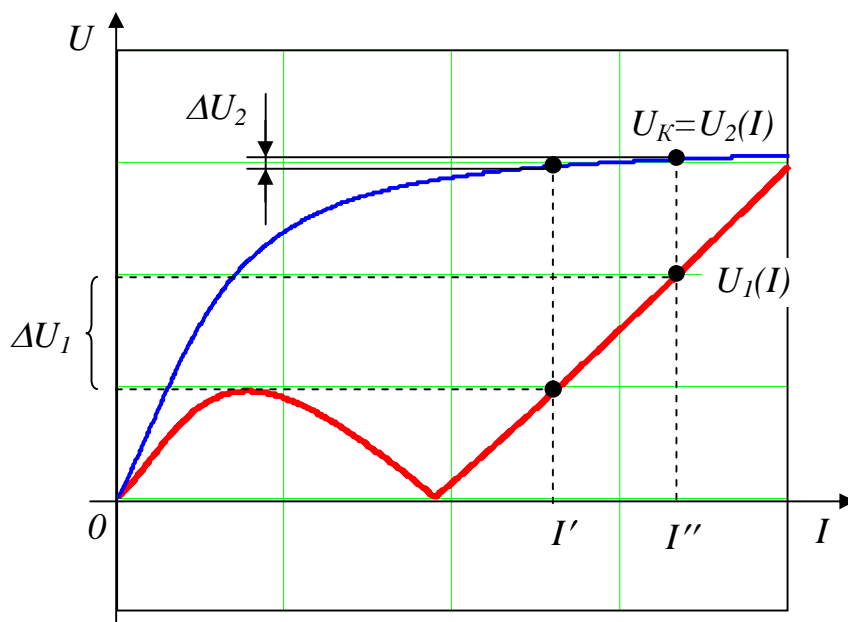


Рис. 14.4. Вольтамперные характеристики стабилизатора напряжения в режиме холостого хода

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Исследовать феррорезонанс напряжений.

2.1.1. Собрать схему (рис. 14.1).

2.1.2. Изменяя напряжение  $U$  с помощью автотрансформатора АТ, снять вольтамперную характеристику катушки со стальным сердечником (рекомендуется характеристику снимать при токах 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,7; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 А).

Результаты измерений внести в табл. 14.1.

2.1.3. Заменяв в схеме рис. 14.1 катушку конденсатором, снять вольтамперную характеристику конденсатора. Для этого достаточно взять 2-3 отсчета напряжения и тока, так как конденсатор является линейным элементом.

Результаты измерений записать в табл.14.1.

2.1.4. По данным табл. 14.1 в общей системе координат построить вольтамперные характеристики катушки  $U_K(I)$ , конденсатора  $U_C(I)$  и последовательного соединения катушки со стальным сердечником и конденсатора  $U(I)_{\text{расч}}$ , которая получается в результате алгебраического суммирования характеристик  $U_K(I)$  и  $U_C(I)$ .  $U_K$  принять равным  $U_L$ .

2.1.5. Собрать схему (рис. 14.2).

2.1.6. Снять ВАХ последовательного соединения катушки и конденсатора  $U(I)_{\text{эксп}}$ . Делать это рекомендуется в таком порядке: начиная с нуля, с помощью автотрансформатора АТ повысить напряжение  $U$  и определить, при каком напряжении ( $U_A$ ) происходит прямой скачок тока. При этом напряжении определить токи  $I_A$  и  $I_D$  (рис. 14.3). Затем снизить напряжение, определить, при

каком  $U$  происходит обратный скачок тока ( $U_B$ ) и при этом напряжении определить токи  $I_B$  и  $I_E$ . Кроме того, снять еще по две точки на участках ВАХ EA, ДК и ВД.

Результаты измерений внести в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Вольтамперные характеристики цепи и составляющих ее элементов

Катушка		Конденсатор		Последовательное соединение катушки и конденсатора			
$U_K, B$	$I, A$	$U_C, B$	$I, A$	$U_{расч}, B$	$I_{расч}, A$	$U_{эксп}, B$	$I_{эксп}, A$

2.1.7. По данным измерений п.2.1.6 построить экспериментальную характеристику  $U(I)_{эксп}$  и сравнить ее с расчетной характеристикой  $U(I)_{расч}$ , для чего указанные характеристики должны быть построены в одной и той же системе координат. Неустойчивый участок экспериментальной характеристики изобразить пунктирной линией.

2.1.8. На характеристиках цепи  $U(I)$  четко обозначить точку, характеризующую феррорезонансный режим.

2.1.9. Объяснить причины некоторого несовпадения характеристик  $U(I)_{расч}$  и  $U(I)_{эксп}$ .

2.2. Выполнить исследование стабилизатора напряжения.

2.2.1. Параллельно катушке (рис.14.2) подключить вольтметр электромагнитной системы.

2.2.2. Изменяя входное напряжение  $U_1$ , снять зависимость между  $U_1$  и  $U_2$ . При этом следить, чтобы ток в цепи не превышал  $3A$ .

Результаты измерений записать в табл. 14.2.

Таблица 14.2

$U_1, B$						
$U_2, B$						

2.3. Построить графическую зависимость  $U_2 (U_1)$ .

2.4. Сделать выводы о стабилизирующих свойствах схемы (рис. 14.2).

### 3. Вопросы для самопроверки

3.1. Чем объясняется нелинейность характеристики  $U_K(I)$ ?

3.2. Каково принципиальное отличие способа достижения феррорезонанса напряжений от способов достижения резонанса в линейной цепи  $r, L, C$ ?

3.3. Какой участок ВАХ последовательного соединения катушки и конденсатора является неустойчивым и как его можно получить экспериментально?

3.4. Как изменяется фазовый угол при прямом, а также при обратном скачках тока?

3.5. Каковы причины отличия теоретической ВАХ последовательного соединения катушки со сталью и конденсатора экспериментальной?

3.6. Начиная с какого напряжения  $U_1$ , происходит нормальная работа простейшего стабилизатора напряжения?

## *Лабораторная работа 15*

### ИССЛЕДОВАНИЕ УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Цель работы - исследование свойств трехфазных цепей, содержащих нелинейные элементы на примере ферромагнитного утроителя частоты.

#### **1. Пояснения к работе**

Если к зажимам катушки со стальным сердечником приложить синусоидальное напряжение достаточной величины, то вследствие нелинейного характера ее сопротивления ток, протекающий через обмотку катушки, принимает несинусоидальную форму. В составе тока появляются высшие нечетные гармоники, из которых наиболее ярко выделяется третья гармоника. Кривая тока имеет, в сравнении с синусоидой, заостренную форму, из-за чего максимумы первой и третьей гармоник совпадают.

Магнитный поток в сердечнике имеет синусоидальную форму вследствие того, что наводимая им ЭДС самоиндукции в обмотке катушки должна уравновесить приложенное к катушке синусоидальное напряжение сети. Если же катушка со стальным сердечником питается от источника синусоидального тока, то поток в сердечнике принимает несинусоидальную, уплощенную форму из-за насыщения сердечника, поэтому напряжение на зажимах катушки в этом случае также имеет несинусоидальную форму.

Сказанное выше иллюстрируется построениями, выполненными для двух случаев: при питании катушки со стальным сердечником синусоидальным напряжением (рис. 15.1, а) и синусоидальным током (рис. 15.1, б).

Если три одинаковые катушки включить звездой, то при наличии нулевого провода, к каждой катушке будет приложено синусоидальное фазное напряжение сети. При этом токи, протекающие через обмотки, будут иметь несинусоидальную форму. Через нулевой провод будут замыкаться токи третьей и кратным трем гармоник каждой фазы. Если же отключить нулевой провод, то фазные токи станут практически синусоидальными, так как указанные гармоники тока не могут замыкаться по цепи. Следовательно, магнитные потоки всех катушек примут несинусоидальную форму, поэтому и



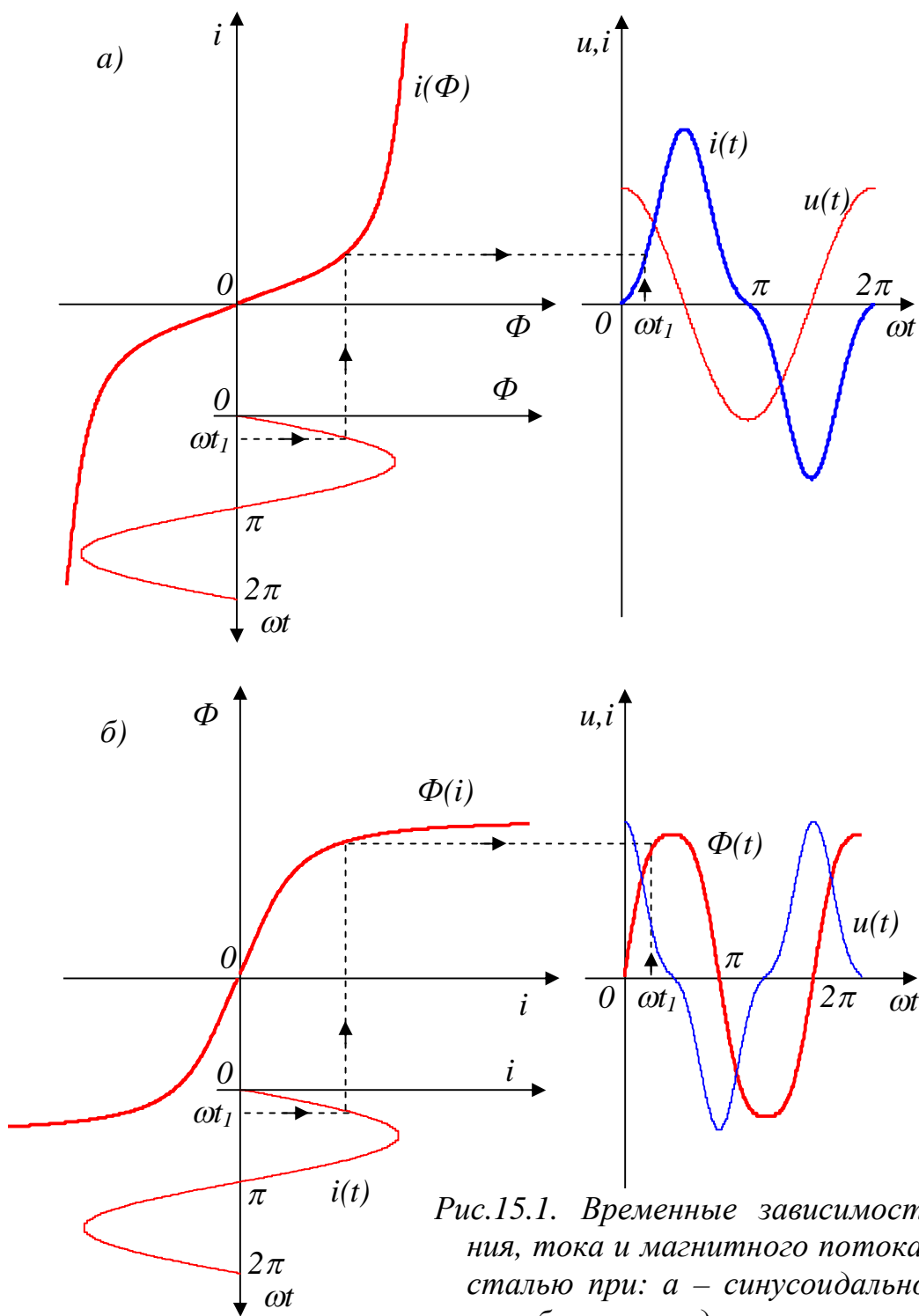


Рис.15.1. Временные зависимости напряжения, тока и магнитного потока катушки со сталью при: а – синусоидальном напряжении; б – синусоидальном токе

фазные ЭДС катушек будут несинусоидальными и иметь ярко выраженную третью гармонику.

Это явление положено в основу устройства электромагнитного утроителя частоты. Утроитель частоты представляет собой три одинаковых насыщенных однофазных трансформатора, первичные обмотки которых соединены в звезду без нулевого провода. Напряжение утроенной частоты снимается с вторичных обмоток, соединенных в открытый (разомкнутый) треугольник (рис. 15.2). При таком способе соединения вторичных обмоток сумма напряжений всех гармоник, не кратным трем, обращается в нуль, а третья гармоника,

образующая нулевую последовательность, суммируется, и напряжение на вторичных зажимах  $U_{az}$  равно сумме напряжений третьей гармоники каждой фазы (без учета высших гармоник, кратных трем).

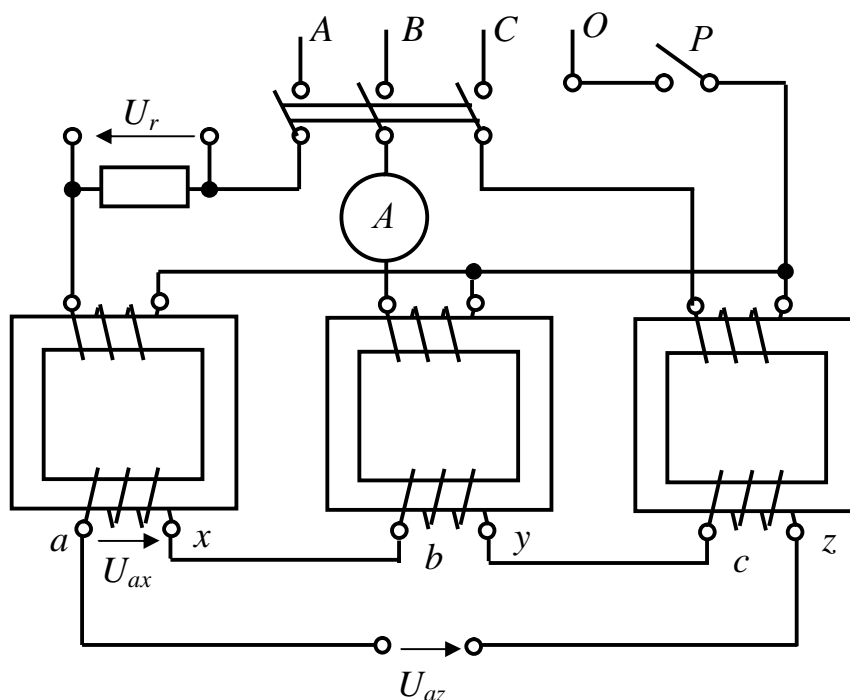


Рис. 15.2. Схема ферромагнитного утроителя частоты

Если звезда, составленная из нелинейных элементов, питается от трехфазного источника с выведенной нулевой точкой, то утроение частоты можно получить, не прибегая к трансформации напряжений. При синусоидальных ЭДС источника питания с частотой  $f$  между нейтральными точками генератора и трансформаторов возникает напряжение, изменяющееся с частотой  $3f$ , амплитуда которого тем больше, чем сильнее насыщение сердечника.

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему рис. 15.2.

2.2. Снять на кальку с экрана осциллографа кривую фазного тока первичной цепи утроителя, подключив вход осциллографа параллельно зажимам реостата  $r$ :

- а) при включенном нулевом проводе;
- б) при выключенном нулевом проводе.

