

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
"СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кафедра "Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети"

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ А П П А Р А Т Ы

Лабораторный практикум

Учебно-методическое пособие
для студентов направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 621.316 (076.5)
ББК 31.264я73
Э454

Р е ц е н з е н т ы:

А.А. Скидан - заведующий кафедрой СКУ АС, к.т.н., доцент
В.С. Жмерёв - к.т.н., доцент кафедры ТЭиУК

Коллектив авторов:

В.Г. Слюсаренко, М.Ю. Сперанский,
А.А. Лавренчук, В.В. Смирнов

Э454 Электрические аппараты. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / В.Г. Слюсаренко [и др.]. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 95 с.

Приведены лабораторные установки, изучение которых предусмотрено программой курса «Электрические аппараты». Изложены цели, основные теоретические сведения, порядок выполнения и инструктивно-методические указания по подготовке к проведению каждой лабораторной работы.

Для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль подготовки «Электроснабжение», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Электрические станции».

УДК 621.316 (076.5)
ББК 31.264я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании ученого совета Института ядерной энергии и промышленности, протокол № 4 от 30 марта 2018 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
<i>Лабораторная работа № 1. Регулирующие аппараты (статический выпрямительный агрегат ВАКС-2.75 с автоматическим регулированием напряжения)</i>	5
<i>Лабораторная работа № 2. Снятие тяговой характеристики электромагнита постоянного тока</i>	27
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование зависимости переходного сопротивления контакта от контактного нажатия и материала контакта</i>	49
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование дуги постоянного и переменного тока и способов ее гашения</i>	61
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование плавких предохранителей</i>	73
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование магнитного пускателя</i>	85
<i>Лабораторная работа № 7. Исследование воздушных автоматических выключателей</i>	90

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Электрические аппараты» является обязательным практически для всех специальностей электроэнергетического и электротехнического профиля и включает, кроме лекционного раздела, практических занятий, выполнение лабораторных работ.

Обязательным в лабораториях является строгое соблюдение правил охраны труда и техники безопасности.

В настоящем пособии приведены описания семи лабораторных работ, предусмотренных учебным планом для направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль подготовки «Электро-снабжение», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Электрические станции».

Ответы на контрольные вопросы помогут студентам самостоятельно проверить глубину усвоения теоретического материала по данной теме, правильность порядка выполнения, оформления лабораторной работы.

Лабораторная работа № 1 рассмотрен анализ регулирующих аппаратов в простом и автоматическом режимах, в статическом и динамическом режимах.

Лабораторная работа № 2 посвящена анализу тяговых характеристик электромагнитов постоянного и переменного токов и экспериментальному определению тяговой характеристики электромагнита постоянного тока.

Лабораторная работа № 3 посвящена анализу переходного сопротивления контактов коммутирующих аппаратов и исследованию переходного сопротивления контактов от материала и контактного нажатия.

Лабораторная работа № 4 посвящена исследованию дуги постоянного и переменного тока и способов ее гашения.

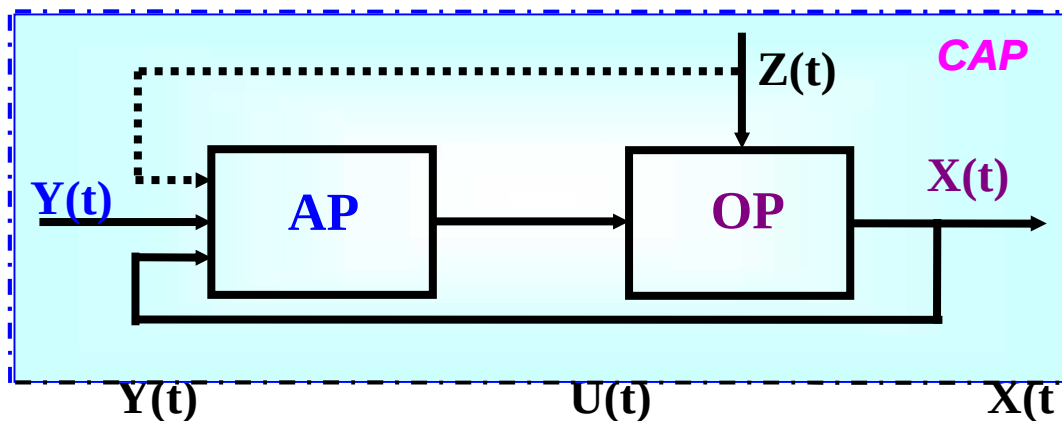
Лабораторная работа № 5 посвящена анализу конструкции низковольтных предохранителей типов ПР-2, ПН-2 и НПН-60 и снятие времятоковых характеристик плавких вставок.

Лабораторная работа № 6 посвящена изучению конструкции и принципам работы основных узлов магнитного пускателя, снятию характеристик электромагнитного пускателя, изучение и получение навыков в сборке схем управления нереверсивных коммутационных аппаратов.

Лабораторная работа № 7 посвящена детальному изучению конструкции воздушных автоматических выключателей (автоматов) и снятию характеристики времени отключения автомата (времени срабатывания расцепителя автомата) в зависимости от величины тока, протекающего через автомат.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

Тема: Регулирующие аппараты (статический выпрямительный агрегат ВАКС-2.75 с автоматическим регулированием напряжения).



Время: 4 часа. **Место проведения:** помещение 156.

Цель: на примере статического выпрямительного агрегата т. ВАКС-2.75-115 с автоматическим регулированием напряжения:

1. Изучить назначение, принцип работы, элементную базу автоматической системы стабилизации.
2. Уметь строить функциональные схемы САР по их принципиальным электрическим схемам.
3. Оценить экспериментальным путем качественные показатели САР.
4. Выявить влияние корректирующих устройств на качественные показатели САР.
5. Уметь разработать математическую модель САР.

План

1. Вводная часть – 10 мин.
2. Основная часть – 140 мин:
 - а) подготовить к работе выпрямительный агрегат ВАКС – 10 мин;
 - б) ознакомиться с назначением агрегата и его техническими характеристиками – 20 мин;
 - в) изучить устройство, принцип работы агрегата и его элементов – 20 мин;
 - г) снять характеристики качественных показателей агрегата – 60 мин;
 - д) оформить работу – 40 мин;
 - е) защитить работу – 10 мин.

3. Заключительная часть – 10 мин.

В результате проведения лабораторного занятия студенты должны **ЗНАТЬ:**

1. Назначение выпрямительного агрегата ВАКС и его технические характеристики.
2. Устройство и работа составных частей агрегата.
3. Устройство и работу агрегата в целом.
4. Контрольно-измерительные приборы, используемые для оценки качественных показателей агрегата.
5. Порядок работы, измерения параметров, регулирование и настройка.
6. Указание мер по электробезопасности.

УМЕТЬ:

1. Строить функциональные схемы по принципиальным электрическим схемам.
2. Получать экспериментальные характеристики САР.
3. Оценивать качественные показатели САР.
4. Изменять входные и выходные координаты агрегата.
5. Разрабатывать математическую модель САР.

Литература

1. Агрегат выпрямительный типа ВАКС-2.75-115. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2ПС.932.033 ТО.
2. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. - М.: Машиностроение, 1973.
3. Техническая кибернетика, устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. - В 3-х кн. / Под ред. В.В. Солодовникова. - М.: Машиностроение, 1973. - Кн. 1; 1975. - Кн. 2; 1976. - Кн. 3.
4. Справочник по корабельной автоматике / Ю.К. Баленко, П.И. Бухтияров и [др.] - М.: Воениздат, 1974.
5. Коротков В.Ф. Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах / В.Ф. Коротков. - М.: ИД МЭИ, 2013.
6. Электрические аппараты : учебник и практикум для академического бакалавриата / Под ред. П.А. Курбатова. - М.: Издательство Юрайт, 2018. - 250 с. - (Серия: Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-9715-6.

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАНЯТИЯ № 1

I. Программа выполнения работы:

- изучить принцип работы и основные элементы выпрямительного агрегата ВАКС, как автоматической системы;
- сравнить качественные показатели агрегата в простом и автоматическом режимах стабилизации выходного напряжения;
- выявить влияние демпферного контура, как корректирующего элемента автоматической системы, на качественные показатели выпрямительного агрегата;
- составить функциональную схему агрегата, как системы автоматической стабилизации напряжения;
- разработать математическую модель агрегата.

II. Порядок выполнения работы:

- с помощью автомата на силовом электрошите кабинета (по разрешению преподавателя или инженера) подать напряжение на питающий фидер агрегата ВАКС-2.75-115 (30, 230).

- **снять зависимость выходного напряжения агрегата от тока нагрузки $U_n = f(I_n)$.**

1. В простом режиме, для чего:

- а) установить переключатель **B_2** режима работы агрегата в положение **II**;
- б) установить переключатель нагрузки **III_1** в крайнее левое положение;
- в) с помощью пакетного выключателя **B_1** включить агрегат, при этом загорится сигнальная лампа **Л** и вольтметр **V** должен показать напряжение **130-150 В** (29-30 В; 230-240 В). Амперметр **A** при этом будет показывать отсутствие подключенной к агрегату нагрузки;
- г) поворачивая ручку переключателя **III_1** по часовой стрелке, фиксировать по амперметру **A** ток нагрузки, а по вольтметру **V** значение выходного напряжения агрегата;
- д) результаты замеров занести в табл. 1.1;
- е) с помощью пакетного переключателя **B_1** отключить агрегат от питающего фидера.

2. В автоматическом режиме стабилизации выходного напряжения, для чего:

- а) установить переключатель **B_2** в положение **I**, выключатель **B_3** , подключения демпферной обмотки, должен быть в положении «**ВКЛ**», переключатель задающего выходного напряжения агрегата **III_2** в среднем положении;

- б) повторить пункты б) - е) режима 1.

- **Определить качественные показатели переходного процесса агрегата при подаче скачком нагрузки $I_n = 4$ А.**

1. В простом режиме, для чего:

- а) переключатель режима работы агрегата **B₂** установить в положение **II**;
- б) к выходным клеммам агрегата подключить осциллограф т. **C1-65**, установив максимальное время его развертки, и подключить осциллограф к сети;
- в) пакетным выключателем **B₁** подключить агрегат к питающему фидеру. Вольтметр должен показывать напряжение **130-150 В** (29-30 В; 230-240 В);
- г) с помощью переключателя **ПП₁** подключить к агрегату нагрузку;
- д) наложив кальку на экран осциллографа, зарисовать характер переходного процесса и определить время переходного процесса **t_{пер}**, максимальное значение **U_{max}** и минимальное значение **U_{min}** первого колебания, число колебаний **N_{кол}** за время регулирования и период колебаний **T_о**. Результаты занести в табл. 1.2;
- е) с помощью пакетного переключателя **B₁** отключить агрегат от питающего фидера.

2. Выявить влияние демпферной обмотки на качество работы агрегата в автоматическом режиме стабилизации выходного напряжения, для чего:

1) **Демпферная обмотка включена в контур регулирования:**

- а) переключатель режима работы агрегата **B₂** установить в положение **I**. Убедиться, что переключатель подключения демпферной обмотки **B₃** находится в положение «ВКЛ»;

б) повторить пункты **в)** - **е)** режима 1.

2) **Демпферная обмотка в контуре регулирования отключена:**

- а) переключатель подключения демпферной обмотки **B₃** установить в положение «ВЫКЛ.», установить ток нагрузки **I_н = 8 А** и повторить операции пункта б).

Результаты исследований занести в табл. 1.2.

- **Задать стабилизированное напряжение агрегата при токе нагрузки I_н = 4 А:**

- а) **U₁ = 120 В** (250 В, 35 В), для чего положение переключателя **ПП₂** установить в положение **"3"** и по вольтметру убедиться, что выходное напряжение агрегата равно **120 В** (250 В, 35 В);

- б) **U₁ = 90 В** (210 В, 25 В), для чего положение переключателя **ПП₂** установить в положение **"1"** и по вольтметру убедиться, что выходное напряжение агрегата равно **90 В** (210 В, 25 В).

Т а б л и ц а 1.1

Результаты замеров вольтамперной характеристики агрегата ВАКС-2.75

Режим работы агрегата	З а в и с и м о с т ь $U_n = f(I_n)$.					
	$I_1(A)$	$I_2(A)$	$I_3 (A)$	$I_4(A)$	$I_5(A)$	$I_6(A)$
	$U_1(B)$	$U_2(B)$	$U_3(B)$	$U_4(B)$	$U_5(B)$	$U_6(B)$
Простой						
Автоматический						

Т а б л и ц а 1.2

Качественные показатели переходного процесса агрегата ВАКС-2.75 при набросе нагрузки $I_n = 4 A$

Режим работы агрегата	Показатели переходного процесса				
	U_{max1}	U_{min1}	$N_{кол}$	$t_{рег}$	T_o
Простой					
Автоматический без демпферного контура					
Автоматический с демпферным контуром					

III. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

- принципиальную электрическую схему элемента сравнения блока автоматики;
- функциональную схему статического выпрямительного агрегата ВАКС-2.75;
- структурную схему и передаточные функции элементов агрегата;
- экспериментальные данные в виде табл. 1.1 и 1.2 и в виде графиков;
- математическую модель агрегата в режиме автоматической стабили-

зации напряжения, в виде структурной схемы и в виде передаточной функции в символьном виде;

- дать заключение о влиянии демпферной обмотки на качество работы выпрямительного агрегата ВАКС-2.75.