Дать объяснение различию форм полученных кривых.

2.3. При одном и том же усилении осциллографа снять на кальку кривые фазного напряжения  $U_{\phi} = U_{ax}$ , подключив вход осциллографа к зажимам  $ax$ :

- а) при выключенном нулевом проводе;
- б) при включенном нулевом проводе.

2.4. При выключенном нулевом проводе снять на кальку кривую напряжения  $U_{az}$ , подключив вход осциллографа к зажимам а-з. Охарактеризовать полученную кривую.

2.5. При том же усилении осциллографа, что и в п.2.4, снять на кальку кривую напряжения  $U_{az}$  при включенном нулевом проводе.

Дать краткую характеристику полученной кривой.

**Указание:** на каждой из осциллограмм, снятых в п.2.2 и п.2.5, должны быть приведены масштабы по напряжению  $m_U$  и по времени  $m_t$ , определяемые положением переключателей осциллографа.

6. По осциллограмме (п.2.3а) графо-аналитическим методом рассчитать амплитуду третьей гармоники напряжения  $U_{ax}$  и сравнить ее с амплитудой напряжения  $U_{az}$  (осциллограмма п.2.4).

### 3. Вопросы для самопроверки

3.1. На чём основан принцип действия ферромагнитного утроителя частоты?

3.2. Какие гармоники содержат токи первичных обмоток исследуемой схемы утроителя частоты:

а) при включенном нулевом проводе;

б) при выключенном нулевом проводе.

3.3. Какие гармоники тока замыкаются через нулевой провод рассматриваемого утроителя?

3.4. Какие гармоники содержатся в фазных напряжениях вторичных обмоток утроителя?

3.5. Присутствует ли на выходе утроителя напряжение первой гармоники? Если нет, то почему?

3.6. Каково назначение стального сердечника в утроителе частоты?

### *Лабораторная работа 16*

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКОВ

Цель работы - экспериментальное определение основных соотношений напряжений, токов и мощностей в схемах неуправляемых выпрямителей переменного тока и анализ временных зависимостей напряжений на различных участках цепи.

#### *1. Пояснения к работе*

Выпрямление переменного тока производится с помощью диодов (электрических вентилях), представляющих собой элементы с наиболее ярко выраженной несимметрией ВАХ (обладающие односторонней проводимостью).

В большинстве случаев диод можно считать идеальным, т.е. обладающим нулевым сопротивлением в проводящем направлении и бесконечно большим сопротивлением в непроводящем состоянии.

Простейшей схемой выпрямления является однополупериодная, представляющая собой последовательное соединение диода и сопротивления нагрузки (рис. 16.1). В этой схеме напряжение на нагрузке содержит постоянную составляющую

$$U_{Hcp} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_m}{\pi} \approx 0,45U = k_{CX}U, \quad (1.1)$$

где  $k_{CX}$  - коэффициент схемы выпрямления.

Значительно более близкими к постоянному являются выпрямленные напряжения в мостовых схемах - однофазной (рис.16.2) и трехфазной (рис. 16.3), для которых (соответственно):

$$U_{Hcp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{2}{\pi} U_m \approx 0,9U = k_{CX}U; \quad (1.2)$$

$$U_{Hcp} = \frac{6}{T} \int_0^{\frac{T}{3}} U_{nm} \cdot \sin \omega t \cdot dt \approx 1,35U_{Л} \approx 2,35U_{\Phi} = k_{CX}U_{\Phi}, \quad (1.3)$$

где  $U_{Л}, U_{\Phi}$  - линейное и фазное напряжения источника.

Для выпрямителей коэффициент мощности  $\cos \varphi$  определяются по формуле:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}, \quad (1.4)$$

где:  $P, S$  - активная и полная мощности источника

$P_H = U_{Hcp} \cdot I_{Hcp}$  - мощность постоянной составляющей.

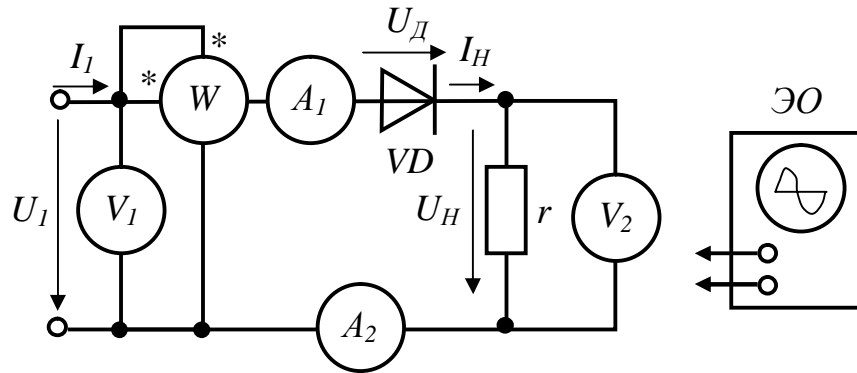


Рис. 16.1. Схема однофазного однополупериодного выпрямления

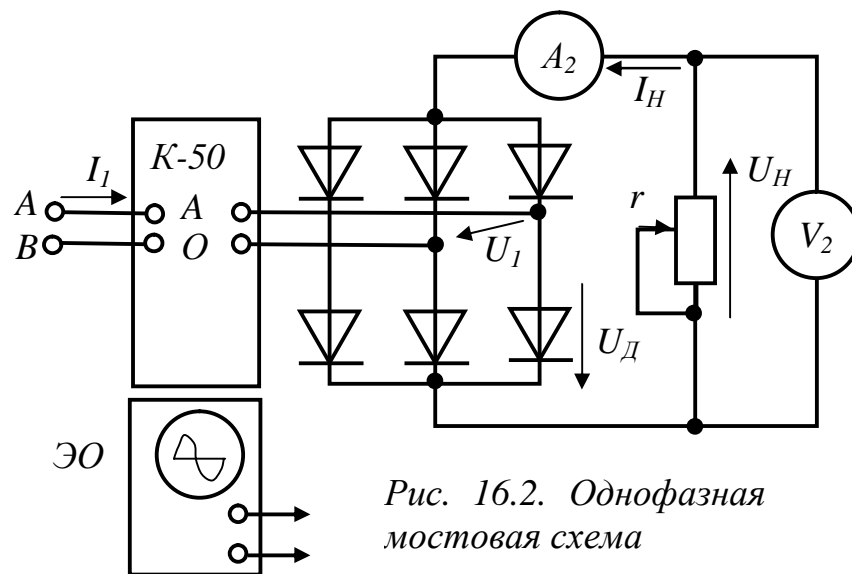


Рис. 16.2. Однофазная мостовая схема

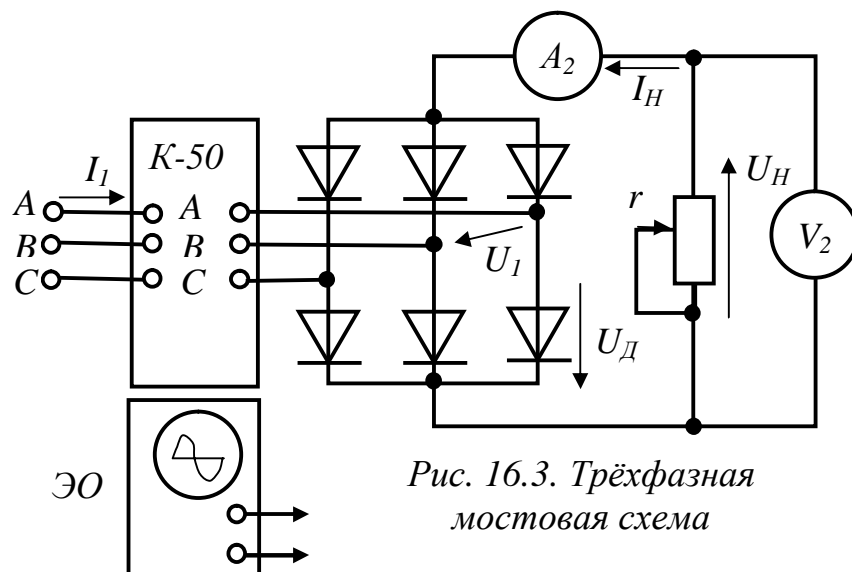


Рис. 16.3. Трёхфазная мостовая схема

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Исследовать цепь однофазного однополупериодного выпрямления переменного тока, для чего:

2.1.1. Собрать схему (рис. 16.1). Для измерения напряжения  $U$ , тока  $I$  и активной мощности  $P$  источника использовать приборы электромагнитной системы, а напряжения  $U_{HCP}$  и тока  $I_{HCP}$  нагрузки - приборы магнитоэлектрической системы, реагирующие на средние значения величин. В качестве нагрузки использовать реостат с сопротивлением  $100 \text{ Ом}$ , а в качестве диода - один из вентилях трехфазной мостовой схемы.

2.1.2. Включить цепь на линейное напряжение источника и записать в табл.16.1 показания измерительных приборов.

Таблица 16.1

Результаты исследования схемы однофазного однополупериодного выпрямления переменного тока

Измерено						Вычислено			
$U,$ $B$	$I,$ $A$	$P,$ $Bm$	$U_{HCP},$ $B$	$I_{HCP},$ $A$	$U_{Dm},$ $B$	$k_{CX}$	$\frac{U_{Dm}}{U_{HCP}}$	$\frac{I}{I_{HCP}}$	$\cos \varphi$

2.1.3. С экрана осциллографа переснять на кальку в одном масштабе графики трех напряжений  $u(t), u_d(t)$  и  $u_H(t)$ . Объяснить характер полученных кривых. Из осциллограммы  $u_d(t)$  определить величину максимального напряжения на диоде  $U_{Dm}$  и занести в табл. 16.1.

2.1.4. Вычислить отношения напряжений и токов  $\frac{U_{Dm}}{U_{HCP}}, \frac{U_{Dm}}{U_{HCP}}$ , а также  $k_{CX},$

$\cos \varphi$ .

Результаты вычислений записать в табл. 16.1.

2.2. Исследовать цепь однофазного мостового выпрямления переменного тока.

2.2.1. Собрать схему (рис. 16.2) (комплект К-50 включить по однофазной схеме измерения). Приборы  $A_2$  и  $V_2$ , должны быть магнитоэлектрической системы. В качестве нагрузки используется реостат с сопротивлением  $100 \text{ Ом}$ .

2.2.2. Включить источник и записать в табл. 16.2 показания измерительных приборов.

2.2.3. С экрана осциллографа переснять на кальку в одном масштабе временные зависимости трех напряжений  $u(t), u_d(t)$  и  $u_H(t)$ . Объяснить характер полученных кривых. Из осциллограммы  $u_d(t)$  определить величину максимального напряжения на диоде  $U_{Dm}$  и занести в табл. 16.2.

2.2.4. Вычислить коэффициент схемы  $k_{CX}$ , коэффициент мощности выпрямителя  $\cos \varphi$ , КПД выпрямителя  $\eta$  и отношения напряжений и токов в схеме. Результаты вычислений занести в табл. 16.2.

## Результаты исследования мостовых схем выпрямления переменного тока

Измерено						Вычислено				
$U,$ $B$	$I,$ $A$	$P,$ $Bm$	$U_{Hcp}$ $B$	$I_{Hcp},$ $A$	$U_{Дm},$ $B$	$k_{CX}$	$\frac{U_{Дm}}{U_{Hcp}}$	$\frac{I}{I_{Hcp}}$	$\cos \varphi$	Схема выпрямления
										Однофазная мостовая
										Трехфазная мостовая

2.3. Исследовать трехфазную мостовую схему выпрямления переменного тока.

Собрать схему рис. 16.3 (комплект К-50 включить по трехфазной схеме). Выполнить те же исследования, что и в п.2.2 и результаты занести в табл. 16.2. При этом следует иметь в виду, что для трехфазной схемы выпрямления

$$\cos \varphi = \frac{P_{\Phi}}{U_{\Phi} I_{\Phi}} .$$

Здесь  $P_{\Phi}$  - активная мощность одной фазы источника,  $U_{\Phi}$  - фазное напряжение источника. Следует также учесть, что К-50 измеряет фазное напряжение источника.

### 3. Вопросы для самопроверки

3.1. Какие системы приборов используются для измерения действующих и средних величин напряжений и токов?

3.2. Изобразите ВАХ реального и идеального вентиляей.

3.3. Как рассчитать выпрямленное напряжение в схемах однополупериодного, однофазного мостового и трехфазного мостового выпрямления?

3.4. Нарисуйте графики выпрямленного напряжения для схем однополупериодного, однофазного мостового и трехфазного мостового выпрямления.

### Лабораторная работа 17

#### УЛУЧШЕНИЕ ФОРМЫ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СХЕМ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы - экспериментальное исследование основных соотношений напряжений, токов и мощностей в схемах неуправляемых выпрямителей

переменного тока с улучшенным выходным напряжением и анализ временных зависимостей этих напряжений.

## 1. Задание

1.1. Разработать схему, позволяющую простейшими средствами (один электролитический конденсатор  $C$ ) улучшить форму выпрямленного напряжения при однополупериодном выпрямлении переменного тока.

1.2. Собрать и исследовать схему, разработанную в п.1.1.

Полученные результаты оформить в виде таблицы и сравнить их с результатами, которые имели место при выполнении п.1.1 в работе № 16.

1.3. Разработать схему, позволяющую простейшими средствами (один электролитический конденсатор) улучшить форму выпрямленного напряжения при однофазном мостовом выпрямлении переменного тока.

1.4. Собрать и исследовать схему, разработанную в п.1.3.

Полученные результаты оформить в виде таблицы и сравнить их с результатами, которые имели место при выполнении п.1.2 в работе № 16.

1.5. Разработать схему трехфазного мостового выпрямителя с улучшенной, благодаря применению электролитического конденсатора, формой выходного напряжения.

1.6. Собрать и исследовать схему, разработанную в п.1.5.

Полученные результаты оформить в виде таблицы и сравнить их с результатами, которые имели место при выполнении п.1.3 в работе № 16.

## 2. Технические характеристики используемого оборудования

Диоды типа Д245 ( $I_{пр} = 10A$ ;  $U_{обр} = 300B$ ) - 6 шт.

Реостат 100 Ом, 2А.

Конденсаторы:

электролитический 300 мкФ, 300В;

неполярный 30-50 мкФ, 300В.

Тумблер (выключатель) - 2 шт.

Электронный осциллограф.

Измерительные приборы: магнитоэлектрической системы - вольтметр и амперметр, электромагнитной (электродинамической системы) - амперметр, два вольтметра, комплект К-50, ваттметр.

Источник питания - симметричный трехфазный с линейным напряжением 127В.

## 3. Методические указания к выполнению работы

3.1. При выполнении работы рекомендуется воспользоваться результатами, полученными при выполнении работы № 16.