Контрольные вопросы

1. Основные технические данные выпрямительного агрегата.
2. Принцип действия узлов и элементов выпрямительного агрегата т. ВАКС-2.75, как элемента автоматической системы.
3. Принцип действия выпрямительного агрегата в простом и автоматическом режимах.
4. Контрольно-измерительные приборы, используемые для оценки качественных характеристик агрегата.
5. Порядок работы, измерение параметров, регулирование и настройка агрегата ВАКС-2.75.
6. Основные и дополнительные элементы, необходимые для организации автоматического процесса управления и наличие их в агрегате ВАКС-2.75.
7. Назначение обратных связей и их влияние на качественные характеристики агрегата.
8. Назначение обмоток дросселей насыщения.
9. Задающий элемент выходного стабилизированного напряжения агрегата.
10. Элемент сравнения блока автоматики агрегата.

ПРИЛОЖЕНИЕ
к лабораторному занятию № 1
для самостоятельной проработки студентом

Назначение агрегата и его технические характеристики

Выпрямительный агрегат ВАКС-2.75-115 (230, 30) является преобразователем переменного трехфазного тока в постоянный с автоматической системой стабилизации выходного напряжения и предназначен для питания силовой нагрузки в сетях постоянного тока.

Выпрямительный агрегат ВАКС-2.75 имеет следующие технические данные:

- | | |
|-------------------------------------|------------------------|
| - напряжение питающей сети | - 380 В; |
| - число фаз питающей сети | - 3; |
| - частота питающей сети | - 50 Гц; |
| - потребляемая мощность | - 4.15 кВа; |
| - выходная мощность | - 2,75 кВт; |
| - к.п.д. | - 84 %; |
| - коэффициент мощности | - 0.79; |
| - выпрямленное напряжение | - 115 В (230 В, 30 В); |
| - выпрямленный ток | - 24 А (12 А, 92 А); |
| - стабилизация выходного напряжения | - ± 2 %. |

Конструкция выпрямительного агрегата

Конструктивно агрегат представляет собой шкаф-каркас, обитый съемными металлическими щитами.

С лицевой стороны расположена откидная щит-дверь. На двери размещены измерительные приборы (амперметр, вольтметр), выведена рукоятка пакетного выключателя, сигнальная лампа. Основные элементы выполнены в виде самостоятельных блоков и закреплены внутри каркаса. С задней стороны установлен силовой понижающий трансформатор ТР1, в средней части - блок дросселей насыщения ДН1-ДН6. К блоку дросселей насыщения закреплена панель автоматики с аппаратурой. Трансформатор питания цепей автоматики ТР2 установлен в верхней части агрегата над блоками дросселей.

Основные узлы агрегата и системы стабилизации напряжения
(рис. 1.1, рис. 1.2)

Силовой понижающий трансформатор ТР1 служит для понижения питающего напряжения и гальванического разделения цепей. Первичная обмотка соединена в звезду, вторичная - в треугольник. Коэффициент

трансформации $K_1 = 1.95$. Фазное напряжение первичной обмотки $U_f = 230$ В, вторичной обмотки $U_f = 113$ В.

Трансформатор питания цепей автоматики ТР2 - это однофазный двухобмоточный трансформатор, предназначенный для питания схемы автоматики. Коэффициент трансформации $K_2 = 10.5$. Напряжение первичной обмотки $U_1 = 380$ В, вторичной - $U_2 = 36$ В. Напряжением ТР2 питаются рабочие обмотки магнитного усилителя УМ и выпрямительный мост VD7-VD10 состоящий из диодов D 229 А.

Блок дросселей насыщения ДН1-ДН6, служит стабилизатором выходного напряжения. Дроссель насыщения представляет собой магнитный усилитель, состоящий из четырех обмоток; рабочей - W_p , управления - W_u , смещения - $W_{см}$, демпферной - W_d . Блок состоит из шести дросселей. Рабочие обмотки дросселей включены в плечи трехфазного выпрямительного моста VD1-VD6. Обмотка управления служит для регулирования падения напряжения на дросселях. Расширение диапазона регулирования дросселей насыщения обеспечивается обмоткой смещения, включенной через сопротивление R1 на выход выпрямительного моста VD7-VD10, питающегося от трансформатора ТР2. Кольцевое включение демпферной обмотки 3Н-3К дросселей насыщения ДН1-ДН6 с обмоткой управления 1Н-3К магнитного усилителя УМ предотвращает автоколебания. Агрегат допускает регулировку выходного напряжения в пределах $+5\%$ и минус 10% путем изменения уставки с помощью резистора R3, находящегося в цепи автоматического регулирования.

На лицевую сторону крышки выведена рукоятка пакетного выключателя В1, с помощью которого агрегат включается и отключается, лампа Л - сигнализирующая о работе агрегата, измерительные приборы - амперметр А и вольтметр В - для контроля выходных параметров. На внутренней стороне установлена панель с предохранителями силовой цепи ПР1-ПР3 для защиты агрегата от внешних и внутренних коротких замыканий, пакетный выключатель В1 и предохранители цепи вольтметра ПР5-ПР6. Дополнительно (для качественной оценки влияния демпферного контура на качество работы агрегата) на лицевую сторону крышки выведен тумблер В3, размыкающий цепь кольцевого включения демпферной обмотки дросселей насыщения с обмоткой управления магнитного усилителя. На лицевую сторону крышки выведен дополнительно переключатель ПП₂, с помощью которого задается выходное стабилизированное напряжение.

Панель агрегата конструктивно объединяет все элементы и схемы автоматики и выпрямительный мост VD1-VD6 силовой схемы. Назначение этого узла - преобразование переменного тока в постоянный и изменение выпрямленного напряжения агрегата до нужных значений, автоматического поддержания его в заданных пределах ($\pm 2\%$).

Для стабилизации выпрямленного напряжения к выходным клеммам агрегата подключен мост сравнения R3, R4, R5, VD15-VD17, в диагональ которого включены обмотки управления 4Н-7К магнитного усилителя УМ. Стабилитрон VD17 служит для создания опорного напряжения. Стабилитроны VD15-VD16 включены встречно опорному и служат для температурной компенсации. С ростом температуры окружающей среды опорное напряжение на стабилитроне VD17 увеличивается, а на стабилитронах VD15-VD16, которые включены в прямом направлении, прямое падение напряжения уменьшается. Общее напряжение на стабилитронах VD15-VD17 остается неизменным. Конденсатор С5 предназначен для фильтрации протекающего через стабилитроны тока, а конденсатор С4 - для фильтрации тока управления дросселей насыщения ДН.