3.2. При разработке схем по п.1.1; 1.3 и 1.5 целесообразно за основу взять соответствующие схемы, исследованные в работе № 16. В эти схемы должны быть включены соответствующие приборы для измерения:



действующего значения входного напряжения  $U$ ;  
 действующего значения входного тока  $I$ ;  
 потребляемой мощности  $P$ ;  
 действующего значения переменной составляющей напряжения на нагрузке  $U_{Н\sim}$ ;  
 постоянной составляющей тока нагрузки  $I_{Нср}$ ;  
 постоянной составляющей напряжения на нагрузке  $U_{Нср}$ .

**Указание:** а) для измерения  $U, I, P$  может быть использован комплект К-50 во всех схемах, кроме схемы однополупериодного выпрямления;

б) для измерения  $U_{Н\sim}$  может быть использован вольтметр электромагнитной системы, включенный последовательно с неполярным конденсатором;

3.3. Для исследования формы кривой выпрямленного напряжения  $U_{Н}(t)$  предусмотреть электронный осциллограф, с экрана которого (при одинаковом усилении) снять кривые  $U_{Н}(t)$  в двух случаях:

- а) без сглаживающего конденсатора  $C$ ;
- б) со сглаживающим конденсатором  $C$ .

С этой целью целесообразно сглаживающий конденсатор подключить через тумблер.

3.4. Рассчитать теоретическое значение переменной составляющей выпрямленного напряжения нагрузки в схемах без сглаживающего конденсатора и сравнить его с экспериментальным значением  $U_{Н\sim}$ . Результаты занести в табл. 17.1.

3.5. Измерить  $U_{Н\sim}$  в схемах со сглаживающим конденсатором, результаты занести в табл. 17.1, сравнить их с данными п.3.4 и сделать соответствующие выводы.

Таблица 17.1

Исследование влияния сглаживающего конденсатора на характеристики различных схем выпрямления переменного тока

Схема	$U, B$	$I, A$	$P, Вт$	$U_{Нср}, B$	$I_{Нср}, A$	$U_{Н\sim}, B$		$K_{сх}$	$\cos\varphi$	$\eta, \%$	Примечание
Однополупериодное выпрямление											
Однофазная мостовая											
Трехфазная мостовая											

#### 4. Содержание отчета

В отчете необходимо привести:

4.1. Схемы, разработанные согласно пп.1.1, 1.3, 1.5.

4.2. Осциллограммы  $U_{Н}(t)$  (с указанием масштабов по осям координат) для трех схем выпрямления переменного тока.

**Указание:** для каждой из схем выпрямления целесообразно кривые  $U_H(t)$  при наличии конденсатора  $C$  и без него совместить (построить в общей системе координат).

4.3. Расчет для каждой из исследованных схем теоретического значения  $U_{H\sim}$  при отсутствии сглаживающего конденсатора  $C$ .

4.4. Результаты экспериментального исследования схем выпрямления (табл.17.1).

4.5. Выводы о влиянии сглаживающего конденсатора  $C$  на работу схем выпрямления. При этом особое внимание уделить влиянию конденсатора  $C$  на форму выпрямленного напряжения, а также на величину  $U_{H\sim}$ .

4.6. Рекомендации по более эффективному улучшению формы кривой выходного напряжения различных схем выпрямления.

### *Лабораторная работа 18*

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОЙ ДЛИННОЙ ЛИНИИ БЕЗ ПОТЕРЬ

Цель работы – исследование волновых процессов в линии без потерь, выяснение условий отражения волн от конца линии при различных сопротивлениях нагрузки, а также приемов расчета параметров линий на реальном примере.

#### 1. Пояснения к работе

При некоторых условиях реальную линию можно рассматривать как линию без потерь, у которой равны нулю активное сопротивление проводов  $r_0$  и проводимость утечки между проводами  $g_0$ .

В этих условиях основные уравнения длинной линии при заданных напряжении  $\underline{U}_2$  и токе  $\underline{I}_2$  в конце линии имеют вид:

$$\begin{aligned}\underline{U} &= \underline{U}_2 \cdot \cos \beta \cdot y + j \cdot z_c \underline{I}_2 \sin \beta \cdot y, \\ \underline{I} &= j \cdot \frac{\underline{U}_2}{z_c} \cdot \sin \beta \cdot y + \underline{I}_2 \cdot \cos \beta \cdot y,\end{aligned}\quad (18.1)$$

где  $\underline{U}$  – напряжение в точке линии, находящейся на расстоянии  $y$  от ее конца,  
 $\underline{I}$  – ток в той же точке линии,

$z_c$  – волновое сопротивление линии без потерь, оно является активным и не зависит от частоты

$$z_c = r_c = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (18.2)$$

Коэффициент затухания  $\alpha = 0$ , и, следовательно, коэффициент распространения

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta = j \cdot \beta,$$

где  $\beta$  – коэффициент фазы единицы длины линии,

$$\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} . \quad (18.3)$$

Фазовая скорость и длина волны соответственно равны:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}; \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v}{f} \quad (18.4)$$

и также не зависят от частоты.

**Емкость единицы длины двухпроводной линии**

$$C_0 = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon}{\ln \frac{d}{r}} , \quad (18.5)$$

а индуктивность той же линии

$$L_0 = \frac{\mu_0 \mu \ln \frac{d}{r}}{\pi} . \quad (18.6)$$

Здесь  $r$  - радиус провода,  $d$  - расстояние между осями проводов.

Подставляя значения  $L_0$  и  $C_0$  в формулу (18.4) для скорости  $v$  получим

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon}} . \quad (18.7)$$

Для воздушных линий  $\mu = \varepsilon = 1$  и фазовая скорость совпадает со скоростью света

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 300 \cdot 10^3 \text{ км/с}.$$

Из уравнения (18.1), учитывая, что  $\beta = 2\pi / \lambda$ , получаем выражение для входного сопротивления линии, замкнутой на конце на сопротивление нагрузки

$$Z_{\text{вх}} = \frac{U_1}{I_1} = Z_c \frac{Z_2 + jZ_c \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda}}{jZ_2 \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} + Z_c} . \quad (18.8)$$

Переходя в уравнениях (18.1) к мгновенным значениям при  $\underline{U}_2 = U_2 e^{j\omega t}$   $\underline{I}_2 = I_2 e^{-j\varphi_2}$ , получаем

$$u(t, y) = U_{2m} \cdot \sin \omega \cdot t \cdot \cos \beta \cdot y + I_{2m} z_c \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2} - \varphi_2) \cdot \sin \beta \cdot y ,$$

$$i(t, y) = \frac{U_{2m}}{z_c} \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}) \cdot \sin \beta \cdot y + I_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_2) \cdot \cos \beta \cdot y . \quad (18.9)$$

В линии без потерь, когда активная мощность, поглощаемая приемником в конце линии, равна нулю, возникают стоячие волны напряжения и тока. Это

может быть при холостом ходе, коротком замыкании и чисто реактивной нагрузке.

Стоячей волной называется процесс, получающийся от наложения прямой и обратной волн с одинаковыми амплитудами и частотой (рис.18.1) и (18.2).

При холостом ходе ( $Z_2 = \infty$ ,  $I_2 = 0$ ) из уравнения (18.9) следует:

$$\begin{aligned} u(t, y) &= U_{2m} \cdot \sin \omega \cdot t \cdot \cos \beta \cdot y, \\ i(t, y) &= \frac{U_{2m}}{Z_c} \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}) \cdot \sin \beta \cdot y. \end{aligned} \quad (18.10)$$

Это уравнение стоячих волн.

На конце линии ( $y=0$ ) и в точках, отстоящих от конца на расстоянии  $y = n \frac{\pi}{\beta} = n \frac{\lambda}{2}$ , где  $n$  - целое число, имеем в любой момент времени максимумы напряжения, называемые пучностями, и нули тока, называемые узлами (рис.18.1).

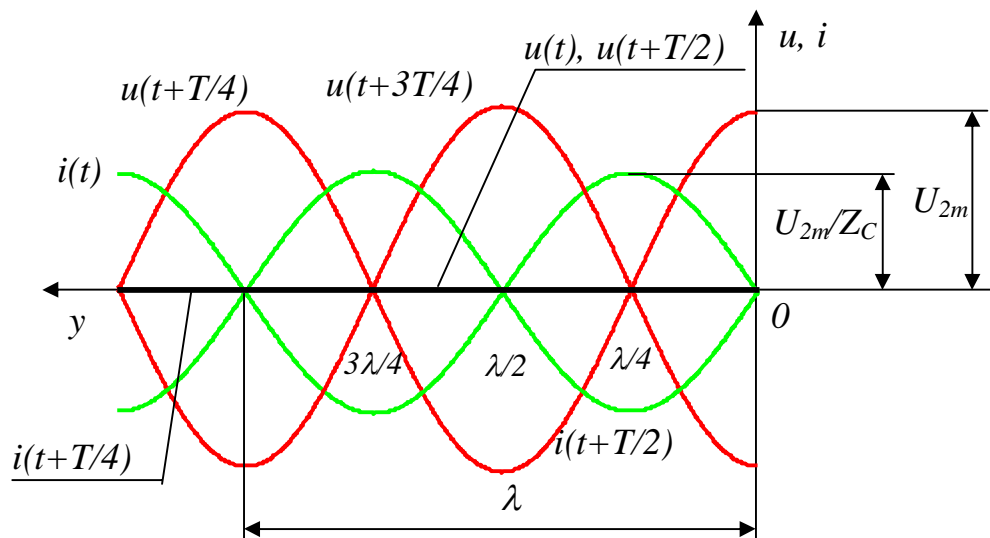


Рис. 18.1. Стоячие электромагнитные волны при холостом ходе линии

На расстоянии от конца линии  $y = \frac{(2n+1)\pi}{2\beta} = (2n+1) \frac{\lambda}{4}$  всегда наблюдаются узлы напряжения и пучности тока. Узлы и пучности тока и напряжения неподвижны. Узлы тока совпадают с пучностями напряжения и наоборот. Ток опережает по фазе напряжение на  $90^\circ$ , когда знаки  $\sin \beta y$  и  $\cos \beta y$  одинаковы, и отстает от напряжения на тот же угол, когда знаки  $\sin \beta y$  и  $\cos \beta y$  противоположны.

**Входное сопротивление разомкнутой линии без потерь**

$$Z_{вх X} = -j Z_c \operatorname{ctg} \beta y = -j Z_c \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} y \quad (18.11)$$

является чисто реактивным, и характер его определяется длиной линии  $y$  и частотой  $f$  (длиной волны  $\lambda$ ).

При коротком замыкании ( $Z_2 = 0$ ,  $U_2 = 0$ ) из уравнений (18.9) получим:

$$\begin{aligned}
 u(t, y) &= I_{2m} z_c \cdot \sin(\varpi \cdot t + \frac{\pi}{2}) \cdot \sin \beta \cdot y, \\
 i(t, y) &= I_{2m} \cdot \sin(\varpi \cdot t) \cdot \cos \beta \cdot y,
 \end{aligned}
 \tag{18.12}$$

откуда следует, что напряжение и ток в этом случае также представляют собой стоячие волны. Для любого момента времени на конце линии ( $y=0$ ) и в точках, расположенных от него на целое число полуволн, имеются узлы напряжения и пучности тока, а в точках, отстающих от конца линии на расстоянии, равном нечетному числу одной четвертой длины волны, наблюдаются пучности напряжения и узлы тока (рис.18.2).

**Входное сопротивление короткозамкнутой линии без потерь**

$$\underline{Z}_{вхк} = j \underline{Z}_C \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} y
 \tag{18.13}$$

также является чисто реактивным и в зависимости от координаты  $y$  и частоты  $f$  может быть индуктивным или емкостным.

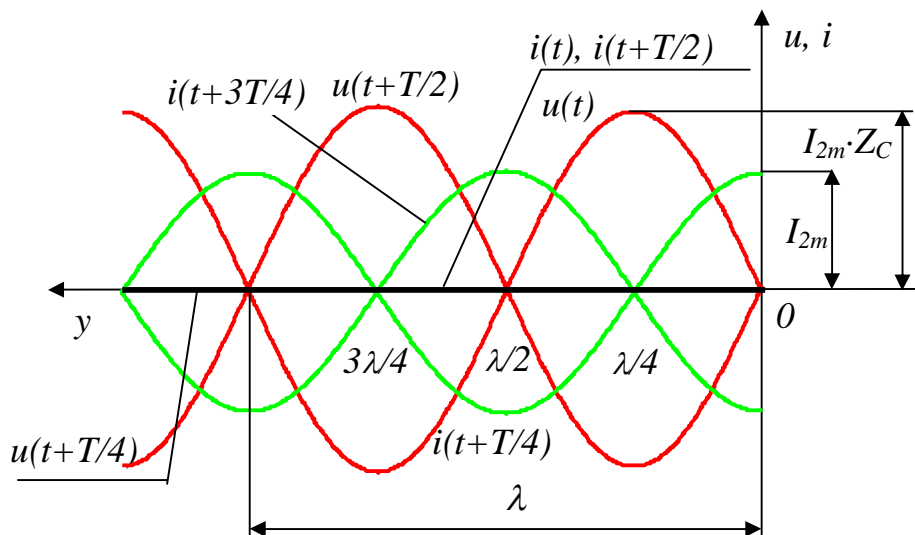


Рис. 18.2. Стоячие электромагнитные волны при коротком замыкании линии

Из уравнений (18.11) и (18.13) видно, что отрезки линии определенной длины могут выполнять роль идеальных реакторов.

Справедливо и обратное, т.е. подключение к линии емкости или индуктивности равносильно или режиму короткого замыкания линии большей длины, или режиму холостого хода линии большей длины. Положения узлов и пучностей тока и напряжения в этом случае определяются величиной  $L$  или  $C$ .

Линия, нагруженная на сопротивление произвольного вида, может работать в режиме со стоячими волнами ( $Z_2=0, r_2=\infty$ ), со стоячими и бегущими волнами ( $0 < r_2 < \infty$ ) и в согласованном режиме ( $Z_2 = Z_C$ ).

В данной лабораторной работе проводится исследование различных режимов работы линии без потерь по схеме рис. 18.3.

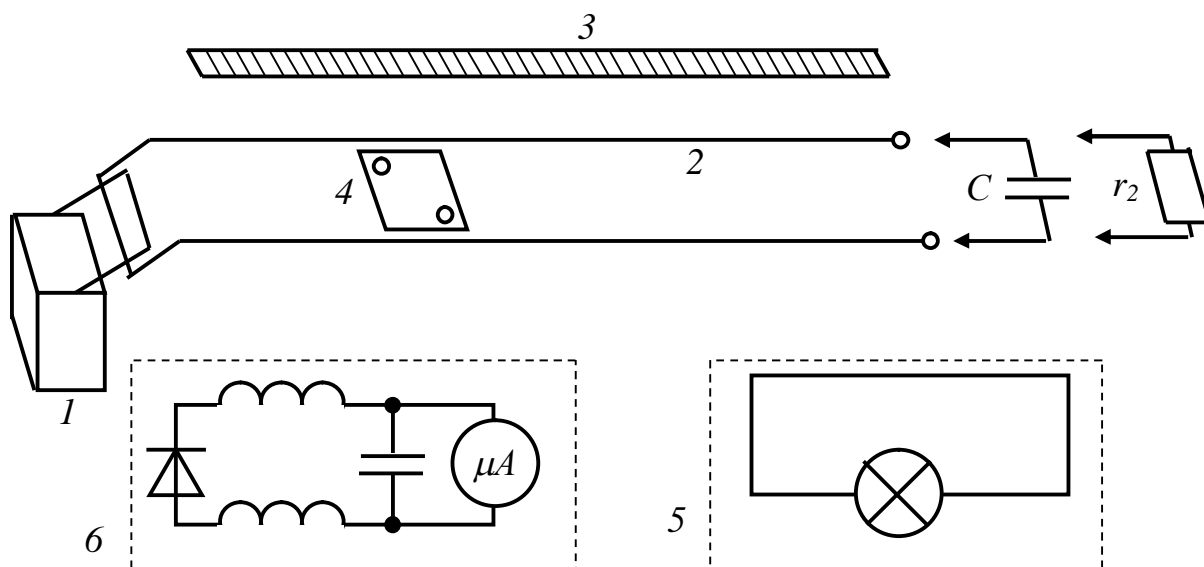


Рис. 18.3. Рабочая схема для исследования линии без потерь

В этой схеме : 1 - генератор сверхвысокочастотных колебаний , связанный посредством витка связи с испытуемой линией 2. Рядом с линией укреплена линейка 3, предназначенная для измерения расстояния между концом линии и подвижной кареткой 4. К подвижной каретке может крепиться виток связи, замкнутый на лампу накаливания 5. Лампа горит ярко в местах пучностей тока и гаснет в узлах тока. К каретке может крепиться резонансный контур связи 6. К выходу контура подключается микроамперметр, по показанию которого определяются места пучностей и узлов напряжения.

Рабочее место снабжается активным сопротивлением (магазин сопротивлений), воздушным конденсатором и закороткой (проводником с сопротивлением, близким к нулю).

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. По геометрическим размерам линии определить ее параметры  $L_0$ ,  $C_0$ ,  $Z_C$ .

2.2. Включить СВЧ генератор и убедиться в его работоспособности (по накалу сигнальной лампы блока генератора).

2.3. Укрепить на подвижной каретке панель с лампой накаливания и, передвигая ее вдоль всей линии, определить координаты пучностей и узлов тока ( $y_y$  и  $y_n$ ).

2.4. Укрепить на подвижной каретке панель с резонансным контуром, предварительно подключив к нему микроамперметр. Передвигая каретку вдоль всей линии, определить координаты пучностей и узлов напряжения ( $y_y$  и  $y_n$ ).

2.5. Исследования по п.3 и 4 произвести трижды для режимов холостого хода и короткого замыкания. Результаты усредненных значений измерений координат узлов и пучностей внести в табл.18.1.

Таблица 18.1

Координаты узлов и пучностей напряжений и токов в линии без потерь

Холостой ход			Короткое замыкание		
Ток	координаты пучностей $y_n$ , см		Ток	координаты пучностей $y_n$ , см	
	координаты узлов $y_y$ , см			координаты узлов $y_y$ , см	
Напряжение	координаты пучностей $y_n$ , см		Напряжение	координаты пучностей $y_n$ , см	
	координаты узлов $y_y$ , см			координаты узлов $y_y$ , см	

2.6. Качественно построить графики действующих значений напряжения и тока для режимов холостого тока и короткого замыкания. По графикам рассчитать величины  $\lambda$ ,  $\beta$ .

2.7. Подключить к линии активное сопротивление  $r_2 = Z_c$  и убедиться в отсутствии режима стоячих волн.

2.8. Подключить к линии конденсатор с емкостью  $C$  и убедиться в наличии режима стоячих волн.

### 3. Вопросы для самопроверки

3.1. При каких условиях в линии возникает режим стоячих волн?

3.2. Почему при измерениях напряжений используется четвертьволновой отрезок линии?

3.3. Если к линии подключить активное сопротивление нагрузки, не равное волновому (характеристическому) сопротивлению, режим каких волн будет в линии?

3.4. Что понимают под входным и волновым сопротивлениями линии?

3.5. Чему равна фазовая скорость волны воздушной и кабельной линий?

3.6. Что такое линия без потерь?

### Лабораторная работа 19

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Цель работы - определение коэффициентов пассивного четырехполюсника по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания, расчет его характеристических параметров, построение и экспериментальная проверка круговой диаграммы четырехполюсника при активной нагрузке.

## 1. Пояснения к работе

Четырехполюсником называется часть электрической цепи, имеющая два входных (1-1') и два выходных (2-2') зажима (рис. 19.1).

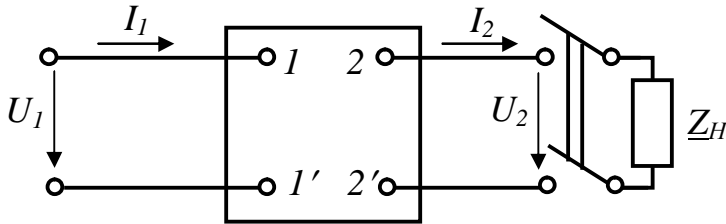


Рис. 19.1. Схема четырёхполюсника

Основные уравнения четырехполюсника, связывающие напряжения и токи на выходе и входе при любой нагрузке, записываются в таком виде (форма А):

$$\underline{U}_1 = \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2 \quad (1.1)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2 \quad (1.2)$$

Здесь коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  и  $\underline{D}$  являются в общем случае комплексными числами и связаны между собой соотношением:

$$\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} = 1. \quad (1.3)$$

Коэффициенты четырехполюсника можно вычислить по его входным сопротивлениям, определяемым в режимах холостого хода и короткого замыкания. Вычисление коэффициентов производится по формулам:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1x} \cdot \underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_{2k} (\underline{Z}_{1x} - \underline{Z}_{1k})}}; \quad (1.4)$$

$$\underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{2k}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1x}}; \quad \underline{D} = \underline{A} \frac{\underline{Z}_{2k}}{\underline{Z}_{1k}},$$

где  $\underline{Z}_{1x} = \frac{U_{1x}}{I_{1x}} = r_{1x} + jx_{1x} = Z_{1x} \cdot e^{j\varphi_{1x}}$  - комплекс входного сопротивления

четырёхполюсника в режиме холостого хода при питании его со стороны входных зажимов (рис. 19.2).

При этом

$$Z_{1x} = \frac{U_{1x}}{I_{1x}}; \quad r_{1x} = \frac{P_{1x}}{I_{1x}^2};$$

$$x_{1x} = \sqrt{Z_{1x}^2 - r_{1x}^2}; \quad \varphi_{1x} = \arctg \frac{x_{1x}}{r_{1x}}.$$

$\underline{Z}_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} = r_{1k} + jx_{1k} = Z_{1k} \cdot e^{j\varphi_{1k}}$  - комплекс входного сопротивления в режиме

короткого замыкания четырёхполюсника при питании его со стороны входных зажимов, причем



$$Z_{1к} = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; \quad r_{1к} = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2};$$

$$x_{1к} = \sqrt{Z_{1к}^2 - r_{1к}^2}; \quad \varphi_{1к} = \arctg \frac{x_{1к}}{r_{1к}}.$$

$\underline{Z}_{2к} = \frac{U_{2к}}{I_{2к}} = r_{2к} + jx_{2к} = Z_{2к} \cdot e^{j\varphi_{2к}}$  - комплекс входного сопротивления четырехполюсника в режиме короткого замыкания при питании его со стороны выходных зажимов.

В свою очередь,

$$Z_{2к} = \frac{U_{2к}}{I_{2к}}; \quad r_{2к} = \frac{P_{2к}}{I_{2к}^2};$$

$$x_{2к} = \sqrt{Z_{2к}^2 - r_{2к}^2}; \quad \varphi_{2к} = \arctg \frac{x_{2к}}{r_{2к}}.$$

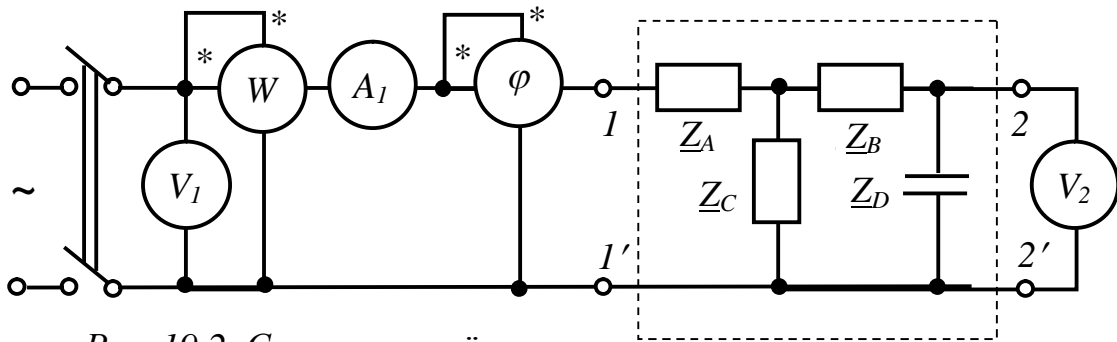


Рис. 19.2. Схема четырёхполюсника в режиме холостого хода при питании его со стороны входных зажимов

Таким образом, по данным опыта холостого хода и двум опытам короткого замыкания могут быть найдены комплексы входных сопротивлений четырехполюсника  $\underline{Z}_{1х}$ ,  $\underline{Z}_{1к}$  и  $\underline{Z}_{2к}$ , а по ним вычислены коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  и  $\underline{D}$ .

Так как пассивный четырехполюсник характеризуется тремя независимыми коэффициентами, его можно заменить трехэлементной эквивалентной схемой. Основными эквивалентными схемами четырехполюсника являются Т-образная и П-образная схемы (рис. 19.3 а, б).

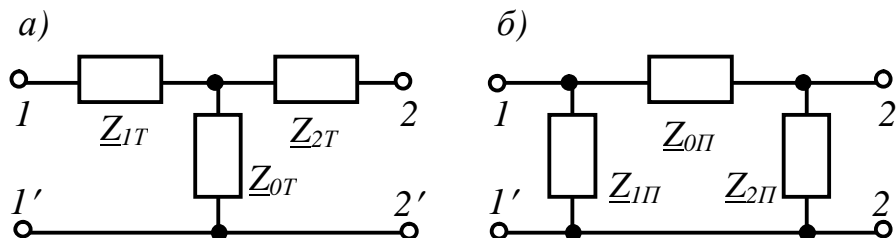


Рис. 19.3. Эквивалентные схемы замещения четырёхполюсников: а) Т-образная, б) П-образная

Связь между параметрами этих схем и коэффициентами четырехполосника выражается соотношениями:

для Т-образной схемы

$$\underline{Z}_{1T} = \frac{A-1}{C}; \quad \underline{Z}_{2T} = \frac{D-1}{C}; \quad \underline{Z}_{0T} = \frac{1}{C}; \quad (1.5)$$

для П-образной схемы

$$\underline{Z}_{1П} = \frac{B}{D-1}; \quad \underline{Z}_{2П} = \frac{B}{A-1}; \quad \underline{Z}_{0П} = B. \quad (1.6)$$

Характеристические параметры четырехполосника могут быть рассчитаны по его коэффициентам

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\frac{A \cdot B}{C \cdot D}}; \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\frac{D \cdot B}{C \cdot A}}; \quad th \underline{\Gamma} = \sqrt{\frac{B \cdot C}{A \cdot D}};$$

$$e^{2\Gamma} = \frac{1+th\Gamma}{1-th\Gamma} = Me^{j\delta}; \quad a = \frac{1}{2} \ln M; \quad b = \delta \pm 2\pi; \quad (1.7)$$

$$\Gamma = a + jb$$

или по опытам холостого хода и короткого замыкания

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\underline{Z}_{1x} \underline{Z}_{1k}}; \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\underline{Z}_{2x} \underline{Z}_{2k}}; \quad th \underline{\Gamma} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_{1x}}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{2k}}{\underline{Z}_{2x}}}. \quad (1.8)$$

Исследуемый четырехполосник собирается в виде сложной цепи, состоящей из катушек индуктивности, резисторов и емкостей (схему см. на панели рабочего стола).

Четырехполосник нагружается активным сопротивлением (проволочные реостаты). Для определения характера сдвига фаз между входным током и напряжением (положительный или отрицательный) в схему включается фазометр.

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Определить коэффициенты и параметры четырехполосника.

2.1.1. Собрать схему рис. 19.2 и выполнить опыт холостого хода четырехполосника (табл. 19.1).

2.1.2. В схеме рис. 19.2 вольтметр  $V_2$  заменить амперметром  $A_2$ , и выполнить опыт короткого замыкания (табл. 19.1).

2.1.3. При том же напряжении питания  $U_1$  выполнить опыт обратного короткого замыкания, для чего в схеме опыта короткого замыкания зажимы 1-1' и 2-2' поменять местами (табл. 19.1).

2.1.4. В предыдущей схеме (п.2.1.3) амперметр  $A_2$  заменить на вольтметр  $V_2$  и выполнить опыт обратного холостого хода.

2.1.5. По опытным данным определить параметры четырехполосника при холостом ходе и коротком замыкании.

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 19.1.

2.1.6. Убедиться в справедливости соотношения

$$\frac{\underline{Z}_{1x}}{\underline{Z}_{1k}} = \frac{\underline{Z}_{2x}}{\underline{Z}_{2k}}.$$

Таблица 19.1

Исследование четырехполюсника в режимах холостого хода и короткого замыкания

Питание подведено к зажимам	Режим	Измерено				Вычислено				
		$B$	$A$	$Bm$	$B,A$	$Om$	$Om$	$Om$	$Om$	град. с учетом знака угла
1-1'	Холостой ход	$U_{1X}$	$I_{1X}$	$P_{1X}$	$U_{2X}$	$Z_{1X}$	$r_{1X}$	$x_{1X}$	$Z_{1X}$	$\varphi_{1X}$
1-1'	Короткое замыкание	$U_{1K}$	$I_{1K}$	$P_{1K}$	$I_{2K}$	$Z_{1K}$	$r_{1K}$	$x_{1K}$	$Z_{1K}$	$\varphi_{1K}$
2-2'	Обратное короткое замыкание	$U_{2K}$	$I_{2K}$	$P_{2K}$	$I_{1K}$	$Z_{2K}$	$r_{2K}$	$x_{2K}$	$Z_{2K}$	$\varphi_{2K}$
2-2'	Обратный холостой ход	$U_{2X}$	$I_{2X}$	$P_{2X}$	$U_{1X}$	$Z_{2X}$	$r_{2X}$	$x_{2X}$	$Z_{2X}$	$\varphi_{1X}$

2.1.7. По найденным в п.2.1.5 значениям комплексных сопротивлений  $\underline{Z}_{1X}$ ,  $\underline{Z}_{1K}$  и  $\underline{Z}_{2K}$  вычислить коэффициенты четырехполюсника  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  и  $\underline{D}$  и по ним определить параметры Т-образной и П-образной схем замещения.