Работа системы автоматической стабилизации напряжения (рис. 1.1, рис. 1.2)

При номинальном выходном напряжении через обмотку 4Н-7К протекает ток управления, создаваемый разностью напряжения на участке резистора R5 (между концом обмотки 4Н и стабилитроном VD15) и на стабилитронах VD15-VD17. Если напряжение на выходе агрегата уменьшится (увеличился ток нагрузки, понизилось напряжение питающей сети), то уменьшится напряжение на резисторе R5, в том числе и на участке резистора R5 (между стабилитроном VD15 и концом 4Н-обмотки управления магнитного усилителя УМ). Так как напряжение на стабилитронах остается неизменным, то разность между напряжением на указанном участке резистора R5 и напряжением на стабилитронах увеличится. В связи с этим увеличится ток через обмотки управления 4Н-7К магнитного усилителя УМ. Рабочие обмотки магнитного усилителя А1-Х1, А2-Х2, В1-У1, В2-У2 совместно с диодами VD11-VD14 собраны по схеме с внутренней обратной связью. Увеличение тока управления ведет к уменьшению тока через рабочие обмотки УМ, то есть к уменьшению тока в обмотке управления дросселей насыщения. Следовательно, уменьшается индуктивное сопротивление дросселя насыщения и выходное напряжение увеличится, приняв первоначальное значение в пределах точности стабилизации. Аналогично, но в обратном порядке протекает процесс стабилизации выходного напряжения, при увеличении напряжения питающей сети или уменьшении нагрузки. Дополнительные сведения о работе МУ и дросселей насыщения см. прил.

Контрольно-измерительные приборы

Для контроля выходных параметров агрегата на его двери установлены вольтметр М145 и амперметр М145.

Для снятия кривой переходного процесса агрегата используется USB осциллограф.

Меры безопасности при работе с агрегатом

В процессе проведения лабораторной работы необходимо систематически контролировать заземление корпуса агрегата, нагрузочного устройства USB осциллографа. Использовать для заземления какие-либо проводники, не предназначенные для этих целей, запрещается. При настройке блоков автоматики следует обесточить агрегат.

При подключенном агрегате следует соблюдать максимальную осторожность – не касаться голыми руками любых деталей и токопроводящих частей агрегата.

В остальном руководствоваться правилами техники электробезопасности при проведении лабораторных работ в лабораторных кабинетах кафедры, института.

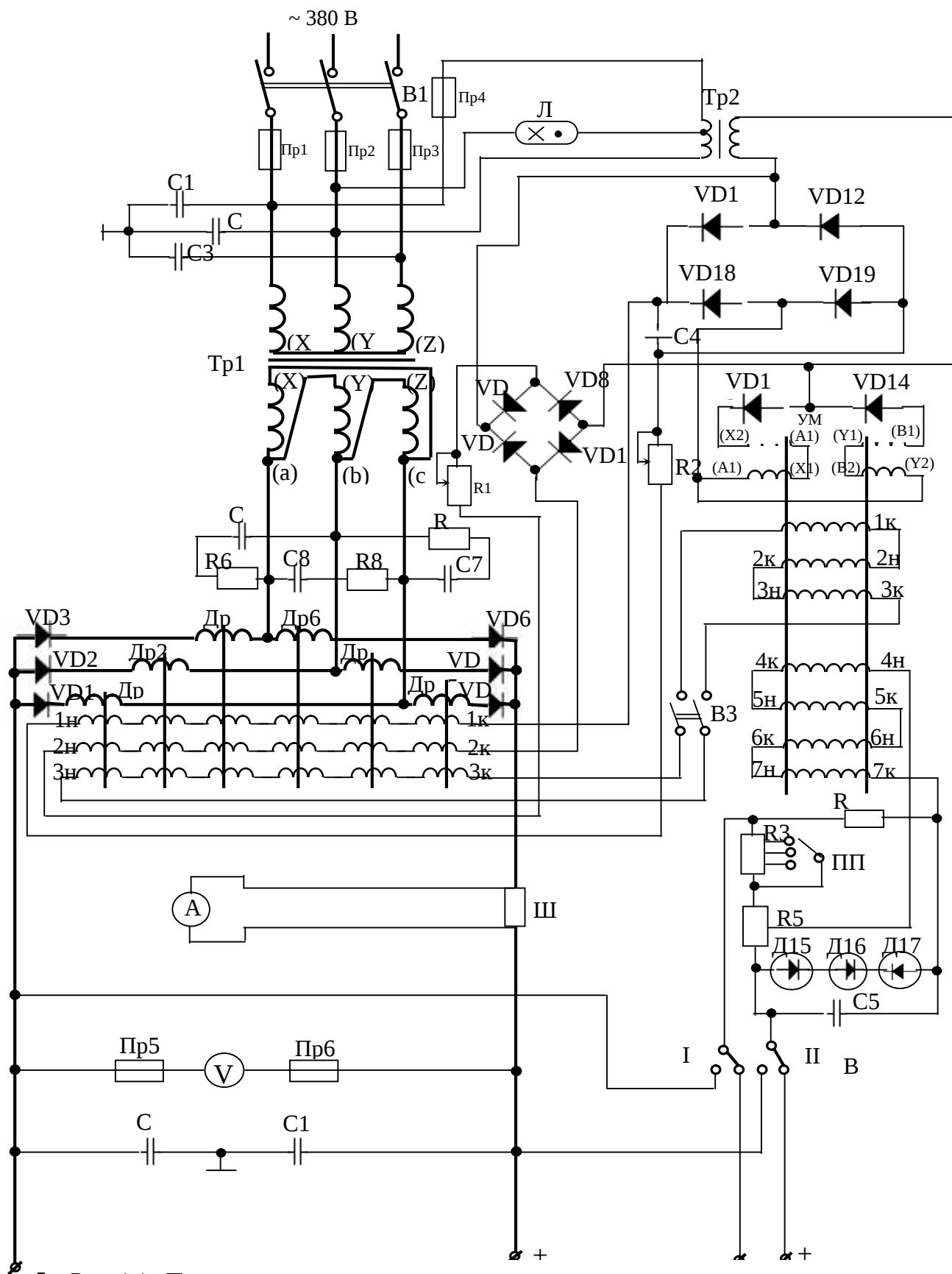


Рис. 1.1. Принципиальная электрическая схема выпрямительного агрегата ВАРС-2.75-115