2.1.8. Рассчитать характеристические параметры четырехполюсника  $\underline{Z}_{1C}$ ,  $\underline{Z}_{2C}$  и  $\underline{G}$ .

2.2. Экспериментально исследовать характеристики четырехполюсника.

2.2.1. Восстановить схему прямого питания четырехполюсника и нагрузить его проволочным реостатом. Для измерения выходного напряжения  $U_2$  и выходного тока  $I_2$  включить соответствующие приборы.

2.2.2. Произвести экспериментальное исследование четырехполюсника, равномерно изменяя сопротивление нагрузки  $r_H$  при неизменном входном напряжении  $U_1$ .

Вычислить для каждого значения нагрузки выходную мощность  $P_2 = U_2 \cdot I_2$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  и коэффициент полезного действия  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ .

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 19.2.

2.2.3. По данным табл. 19.2 в одной и той же системе координат построить зависимости  $I_1, P_1, P_2, U_2, \cos \varphi_1$  и  $\eta$  от тока  $I_2$ .

Экспериментальные исследования четырехполюсника  
при резистивной нагрузке

№ п/п	Измерено				Вычислено		
	$I_2, A$	$I_1, A$	$P_1, Вт$	$U_2, В$	$P_2, Вт$	$\cos \varphi_1$	$\eta$
1.							
2.							
.							
.							

### 3. Вопросы для самопроверки

- 3.1. Что называется четырехполюсником?
- 3.2. Напишите основные уравнения четырехполюсника.
- 3.3. Как определяются коэффициенты четырехполюсника экспериментально?
- 3.4. Как связаны между собой коэффициенты четырехполюсника?
- 3.5. Как можно определить параметры Т-, П-образных схем четырехполюсника, если известны его коэффициенты?
- 3.6. Как определяется знак угла сдвига фаз между входным напряжением и током в опытах холостого хода и короткого замыкания?
- 3.7. Как рассчитываются характеристические параметры четырехполюсника?

### *Лабораторная работа 20*

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Цель работы - изучение основных свойств и частотных характеристик фильтров низких и высоких частот.

#### 1. Пояснения к работе

Любой фильтр характеризуется следующими параметрами: характеристическим сопротивлением  $Z_C$  и постоянной передачи  $\Gamma = a + jb$  ( $a$  - коэффициент затухания фильтра,  $b$  - коэффициент фазы фильтра). Коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются параметрами фильтра и не зависят от величины сопротивления нагрузки, но экспериментально они могут быть определены только при согласованной нагрузке, т.е. когда сопротивление нагрузки  $Z_2$  равно характеристическому сопротивлению фильтра  $Z_C$ .

При согласованной нагрузке фильтра

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = e^\Gamma = e^a \cdot e^{jb}, \quad (20.1)$$

поэтому, зная комплексы напряжений или токов, легко определить коэффициенты  $a$  и  $b$ .

Из выражений (20.1) следует, что

$$a = \ln \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}, \quad b = \psi_1 - \psi_2. \quad (20.2)$$

Коэффициент  $a$  измеряется в неперах (Нп) ( $a = \ln \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}$ , Нп) или децибелах (дБ)

( $a = 20 \lg \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}$ , дБ), а коэффициент  $b$  измеряется в градусах или радианах. Угол  $b$

считается положительным, если напряжение на входе фильтра  $\underline{U}_1$  опережает напряжение на выходе  $\underline{U}_2$ , в противном случае угол  $b$  считается отрицательным.

Определение фильтрующих свойств тех или иных фильтров (четырёхполюсников) сводится к исследованию зависимости их коэффициентов  $a$ ,  $b$  и характеристического сопротивления  $\underline{Z}_C$  от частоты  $\omega$ .

Для низкочастотного (НЧ) П-образного фильтра (рис.20.1) примерный вид этих зависимостей приведен на рис. 20.2. Угловая частота  $\omega_0 = 2/\sqrt{LC}$  носит название резонансной угловой частоты среза; она является границей между зонами затухания и пропускания (прозрачности).

Для высокочастотного (ВЧ) Т-образного фильтра ( $\omega_0 = 1/(2\sqrt{LC})$ ) (рис.20.3) зависимости  $a = F_1(\xi)$ ,  $b = F_2(\xi)$ ,  $\underline{Z}_C = F_3(\xi)$  приведены на рис. 20.4, а, б.

Так как при практическом использовании фильтра невозможно осуществить его согласование с нагрузкой во всем диапазоне частот, то при несогласованных режимах по кривым  $a(\xi)$  и  $b(\xi)$  уже нельзя судить о величине и фазе напряжения  $\underline{U}_2$  при некотором заданном напряжении  $\underline{U}_1$ . Для оценки затухания фильтра в таких рабочих условиях, кроме собственного затухания, вводят еще понятие затухания вследствие несогласованности (вносимое затухание четырехполюсника), которое включает в себя собственное затухание  $a$ . Но чаще всего для оценки фильтров в рабочих условиях используют амплитудно-фазовые характеристики, которые представляют собой отношения  $\underline{U}_2 / \underline{U}_1$  или  $\underline{I}_2 / \underline{I}_1$  в функции частоты. Модули этих отношений являются амплитудно-частотными характеристиками, а их аргументы - фазо-частотными характеристиками.

В работе производится качественное исследование низкочастотного и высокочастотного фильтров по схеме рис. 20.5. Дроссель  $Dp$  в схеме является генератором высших нечетных гармоник тока. При насыщенном дросселе напряжение на активном сопротивлении  $R$  (реостат) содержит ярко выраженные первую и третью гармоники. Сопротивление  $r_H$  (магазин сопротивлений) является нагрузочным сопротивлением фильтра. С помощью

электронного осциллографа исследуется форма кривых напряжения на входных и выходных зажимах фильтра.

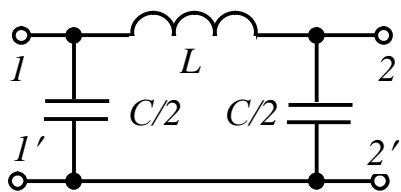


Рис. 20.1. Схема низкочастотного электрического фильтра

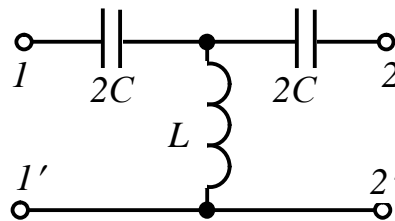


Рис. 20.3. Схема высокочастотного электрического фильтра

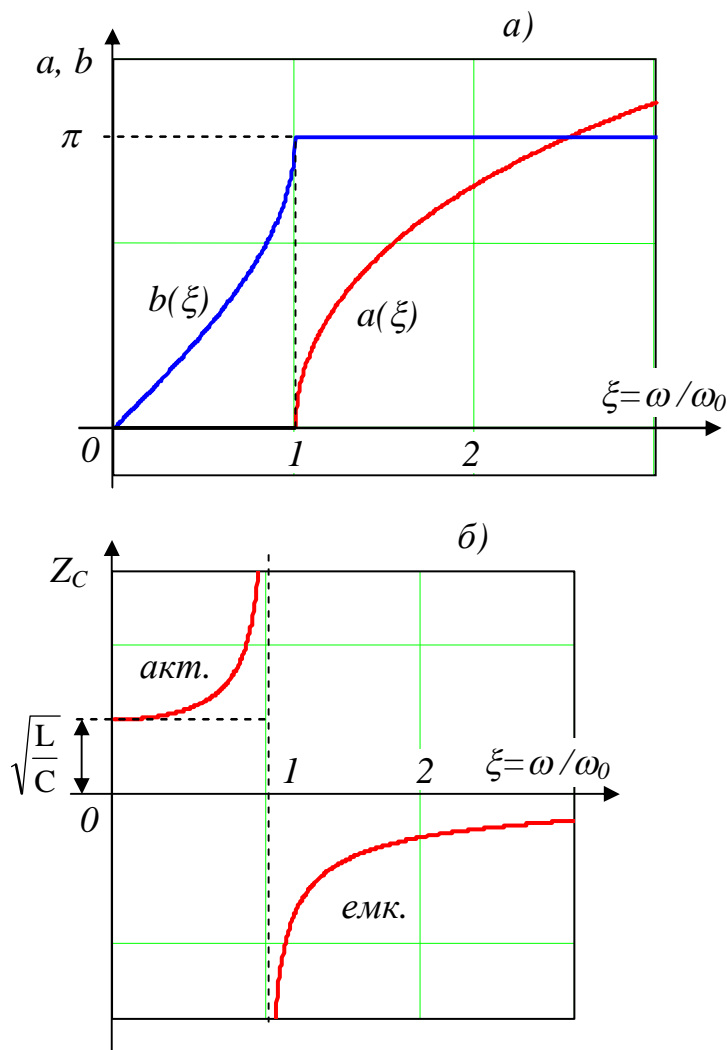


Рис. 20.2. Зависимости коэффициента затухания  $a$ , коэффициента фазы  $b$  и характеристического сопротивления  $Z_C$  от относительной частоты  $\xi$  для низкочастотного П-образного фильтра

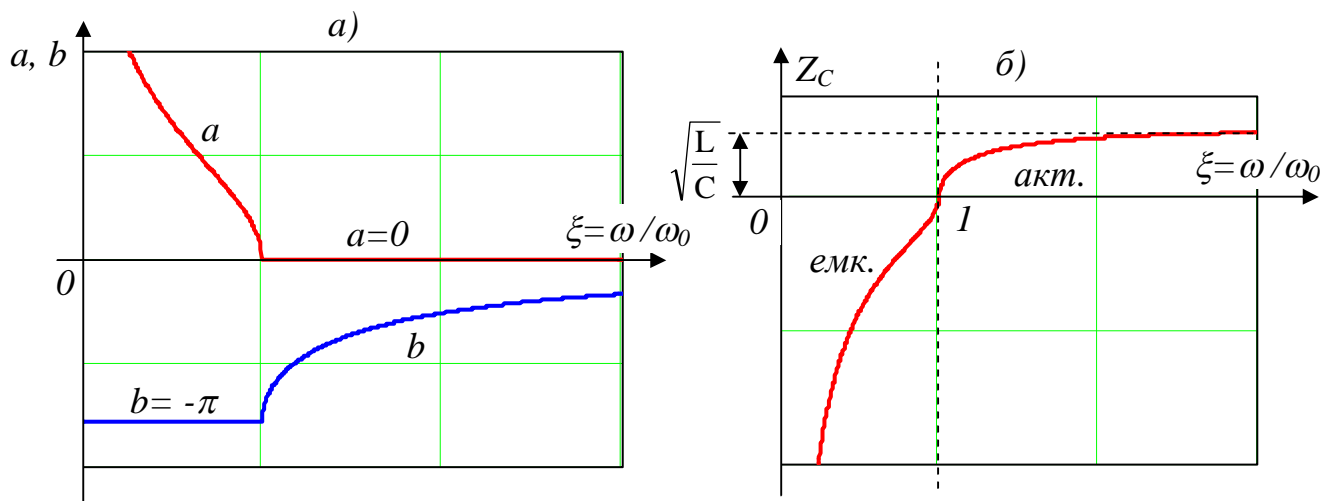


Рис. 20.4. Зависимости  $a$ ,  $b$  и  $Z_c$  для высокочастотного Т-образного фильтра

## 2. Порядок выполнения работы

Произвести качественное исследование электрических фильтров, для чего:

2.1. Собрать схему рис.20.5 с низкочастотным П-образным фильтром. По параметрам фильтра, указанным на стенде, определить частоту среза

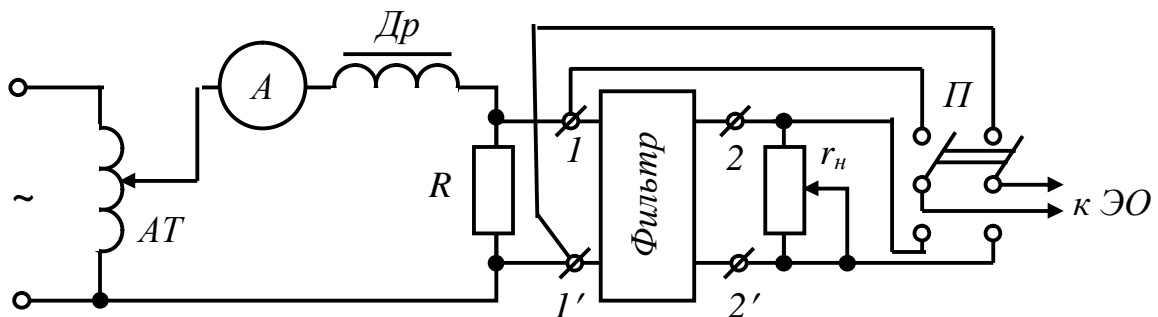


Рис. 20.5. Схема для исследований частотных электрических фильтров

$$f_0 = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$$

и характеристическое сопротивление при частоте  $f=50$  Гц

$$Z_{СП} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad \xi = \frac{f}{f_0}.$$

2.2. Установить с помощью магазина сопротивление нагрузки  $r_H$ , равное  $Z_c$ . Снять с экрана осциллографа кривые напряжений на входных и выходных зажимах фильтра и объяснить их форму.

2.3. Заменить в схеме рис. 20.5 низкочастотный фильтр высокочастотным Т-образным фильтром и по его параметрам, указанным на щитке, определить  $f_0$  и  $\underline{Z}_C$  при частоте  $f = 150 \text{ Гц}$ .

$$f_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \sqrt{LC}} \quad ,$$
$$\underline{Z}_{CT} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}} \cdot$$

2.4. Сопротивление  $r_H$  установить равным  $\underline{Z}_C$ , и снять с экрана осциллографа кривые напряжений на входе и выходе фильтра. Объяснить форму напряжений.

Указание: на каждой из осциллограмм должны быть приведены масштабы по напряжению  $m_u$  и по времени  $m_t$ , определяемые положением переключателей осциллографа.

2.5. По осциллограмме входного напряжения низкочастотного фильтра рассчитать амплитуду его первой гармоники и сравнить ее с амплитудой выходного напряжения НЧ-фильтра.

2.6. По осциллограмме входного напряжения высокочастотного фильтра рассчитать амплитуду его третьей гармоники и сравнить ее с амплитудой выходного напряжения ВЧ-фильтра.

2.7. Привести в отчете качественно построенные зависимости  $a(\xi)$ ,  $b(\xi)$ ,  $\underline{Z}_C(\xi)$  для НЧ- и ВЧ-фильтров.

#### 4. Вопросы для самопроверки

- a. Какие четырехполюсники называются фильтрами типа  $K$  ?
- b. Какими параметрами характеризуется четырехполюсник именно как фильтр?
- c. Какой интервал частот называется полосой пропускания фильтра?

3.4. Почему на практике нельзя осуществить согласование фильтра с нагрузкой во всем диапазоне частот?

3.5. Как с помощью векторной диаграммы для исследуемого фильтра можно определить знак угла  $b$ ?

### Лабораторная работа 21

#### ЧАСТИЧНЫЕ ЕМКОСТИ В СИСТЕМЕ ПРОВОДНИКОВ

Цель работы – экспериментальное определение коэффициентов электростатической индукции и частичных емкостей трехжильного кабеля со свинцовой оболочкой.

#### 1. Пояснения к работе



В системе проводников, расположенных вблизи проводящей поверхности, их заряды могут быть выражены через потенциалы с помощью коэффициентов электростатической индукции на основании уравнений:

$$\begin{cases} q_1 = \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \beta_{13}\varphi_3 + \dots + \beta_{1n}\varphi_n; \\ q_2 = \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \beta_{23}\varphi_3 + \dots + \beta_{2n}\varphi_n; \\ q_3 = \beta_{31}\varphi_1 + \beta_{32}\varphi_2 + \beta_{33}\varphi_3 + \dots + \beta_{3n}\varphi_n; \\ \dots\dots\dots \\ q_n = \beta_{n1}\varphi_1 + \beta_{n2}\varphi_2 + \beta_{n3}\varphi_3 + \dots + \beta_{nn}\varphi_n. \end{cases} \quad (1.1)$$

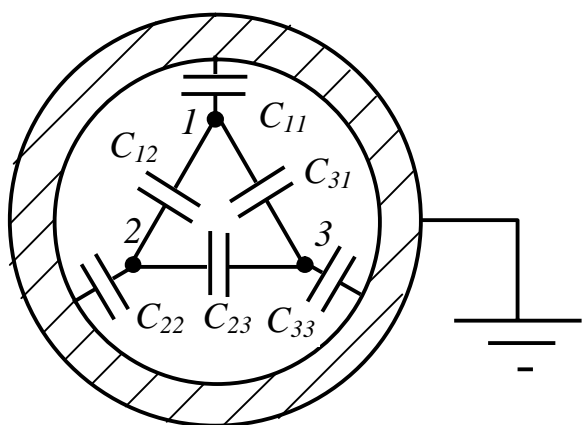
Однако заряды проводников иногда удобнее выражать через разности потенциалов между ними с помощью частичных емкостей:

$$\begin{cases} q_1 = C_{11}U_{11} + C_{12}U_{12} + C_{13}U_{13} + \dots + C_{1n}U_{1n}; \\ q_2 = C_{21}U_{21} + C_{22}U_{22} + C_{23}U_{23} + \dots + C_{2n}U_{2n}; \\ q_3 = C_{31}U_{31} + C_{32}U_{32} + C_{33}U_{33} + \dots + C_{3n}U_{3n}; \\ \dots\dots\dots \\ q_n = C_{n1}U_{n1} + C_{n2}U_{n2} + C_{n3}U_{n3} + \dots + C_{nn}U_{nn}. \end{cases} \quad (1.2)$$

Коэффициенты электростатической индукции  $\beta_{ki}$  и частичные емкости  $C_{ki}$  могут быть определены экспериментально на основании измерений, вытекающих из уравнений (1.1) и (1.2).

В данной работе исследуется система проводников, представляющая собой трехжильный кабель с заземленной свинцовой оболочкой (рис. 21.1).

Собственные и взаимные коэффициенты электростатической индукции  $\beta_{kk}$  и  $\beta_{ki}$  измеряются с помощью схемы (рис. 21.2).



Собственный коэффициент электростатической индукции  $\beta_{kk}$  согласно уравнениям (1.1) определяется отношением заряда  $k$ -го проводника к потенциалу этого же проводника, если все остальные проводники, кроме  $k$ -го, соединены с землей (их потенциалы равны нулю), а  $k$ -й проводник заряжается от источника ЭДС до потенциала  $\varphi_k$ , т.е.

Рис. 21.1. Частичные ёмкости трёхжильного кабеля

$$\beta_{kk} = \frac{q_k}{\varphi_k}. \quad (1.3)$$

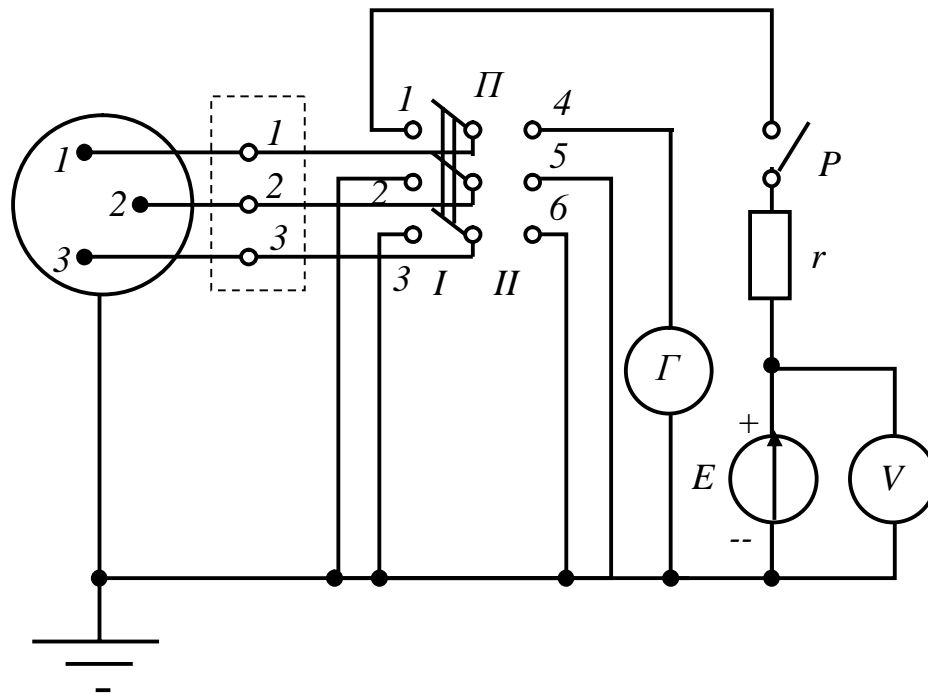


Рис. 21.2. Схема для определения собственных и взаимных коэффициентов электростатической индукции трёхжильного кабеля

Взаимный коэффициент электростатической индукции  $\beta_{ik}$  определяется отношением заряда  $i$ -го проводника к потенциалу  $k$ -го проводника при тех же условиях.

$$\beta_{ik} = \frac{q_i}{\varphi_k}. \quad (1.4)$$

Следует иметь в виду, что все взаимные коэффициенты электростатической индукции отрицательны.

Взаимные частичные емкости равны взятым с обратным знаком соответствующим взаимным коэффициентам электростатической индукции

$$C_{ik} = -\beta_{ik}. \quad (1.5)$$

Собственная частичная емкость  $C_{kk}$   $k$ -го проводника равна алгебраической сумме всех коэффициентов электростатической индукции, имеющих индекс  $k$

$$C_{kk} = \beta_{k1} + \beta_{k2} + \beta_{k3} + \dots + \beta_{kk} + \beta_{kn}. \quad (1.6)$$

Собственные частичные емкости измеряются с помощью схемы рис. 23.3.

Согласно уравнениям (1.3) собственная частичная емкость  $k$ -го проводника определяется отношением заряда данного проводника к его потенциалу, если все проводники системы (кабеля) соединены между собой ( $U_{ki} = 0$ ) и заряжены с помощью источника ЭДС до потенциала  $\varphi_k$  относительно земли:

$$C_{kk} = \frac{q_k}{\varphi_k}. \quad (1.7)$$

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему рис.21.3 и с её помощью определить цену деления гальванометра

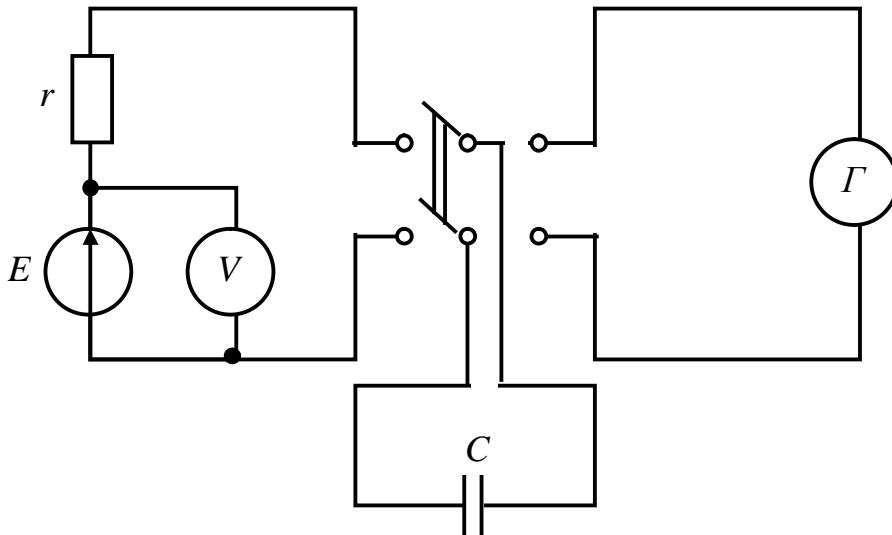


Рис. 21.3. Схема для определения цены деления измерителя заряда (гальванометра)

(измерителя заряда), для чего использовать конденсатор известной емкости, соизмеримый с частичными емкостями кабеля (порядка  $2 \text{ мкФ}$ ), а источник ЭДС 10-15 В.

После зарядки конденсатора (через защитное сопротивление  $r$ ) следует произвести его разряд через гальванометр  $G$ .

Цена деления гальванометра  $\frac{Kл}{дел}$  :

$$\delta = \frac{CU}{n}, \quad (2.1)$$

где  $C$  - емкость конденсатора, Ф;

$U$  - напряжение на обкладках конденсатора, В;

$n$  - число делений, на которые отклонится стрелка гальванометра.

2.2. Собрать схему рис.21.2 и определить собственный коэффициент электростатической индукции  $\beta_{11}$ . С этой целью при включенном рубильнике  $P$  переключатель  $\Pi$  поставить в положение I. Проводник 1 при этом заряжается до потенциала источника. Перебросив переключатель  $\Pi$  в положение II, разрядить проводник 1 через гальванометр, что позволит, фиксируя отброс гальванометра (измерителя заряда), вычислить заряд проводника 1.

Поменяв местами проводники, подсоединенные к зажимам переключателя  $\Pi$ , 1,2 и 4,5, аналогично определить коэффициент  $\beta_{22}$ .

Таким образом, переключая проводники, подсоединенные к зажимам 1-6 переключателя  $\Pi$ , измерить все собственные и взаимные коэффициенты электростатической индукции.

Каждый коэффициент измерить трижды.

Результаты измерений занести в табл. 21.1.

Таблица 21.1

Собственные и взаимные коэффициенты электростатической индукции  
трехжильного кабеля

Коэффициенты электростатической индукции	Отклонение гальванометра				Значение коэффициентов $\beta$ , мкФ
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_{cp}$	
$\beta_{11}$					
$\beta_{22}$					
$\beta_{33}$					
$\beta_{12}$					
$\beta_{13}$					
$\beta_{23}$					

2.3. Вычислить значение всех коэффициентов  $\beta$  по формуле:

$$\beta = \frac{n_{cp} \delta}{U} \cdot 10^6. \quad (2.2)$$

2.4. Собрать схему рис. 21.4 для определения собственных частичных емкостей.  
Поставить переключатель  $\Pi$  в положение I и зарядить все проводники до

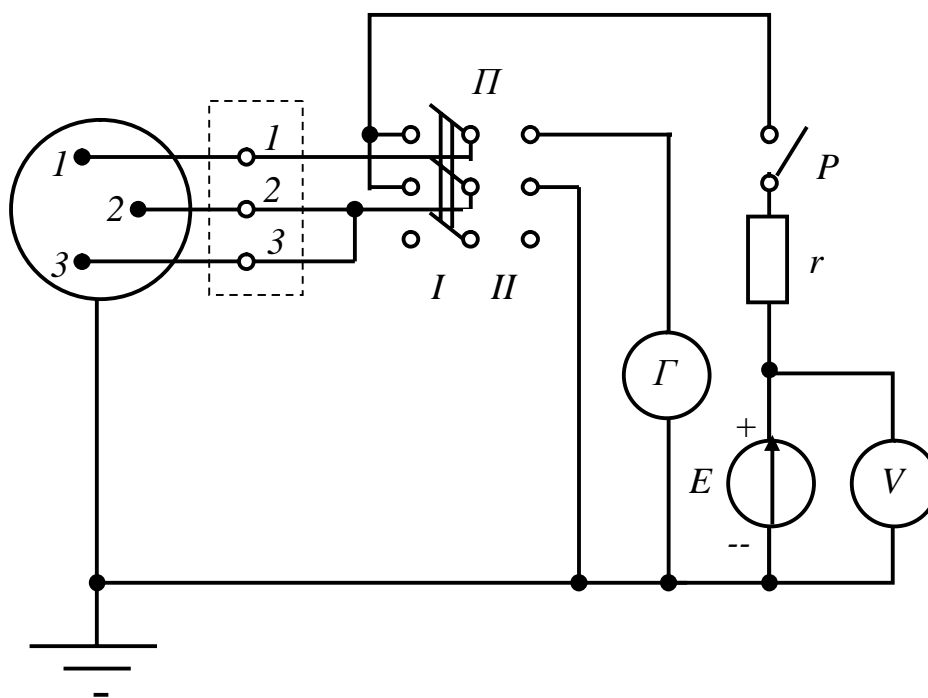


Рис. 21.4. Схема для определения собственных  
частичных ёмкостей трёхжильного  
кабеля

напряжения источника. Затем, перебросив переключатель  $\Pi$  в положение II, разрядить проводники, при этом проводник 1 будет разряжаться через гальванометр, что позволит вычислить его заряд и частичную емкость  $C_{11}$ .

Поменяв местами проводники, подключенные к зажимам 1 и 2 щитка кабеля, снова перебрасываем переключатель  $\Pi$  в положение I (заряд), а затем в

положение II (разряд), при этом гальванометр измерит заряд второй жилы, что позволит рассчитать частичную емкость  $C_{22}$ .

По сравнению с исходной схемой (рис.21.3) меняем местами проводники, подключенные к зажимам 1 и 3 щитка кабеля и снова перебрасываем переключатель II в положение I (заряд), а затем в положение II (разряд). При этом гальванометр измерит заряд третьего проводника, что позволит рассчитать частичную емкость  $C_{33}$ .

Собственную частичную емкость измерить трижды.

Данные измерений занести в табл. 21.2.

Вычислить собственные частичные емкости по формуле:

$$C = \frac{n_{cp} \delta}{U} \cdot 10^6. \quad (2.3)$$

2.5. По найденным значениям коэффициентов электростатической индукции (табл. 21.1) вычислить взаимные (1.5) и собственные (1.6) частичные емкости и занести их в табл.21.3.