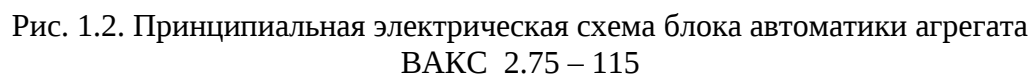


Рис. 1.2. Принципиальная электрическая схема блока автоматики агрегата
БАКС 2.75 – 115

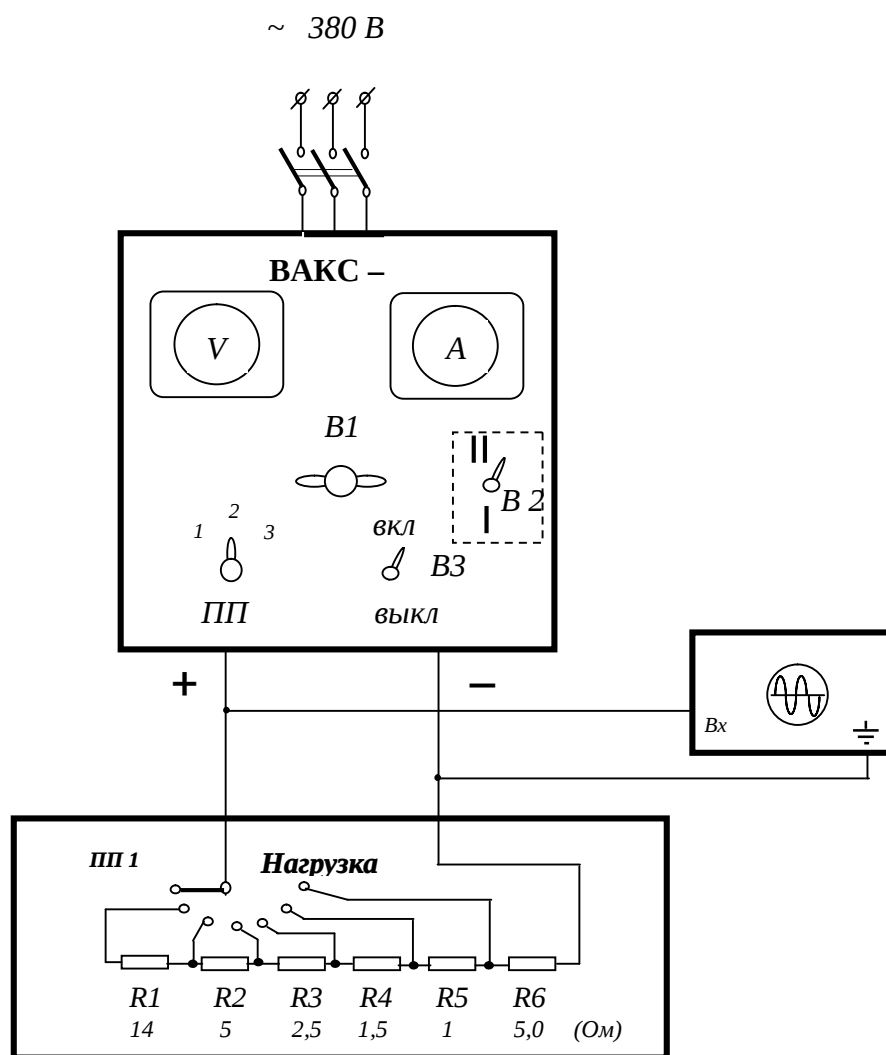


Рис. 1.3. Схема лабораторной установки

Магнитный усилитель как элемент САР

Магнитным усилителем (МУ) называется ферромагнитное устройство, предназначенное для усиления мощности подводимых к нему электрических сигналов постоянного тока. Основой любой схемы МУ являются дроссели с подмагничиванием, т.е. дроссели с одновременным намагничиванием материала сердечника постоянным и переменным магнитными полями.

Намагниченность материала характеризуется величиной индукции B , которая является функцией напряженности H внешнего магнитного поля.

Если полностью размагниченный материал поместить во внешнее поле, напряженность которого меняется от 0 до H_m , то величина магнитной индукции в сердечнике также будет меняться от 0 до B_m . При полном цикле изменения H от $+H_m$ до $-H_m$ и обратно изображающая точка опишет петлю, называемую **петлей гистерезиса**.

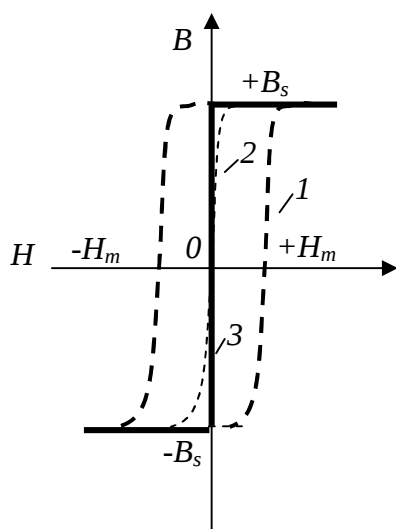


Рис. 1.4. Петля гистерезиса

Часто при анализе и расчетах МУ пренебрегают явлением гистерезиса и заменяют петлю так называемой средней кривой намагничивания, т.е. кривой, равноотстоящей от восходящей и нисходящей ветвей петли (рис.1.4, кр. 2).

Современные магнитные материалы имеют петлю гистерезиса, близкую к «прямоугольной» (рис.1.4, кривая 1), которая заменяется идеальной кривой намагничивания $B=f(H)$ (рис.1.4, кривая 3).

В процессе работы МУ к их обмоткам прикладываются напряжения, по виткам этих обмоток течет ток, а в сердечниках действует магнитное поле (B, H).

Согласно закону электромагнитной индукции $e = -w \frac{d\Phi}{dt}$ или

$e = -wS \frac{dB}{dt}$, где e - ЭДС в контуре обмотки; w - число витков обмотки; Φ - магнитный поток; S - сечение сердечника; B - магнитная индукция. Когда $e = E \sin \omega t$, то на основании приведенного выражения $B = -B_m \cos \omega t$. Если к тому же дроссель помещен в постоянное поле с индукцией B_0 , то $B = B_0 - B_m \cos \omega t$. Такая зависимость будет иметь место лишь при $B_m \leq B$.

Однотактные МУ. Однотактными называются МУ, у которых сигнал на выходе не меняет своей полярности или фазы при изменении полярности входного сигнала.