Таблица 21.2

Экспериментальные значения собственных частичных емкостей трехжильного кабеля

Частичные емкости	Отклонение гальванометра				Экспериментальные значения частичных емкостей $C$ , мкФ
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_{cp}$	
$C_{11}$					
$C_{22}$					
$C_{33}$					

Таблица 21.3

Расчетные значения частичных емкостей трехжильного кабеля

$C_{11}$ , мкФ	$C_{22}$ , мкФ	$C_{33}$ , мкФ	$C_{12}$ , мкФ	$C_{13}$ , мкФ	$C_{23}$ , мкФ	Примечание

2.6. Сравнить результаты экспериментального и расчетного определения собственных частичных емкостей.

2.7. Вычислить рабочую емкость кабеля, приходящуюся на одну фазу, по формуле:

$$C_{\phi} = C_c + 3C_e,$$

где  $C_c = \frac{C_{11} + C_{22} + C_{33}}{3}; \quad C_e = \frac{C_{12} + C_{13} + C_{23}}{3}.$

### 3. Вопросы для самопроверки.

3.1. От каких параметров линии электропередачи зависят коэффициенты электростатической индукции?

3.2. Как измерить потенциал проводов относительно земли?

3.3. От чего зависят частичные емкости линий передач?

3.4. Начертите схемы включений частичных емкостей двух- и трех-проводных линий передач.

3.5. Как определить рабочую емкость двухпроводной линии?

3.6. Что понимать под рабочей емкостью трехфазной линии?

## *Лабораторная работа 22*

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПЛОСКОМ ПРОВОДЯЩЕМ ЛИСТЕ

Цель работы – экспериментальное построение графической картины поля постоянного тока в плоском проводящем листе.

#### 1. Пояснения к работе

Электрическое поле постоянного тока в области, в которой отсутствуют сторонние электрические поля, является полем потенциальным и подчиняется уравнению Лапласа.

$$\nabla^2 \varphi = 0. \quad (1.1)$$

Графическая картина плоскопараллельного поля постоянного тока образуется линиями равного потенциала и линиями тока. При её построении необходимо придерживаться ряда правил, вытекающих из основных уравнений поля и граничных условий.

Из уравнения непрерывности тока  $div \vec{\delta} = 0$  следует, что линии тока (линии, во всех точках которых вектор плотности тока направлен по касательной) непрерывны и не могут обрываться в каком либо месте проводящей среды. Они должны проходить от одного электрода к другому (от электрода с более высоким потенциалом к электроду с меньшим значением потенциала). Линии обреза проводящего листа, являясь границей раздела между проводящей средой и диэлектриком, представляют собой линии тока.

Так как  $\vec{\delta} = \gamma \vec{E} = -\gamma \cdot grad \varphi$ , то линии тока должны быть перпендикулярны линиям равного потенциала. Поэтому к линиям обреза листа линии равного потенциала должны подходить под прямым углом. Если линии равного потенциала проводить так, чтобы разность потенциалов между соседними линиями была всюду одна и та же, а линиями тока разделить лист на равные трубки тока, то полученная система ортогональных кривых представит собой графическую картину электрического поля. В ней криволинейные прямоугольники подобны друг другу (рис.22.1) и для каждого из них будет выполняться равенство:

$$\frac{a_k}{b_k} = const, \quad (1.2)$$

где:  $k$  - номер криволинейного прямоугольника (ячейки);  
 $a_k$  - расстояние между линиями равного потенциала;  
 $b_k$  - расстояние между линиями тока.

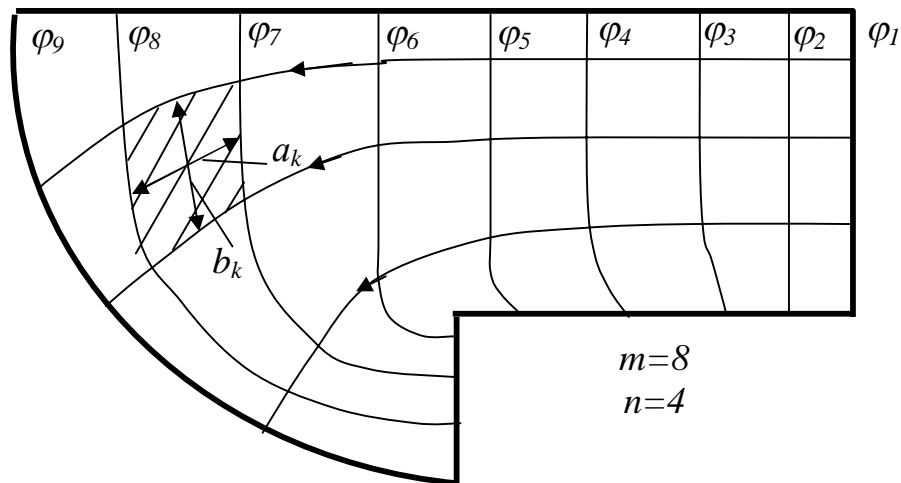


Рис. 22.1. Графическая картина электрического поля постоянного тока

По графической картине распределения постоянного тока в плоском проводящем листе можно получить ряд важных сведений об электрическом поле этого тока. Выяснить распределение потенциала в любой точке листа, легко определить вектор плотности тока  $\delta$ , вектор напряженности  $E$ , количество тепловой энергии  $P$ , выделяемой в единице объема проводника в единицу времени, общее сопротивление  $Z$  листа или отдельных его частей и т.д.

Общий обзор графической картины поля дает также качественное представление о распределении тока. Плотность тока и выделение тепловой энергии будут большими в тех местах, где сетка графической картины поля будет гуще.

Направление вектора плотности тока  $\delta$  совпадает с направлением касательной к линиям тока, а средняя его величина для данной ячейки определяется по уравнению:

$$\delta_k = \frac{I}{nb_k h}, \quad (1.3)$$

где:  $I$  - величина тока, протекающего через лист;  
 $n$  - число трубок тока;  
 $h$  - толщина листа.

Вектор напряженности электрического поля  $E_k$  ячейки совпадает по направлению с вектором плотности тока и может быть найден из закона Ома в дифференциальной форме. Средняя для данной ячейки его величина определяется по формуле:

$$E_k = \frac{\delta_k}{\gamma}, \quad (1.4)$$

где  $\gamma$  - удельная проводимость материала листа.

Количество тепловой энергии, выделяемой в единице объема проводника в единицу времени, также будет различно для каждой ячейки:

$$P_k = \delta_k E_k = \frac{\delta_k^2}{\gamma} = \gamma E_k^2. \quad (1.5)$$

Расчет сопротивления для плоского листа произвольной формы производится по формуле:

$$r = r_k \cdot \frac{m}{n}, \quad (1.6)$$

где:  $r_k$  - сопротивление  $k$ -й ячейки;

$m$  - число промежутков между линиями равного потенциала.

С учетом равномерного распределения плотности тока в пределах ячейки получим формулу её сопротивления:

$$r_k = \frac{a_k}{\gamma \cdot h \cdot b_k}. \quad (1.7)$$

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему рис.22.2 и с помощью реостата  $R$  установить ток 2 А.

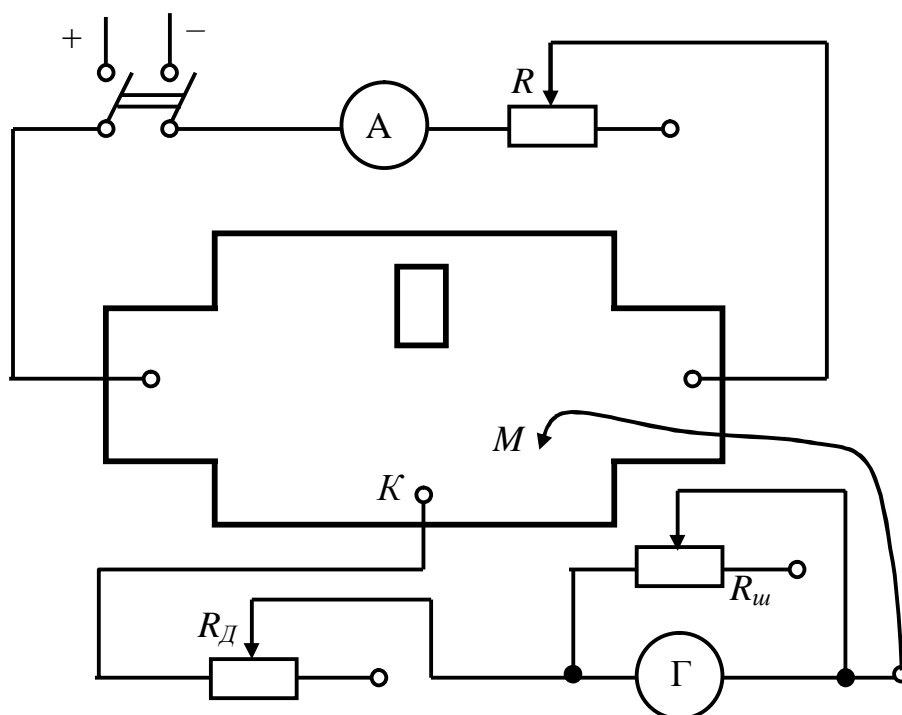


Рис. 22.2. Схема для экспериментального определения линий равного потенциала электрического поля постоянного тока в плоском проводящем листе

2.2. Выбрать предел измерения гальванометра для определения потенциала различных точек поля. С этой целью сопротивление  $R_{и}$  (магазин сопротивлений) установить равным критическому сопротивлению гальванометра, а величину сопротивления  $R_{д}$  (магазин сопротивлений)



установить максимальной и, поставив зонд  $M$  вблизи одного из электродов, уменьшать сопротивление  $R_d$  до тех пор, пока гальванометр не даст полного отклонения.

2.3. Построить линии равного потенциала электрического поля плоского проводящего листа.

Для этого с помощью зонда  $M$  найти точки, имеющие потенциал, равный потенциалу точки  $k$  (равенству потенциалов соответствует нулевое показание гальванометра), и соединить эти точки в линию равного потенциала. Остальные линии равного потенциала строятся так, чтобы разность потенциалов между любыми соседними линиями равного потенциала была одинаковой и равной  $\Delta U$ .

Величина напряжения  $\Delta U$  (число вольт, через которое проводятся линии равного потенциала) вычислить по формуле:

$$\Delta U = C_r \cdot \Delta N \left[ R_r + r_d \cdot \frac{r_u + R_r}{r_u} \right] \quad (2.1)$$

где  $C_r$  - постоянная гальванометра ( $A/дел$ );

$R_r$  - сопротивление гальванометра;

$\Delta N$  - изменение положения световой стрелки гальванометра при переходе от одной эквипотенциальной линии к соседней (дел.)

Чтобы сетка графической картины поля была достаточно густой, на лист следует нанести 20-30 линий равного потенциала (при переходе от одной эквипотенциальной линии к другой изменять  $N$  на 5 делений).

При построении линий равного потенциала ток  $I$  следует поддерживать постоянным.

Построенную на проводящем листе картину линий равного потенциала перенести на кальку или на лист клетчатой бумаги.

2.4. Построенную на листе клетчатой бумаги картину линий равного потенциала дополнить картиной линий тока. Построение линий тока выполнить графически с учетом рекомендаций, данных в пояснении к работе.

2.5. Вычислить удельную проводимость  $\gamma$  материала плоского проводящего листа. Для этого в схеме рис.22.2 вместо листа включить узкую полоску из того же материала, определить отклонение  $\Delta N$  стрелки гальванометра, и вычислить по (2.1) разность потенциалов  $\Delta U$  между двумя штрихами, расположенными в средней части полоски и отстоящие друг от друга на расстоянии  $\lambda=1-2$  см.

С этой целью наконечниками проводников, помеченными буквами  $K$  и  $M$ , коснуться вышеуказанных штрихов, расположенных в средней части полоски.

Вычислив сопротивление участка полоски  $R = \frac{\Delta U}{I}$ , можно найти величину удельной проводимости материала:

$$\gamma = \frac{\lambda}{R \cdot b_k \cdot h}, \quad (2.2)$$

где:  $\lambda$  - расстояние между штрихами полосы;  
 $b_k$  - ширина полосы.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 22.1.

Таблица 22.1

Экспериментальное определение удельной проводимости материала плоского проводящего листа.

$I,$ $A$	$C_{\Gamma},$ $A/\text{дел}$	$R_{\Gamma},$ $\text{Ом}$	$r_{\text{д}},$ $\text{Ом}$	$r_{\text{ш}},$ $\text{Ом}$	$\Delta N,$ $\text{дел}$	$\Delta U,$ $B$	$r,$ $\text{Ом}$	$\lambda,$ $\text{см}$	$b_0,$ $\text{см}$	$h,$ $\text{см}$	$\gamma,$ $1/\text{Ом см}$

2.6. По графической картине электрического поля плоского проводящего листа для наибольшей и наименьшей ячеек вычислить значение плотности тока, напряженность электрического поля, удельной мощности тепловых потерь и сопротивления ячейки. Вычислить также сопротивление плоского листа (1.6).

Результаты расчета свести в таблицу 22.2.

Таблица 22.2.

Характеристики электрического поля для наибольшей и наименьшей ячеек

$N$ п/п	$I,$ $A$	$m,$	$n,$	$\gamma,$ $1/\text{Ом см}$	$h,$ $\text{см}$	$a_k,$ $\text{см}$	$b_k,$ $\text{см}$	$\delta_k,$ $A^2/\text{см}$	$E_k,$ $B/\text{см}$	$P_k,$ $Bm/\text{см}^3$	$r_k,$ $\text{Ом}$	$r,$ $\text{Ом}$
1												
2												

2.7. Используя вычисленную в п.2.3 разность потенциалов  $\Delta U$  между силовыми линиями равного потенциала, определить среднее значение напряженности электрического поля для наибольшей и наименьшей ячеек.

$$E_k = \frac{\Delta U}{a_k}.$$

Сравнить полученные результаты с величинами напряженности

$$E_k = \frac{\delta_k}{\gamma} \quad \text{табл. 22.2.}$$

### 3. Вопросы для самопроверки

3.1. Что представляет собой графическая картина электрического поля плоского проводящего листа?

3.2. Как строятся линии равного потенциала электрического поля проводящего листа?

3.3. Какие условия необходимо выполнять при графическом построении линий тока по известной картине расположения линий равного потенциала?

3.4. Как по графической картине электрического поля вычислить плотность тока, напряженность и удельную мощность тепловых потерь?

3.5. Каким образом находят сопротивление ячейки и общее сопротивление плоского листа произвольной формы?

### *Лабораторная работа 23*

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Цель работы – экспериментальное построение и исследование картины магнитного поля в воздушном зазоре между полюсом и якорем и между двумя соседними полюсами машины постоянного тока на модели электрического поля постоянного тока в плоском проводящем листе.

### 1. Пояснения к работе

Электрическое моделирование различных потенциальных полей в сплошной проводящей среде основано на том, что распределение потенциалов в электрическом поле постоянного тока проводящей среды и в указанных полях описывается уравнением Лапласа. В настоящее время электрическое моделирование применяется в электротехнике, теории упругости, теплотехнике, гидромеханике и т.д.