Однотактные МУ выполняются на двух сердечниках с двумя рабочими обмотками переменного тока W_p , с двумя или одной обмотками управления W_y (рис. 1.5). Необходимость в двух сердечниках и двух W_p вызвана стремлением скомпенсировать переменные ЭДС, индуцируемые в обмотке W_y из цепи переменного тока.

Если управляющий сигнал отсутствует, $U_y = 0$ и параметры W_p идентичны, то напряжение питания равномерно распределяется между обмотками:

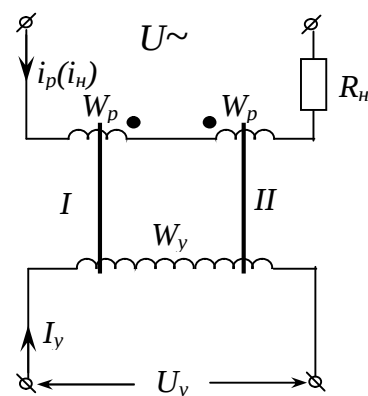


Рис. 1.5

$$u_{\sim} = e_I + e_{II}, \text{ где } e_I = -\omega_p S \frac{dB_I}{dt}; e_{II} = -\omega_p S \frac{dB_{II}}{dt};$$

B_I и B_{II} - мгновенные значения индукции в сердечниках I и II, причем $B_I = B_{II} = -B_m \cos \omega t$.

Предположим, что $U_y \neq 0$. Тогда ток I_y создает постоянное магнитное поле с индукцией $B_0 = B_y$, направление которого относительно B_I и B_{II} в сердечниках различно. В соответствии с этим кривые суммарной индукции в сердечниках $B = B_{\sim} + B_y$ окажутся сдвинутыми одна относительно другой на величину $2 B_y$ (рис. 1.6, б).

Если величина тока B_y достаточно велика, закон изменения B станет отличным от косинусоидального. До момента насыщения одного из сердечников индукция и в первом и во втором сердечнике изменяется по закону косинуса, но, как только один из сердечников насытится, ЭДС самоиндукции его обмоток W_p и W_y станет равной нулю ($B_I = B_s = \text{const}$). Обмотка W_y является общей для обоих сердечников, и, следовательно, условие насыщения ($B = \text{const}$, $e_y = 0$) будет выполняться только в том случае, если индукция и во втором сердечнике также примет некоторое постоянное значение ($B_{II} = \text{const}$), в общем случае отличное от B_s . Это состояние сердечников сохраняется до тех пор, пока первый сердечник не перейдет в ненасыщенное состояние и его индукция не начнет уменьшаться.

Так как процессы в сердечниках сдвинуты один относительно другого на половину периода, индукция во втором сердечнике в этот же момент начнет увеличиваться, стремясь к $-B_s$, и процесс полностью повторяется с той лишь разницей, что насыщенным в этом полупериоде окажется второй сердечник. Момент насыщения сердечников характеризуется величиной угла насыщения $\alpha_{\text{нас}}$.

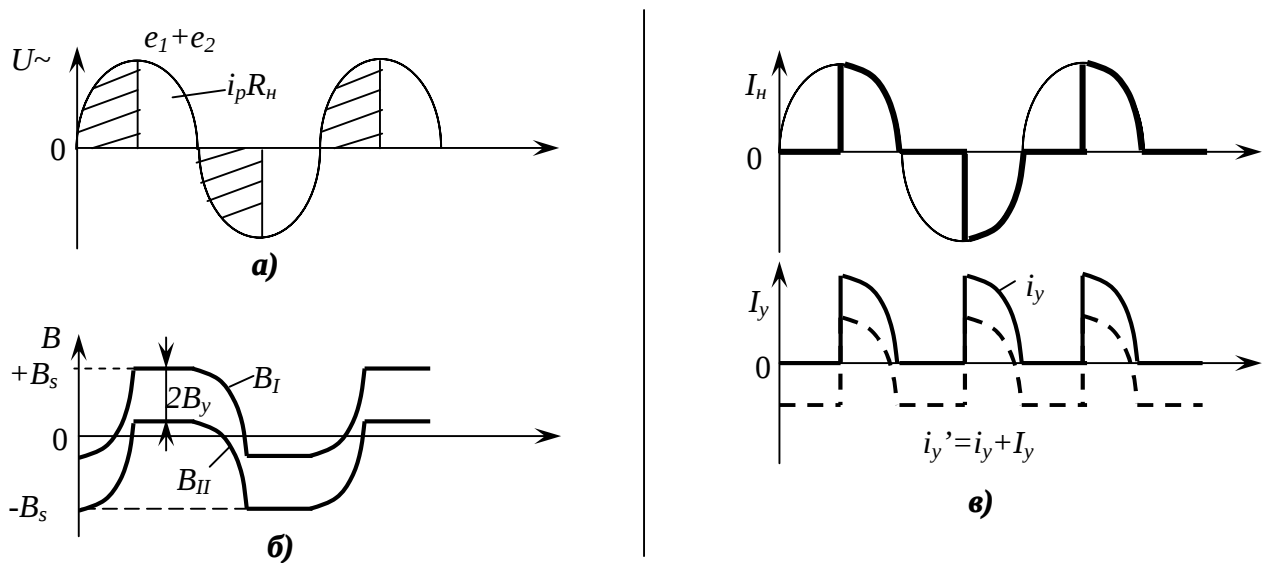


Рис. 1.6

В интервале, когда оба сердечника ненасыщены ($0 < \omega t < \alpha_{нас}$), ЭДС самоиндукции рабочих обмоток одинаковы и равны половине напряжения $u \sim$. Все напряжение питания оказывается приложенным к рабочим обмоткам, а падение напряжения $i_p R_n$ равно нулю, т. е. равен нулю рабочий ток МУ.

В интервале $\alpha_{нас} \leq \omega t \leq \pi$, когда один из сердечников насыщен, ЭДС самоиндукции рабочих обмоток равны нулю, все напряжение питания оказывается приложенным к нагрузке и по рабочей цепи течет ток

$$I_{cp} = \frac{U_m}{R_n} \sin \omega t.$$

Среднее значение тока за половину периода определяют по формуле

$$I_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{нас}}^{\pi} i d(\omega t) = \frac{U_m}{\pi R_n} (1 + \cos \alpha_{нас}). \quad (1.1)$$

Величина $\alpha_{нас}$, а следовательно и ток I_{cp} зависят от величины сигнала управления. Так, при $U_y = 0$; $B_y = 0$ насыщение сердечников отсутствует ($\alpha_{нас} = \pi$) и напряжение питания в течение всего периода компенсируется ЭДС самоиндукции обмоток. Ток в нагрузке равен нулю. Напротив, при максимальном сигнале $B_y = B_s$ сердечники насыщены в течение всего периода ($\alpha_{нас} = 0$) и ток в нагрузке будет максимальным и синусоидальным.