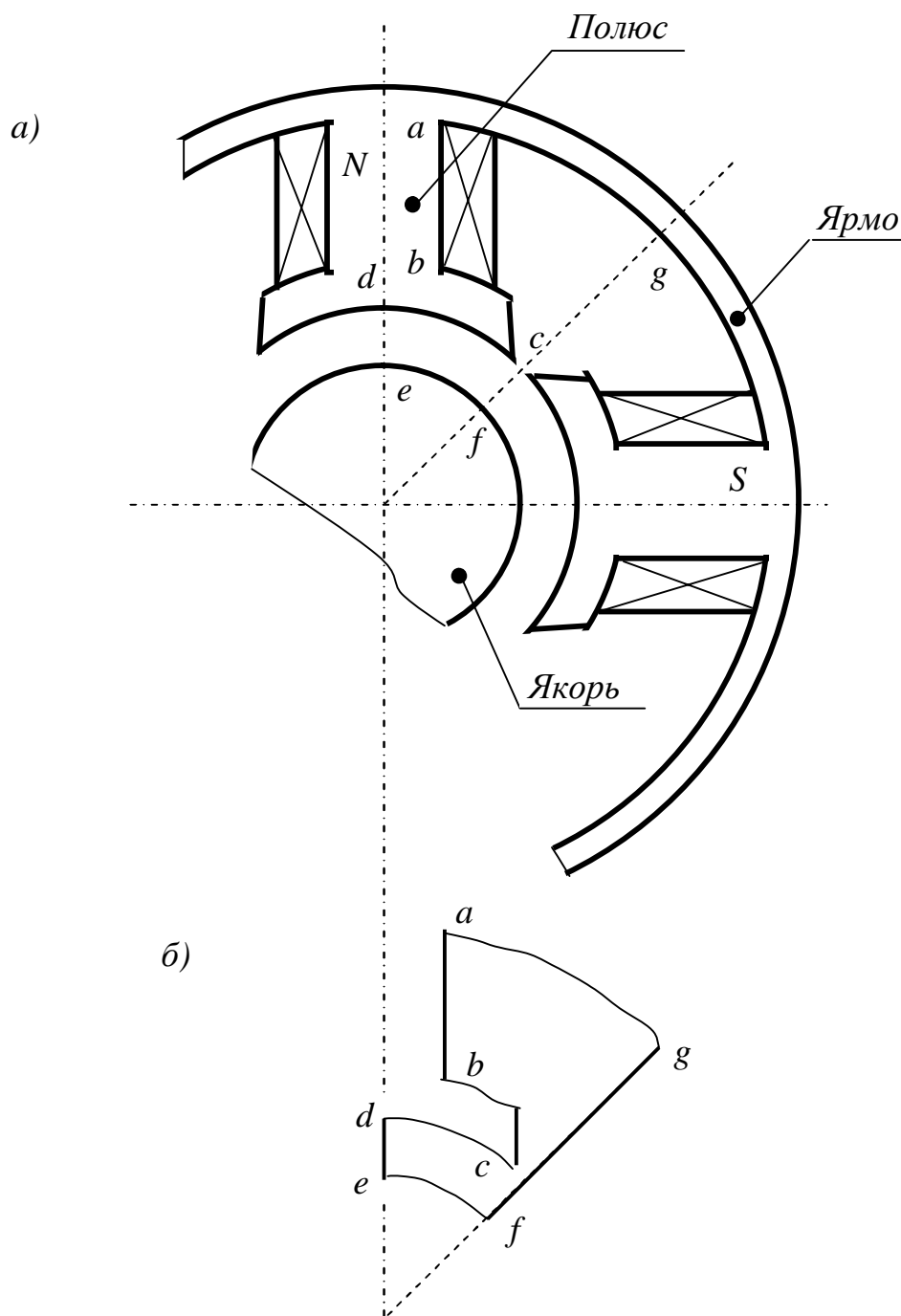
Магнитное поле машины постоянного тока в областях, не занятых токами, является двухмерным, плоскопараллельным, потенциальным и может быть смоделировано на плоском проводящем листе. При моделировании должно быть соблюдено точное подобие областей исследуемого поля и поля в проводящей среде, а также выполнены требуемые граничные условия.

На рис. 23.1,*а* показано поперечное сечение машины постоянного тока, а на рис. 23.1,*б* изображен плоский проводящий лист для моделирования магнитного поля машины в воздушном зазоре между полюсом и якорем и между двумя соседними полюсами.

Так как магнитная проницаемость электротехнической стали гораздо больше, чем воздуха, то для полюса, ярма и якоря машины можно принять  $\mu_r = \infty$ . Тогда линии  $bcd$ ,  $efga$  будут представлять собой линии равного магнитного потенциала, так как силовые линии магнитного поля, выходящие из полюса машины, перпендикулярны к указанным линиям. Линия  $fg$  также является линией равного магнитного потенциала, так как линии потока рассеяния, замыкающиеся на соседнем южном полюсе, в пространстве между полюсами пересекают линию  $fg$  под прямым углом.

Разность магнитных потенциалов между линиями  $bcd$  и  $efga$  равна магнитодвижущей силе  $IW$ , создаваемой одним полюсом ( $I$  – ток обмотки возбуждения с числом витков  $W$ ). Магнитным сопротивлением пути потока в

стальных деталях машины следует пренебречь, из-за бесконечно большого значения магнитной проницаемости стали.



*Рис. 23.1. Поперечное сечение машины постоянного тока (а) и плоский проводящий лист (б) для моделирования магнитного поля машины в воздушном зазоре между полюсом и якорем и между двумя соседними полюсами*

Вдоль линии  $ab$  магнитный потенциал в воздухе изменяется на величину магнитодвижущей силы  $IW$ , развиваемой обмоткой возбуждения полюса машины. При равномерном распределении витков катушек вдоль сердечника полюса указанная МДС также распределится равномерно вдоль линии  $ab$ . При этом магнитный потенциал будет изменяться вдоль линии  $ab$  по линейному

закону. Так как линия  $ab$  не является линией равного потенциала, то к ней силовые линии не должны подходить под прямым углом.

В рассматриваемой работе применяется стальной лист из однородного материала, электрическое поле которого является обращенным по отношению к магнитному полю машины.

Линии  $bcd$  и  $efga$  равного магнитного потенциала машины (рис.23.1) на модели (рис.23.2) представляют собой линии тока, силовая линия магнитного поля является линией равного электрического потенциала модели.

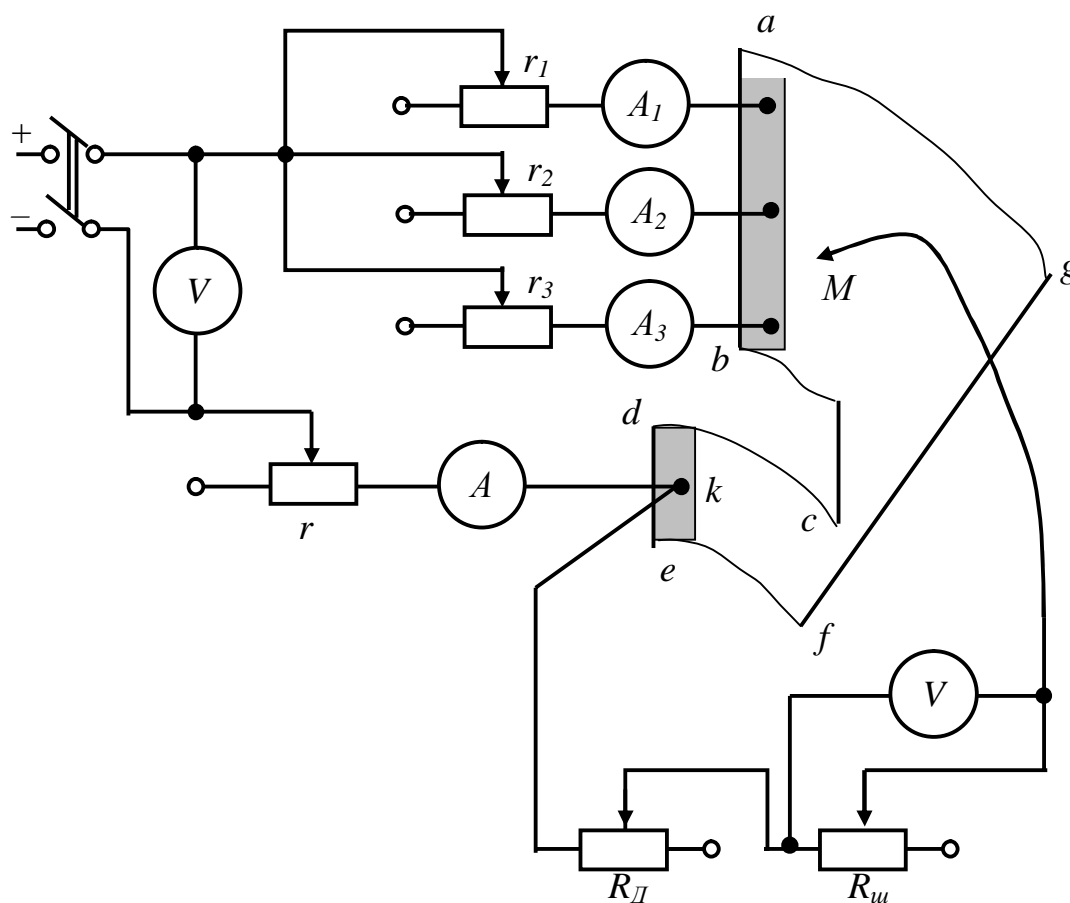


Рис. 23.2. Схема для исследования модели магнитного поля машины постоянного тока

Линии тока в модели совпадают по направлению с линиями напряженности электрического поля ( $\vec{D} = \gamma \vec{E}$ ) и эти линии должны пересекаться с линиями равного электрического потенциала под прямым углом ( $\vec{E} = -grad\phi$ ), образуя семейство ортогональных кривых, расчленяющих поле на систему подобных криволинейных прямоугольников.

Ток, поступающий из сети в лист по линии  $ed$  (рис.23.2) и выходящий из листа по линии  $ab$ , соответствует линейному изменению магнитного потенциала вдоль линий  $ed$  и  $ab$  машины постоянного тока. При этом линиям тока в листе соответствуют линии равного магнитного потенциала в машине, а

линиям равного электрического потенциала в листе – линии напряженности магнитного поля в машине.

Равномерное распределение тока вдоль линии  $ed$  достигается благодаря латунной полоске, припаянной к листу. На этой полоске расположен зажим  $K$ . Равномерное распределение тока вдоль линии  $ab$ , соответствующее равномерному распределению магнитодвижущей силы по высоте сердечника полюса, достигается при помощи реостатов  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ , которые присоединены к зажимам, припаянным к листу по линии  $ab$ .

Построение картины электрического поля плоского проводящего листа производится по методике, изложенной в работе 22 настоящего руководства. Заменяя линии равного электрического потенциала пластины линиями напряженности  $\vec{H}$  магнитного поля и линии тока пластины линиями равного магнитного потенциала, получим картину магнитного поля машины. По ней можно определить магнитную проводимость  $G_M$  воздушного зазора между полюсом и якорем и коэффициент рассеяния  $K_s$  обмотки возбуждения машины.

$$G_M = \frac{\mu_0 \cdot \lambda \cdot b \cdot m}{a \cdot n}, \quad (1.1)$$

где:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - абсолютная магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная);

$\lambda$  - длина полюса вдоль оси якоря;

$b$  - ширина трубки магнитного потока (расстояние между двумя смежными линиями напряженности магнитного поля);

$a$  - длина криволинейного прямоугольника в направлении трубки магнитного потока (расстояние между двумя смежными линиями равного магнитного потенциала);

$m$  - число трубок магнитного потока между полюсами и якорем;

$n$  - число криволинейных квадратов в одной трубке магнитного потока.

Трубки магнитного потока начинаются на линии  $bcd$  и заканчиваются на линии  $efga$  (трубка ограничена двумя смежными линиями напряженности магнитного поля):

$$K_s = \frac{\Phi_s}{\Phi_0 + \Phi_s} = \frac{m_1}{m + m_1}, \quad (1.2)$$

где:  $\Phi_s$  - магнитный поток рассеяния машины;

$\Phi_0$  - рабочий магнитный поток;

$m_1$  - число трубок магнитного потока, примыкающих к линии  $fga$ ;

$m$  - число трубок магнитного потока, примыкающих к линии  $ef$  (между полюсом и якорем).

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему соединений (рис.23.2) и установить ток в плоском проводящем листе порядка 2-2,5 А. С помощью реостатов  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  добиться равномерного распределения токов по линии  $ab$ .

2.2. На поверхности стального листа карандашом или мелом нанести линии равного электрического потенциала, которые эквивалентны линиям напряженности магнитного поля машины. Приращение потенциала между соседними линиями должно быть одно и то же, что соответствует разделению картины магнитного поля на трубки равного магнитного потока. Эквивалентные линии нанести с интервалом в 5 делений гальванометра.

2.3. Картину линий напряженности магнитного поля перенести на кальку или лист клетчатой бумаги и дополнить её картиной линий равного магнитного потенциала. Построение последних производится графически с соблюдением следующих условий:

- а) силовые линии и линии равного магнитного потенциала везде должны пересекаться под прямым углом, образуя подобные криволинейные прямоугольники или квадраты;
- б) силовые линии перпендикулярны к линиям  $bcd$  и  $efga$ .

Следовательно, эти линии являются линиями равного потенциала

2.4. По графической картине магнитного поля машины определить её магнитную проницаемость  $G_M$  в воздушном зазоре между полюсом и якорем.

2.5. Используя картину магнитного поля, вычислить коэффициент рассеяния  $K_s$  обмотки возбуждения машины.

### 3. Вопросы для самопроверки

3.1. Какие условия должны быть выполнены при создании проводящей модели магнитного поля машины постоянного тока?

3.2. Для чего припаяна латунная полоска по линии  $ed$  плоского проводящего листа?

3.3. При каких условиях магнитные силовые линии направлены перпендикулярно к поверхности ферромагнитного материала?

3.4. Как направлены магнитные силовые линии к поверхности обмотки возбуждения машины постоянного тока?

3.5. Каким образом производится построение картины магнитного поля в воздушном зазоре машины? Какие условия должны быть выполнены при этом построении?

3.6. Как найти магнитную проводимость воздушного зазора машины по графической картине магнитного поля?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рибалко М.П., Есауленко В.О., Костенко В.І. Теоретичні основи електротехніки: Лінійні електричні кола: Підручник. – Донецьк: Новий світ, 2003. – 513 с.
2. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи – М.:Гардарика, 1999. – 637 с.
4. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники: В 2 ч. - Л.: Энергоиздат. 1981. – Т.1 – 536 с.; Т.2 – 416 с.
5. Атабеков Г.И., Тимофеев А.В., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники: В 2 ч. – М.: Энергия, 1978. – Ч.1. Линейные электрические цепи. – 592 с.