Ток управления можно представить в виде постоянной I_y и переменной i_y составляющих. Постоянная составляющая пропорциональна сигналу управления и зависит от сопротивления цепи управления. Переменная составляющая трансформируется из рабочей цепи. Форму составляющей можно установить на основании следующих рассуждений. Когда один сер-

дечник насыщен, а второй нет, суммарная МДС ненасыщенного сердечника должна быть равной нулю.

Это (при $i_p \neq 0$) может иметь место лишь в том случае, если обмотка управления создает МДС $i_y \omega_y$, равную по величине МДС $i_p \omega_p$ рабочей обмотки и направленную ей навстречу.

Равенство МДС для средних за период значений токов I_p и I_y получило название **закона равенства магнитодвижущих сил**:

$$I_p \omega_p = I_y \omega_y.$$

Этот закон справедлив, когда при насыщении одного сердечника второй остается ненасыщенным, т. е. при $0 < \alpha_{нас} \leq \pi$.

Когда $\alpha_{нас} = 0$ и оба сердечника насыщены в течение всего периода, закон теряет силу. Отсюда следует, что непрерывное увеличение тока управления не может вызвать непрерывного увеличения рабочего тока. При некотором I_y угол насыщения становится равным нулю, рабочий ток достигает своего максимального значения и при дальнейшем увеличении сигнала остается неизменным.

Из аналитического выражения закона равенства МДС можно получить уравнение рабочего участка статической характеристики (рис. 1.7, кривая а)

идеального МУ: $I_p = \frac{w_y}{w_z} I_y$.

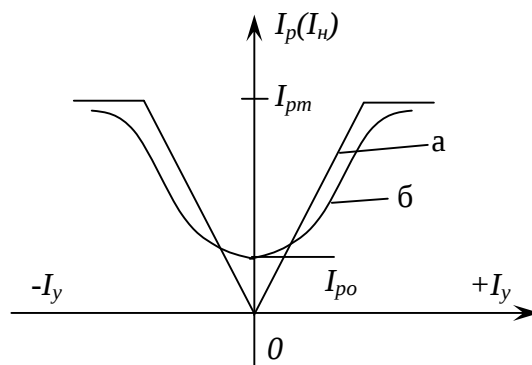


Рис. 1.7

Сердечники реальных МУ имеют кривые намагничивания, отличающиеся от идеальной конечной крутизны ненасыщенных участков и плавными очертаниями. Эти свойства сердечников существенно влияют на статическую характеристику МУ.

Во-первых, она становится криволинейной, с плавными очертаниями, и, во-вторых, рабочий ток при $I_y = 0$ имеет конечное значение, равное величине тока намагничивания (рис.1.7, кривая б).

Статические свойства МУ характеризуются следующими величинами: коэффициентом кратности $K = I_{pm} / I_0$; коэффициентами усиления по току $K_i = dI_p / dI_y$, напряжению $K_u = dU_n / dU_y$ и мощности $K_p = dP_m / dP_y$.

В тех случаях, когда $I_{pm} \geq I_0$, для определения K_i ; K_u и K_p можно пользоваться идеальной характеристикой и тогда

$$K_i = \frac{I_p}{I_y} = \frac{w_y}{w_p}; K_u = \frac{U_n}{U_y} = \frac{I_p R_n}{I_y R_y} = K_i \frac{R_n}{R_y}; K_p = \frac{P_n}{P_y} = \frac{I_p^2 R_n}{I_y^2 R_y} = K_i^2 \frac{R_n}{R_y} = K_i K_u. \quad (1.2)$$

Рассмотренные одноконтурные МУ, как это видно из статических характеристик, не реагируют на изменение полярности управляющего сигнала.

Одноконтурный МУ можно сделать чувствительным к знаку сигнала, введя начальное смещение специальной обмоткой смещения $W_{см}$ (рис. 1.8, а). Эта обмотка получает питание от независимого источника постоянного напряжения $U_{см}$. Поле, создаваемое этой обмоткой, накладывается на поле обмотки управления, и их сумма определяет полное подмагничивающее поле МУ. Теперь при $I_y = 0$ ток в нагрузке не равен току холостого хода, а определяется величиной МДС смещения. В зависимости от полярности сигнала ток в нагрузке будет увеличиваться или уменьшаться относительно начального значения. Он будет увеличиваться при совпадении полей и уменьшаться в обратном случае (рис. 1.8, б).

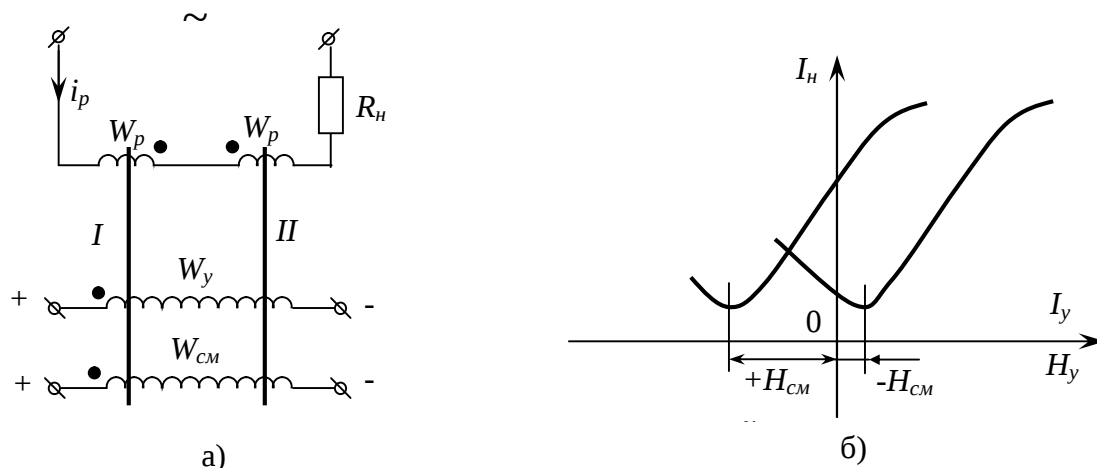


Рис. 1.8

Магнитные усилители с обратной связью. В схемах МУ широко применяется магнитная обратная связь (ОС), при которой взаимодействие между выходом МУ и его входом обеспечивается сложением МДС, пропорционально входному и выходному сигналам. При наличии ОС сердечники МУ подмагничиваются суммарным полем с напряженностью $H_{\Sigma} = H_y \pm H_{ос}$, где плюс соответствует положительной, а минус отрицательной ОС. Различают два вида магнитной ОС: внешнюю и внутреннюю. Внешняя ОС осуществляется введением специальной обмотки обратной связи $W_{ос}$, которая питается выпрямленным током нагрузки. Внутренняя ОС создается включением в рабочую цепь вентиля. При этом по рабочим обмоткам течет выпрямленный однополупериодный ток, постоянная составляющая которого и создает необходимую $H_{ос}$.

Схема одноконтурного МУ с внешней ОС по току нагрузки показана на рисунке 1.9, а. По цепи обмотки $W_{ос}$ протекает ток $I_{ос}$, среднее значение которого равно среднему значению тока I_n . По принципу действия этот МУ отличается от описанного ранее одноконтурного магнитного усилителя.

Разница в том, что здесь подмагничивающее поле создается совместным действием W_y и W_{oc} , т.е. $H_{\Sigma} = H_y + H_{oc}$. Закон равенства МДС в данном случае имеет вид $I_p \omega_p = I_y \omega_y + I_{oc} \omega_{oc}$. Так как обмотка W_{oc} включена в цепь нагрузки последовательно, то $I_{oc} = I_p$, тогда

$$I_p = I_y \frac{W_y}{W_p} + I_p \frac{W_{oc}}{W_p}, \quad (1.3)$$

Обозначив коэффициент обратной связи $K_{oc} = \frac{W_{oc}}{W_p}$ и коэффициент усиления по току МУ без ОС $K_i = \frac{W_y}{W_p}$, получим аналитическое выражение статической характеристики (рис. 1.9, б)

$$I_p = \frac{K_i}{1 - K_{oc}} I_y \text{ или } I_p = K'_i I_y. \quad (1.4)$$

Введение положительной ОС увеличивает коэффициент усиления по току и напряжению в $(1 - K_{oc})$ раз, по мощности в $(1 - K_{oc})^2$ раз.

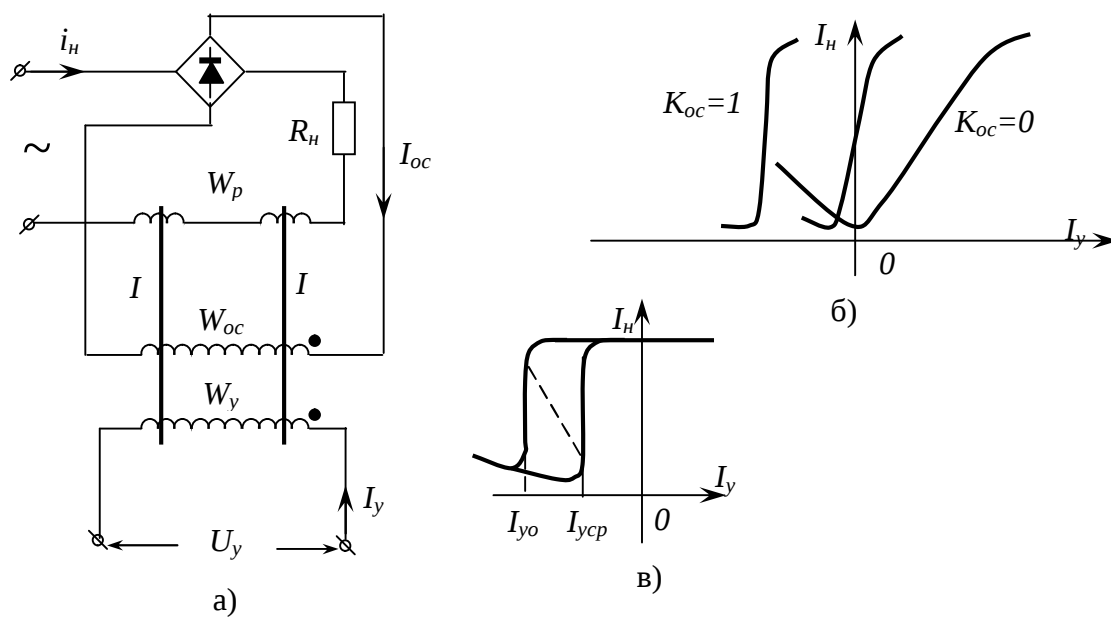


Рис. 1.9. Однотактный МУ с внешней ОС;
а - принципиальная схема; б и в – статические характеристики

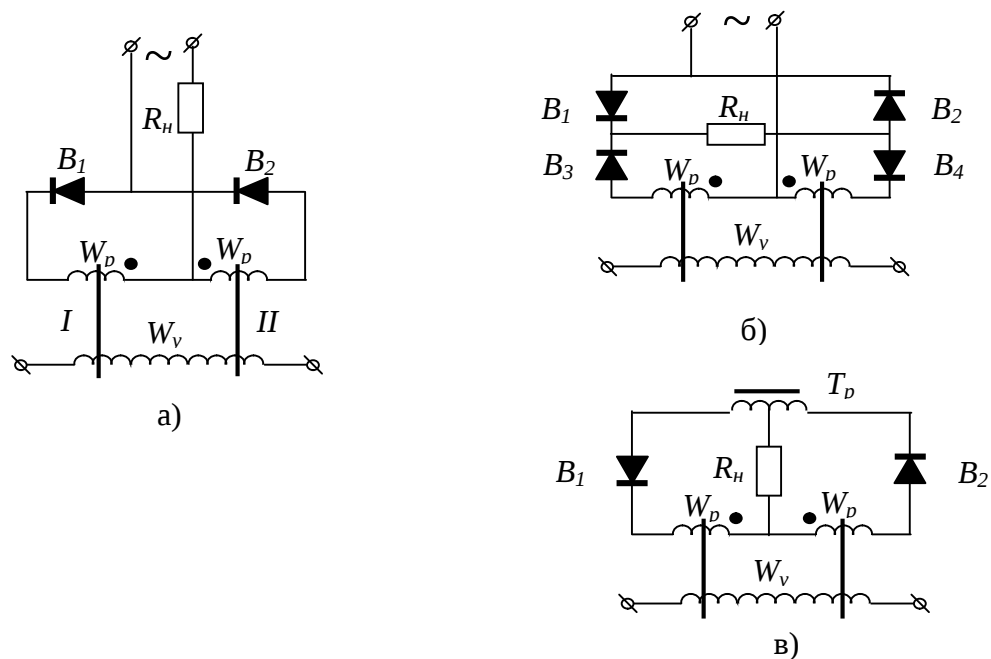


Рис. 1.10. Схемы одноктных МУ с внутренней ОС:
а – с выходом на переменном токе; б, в – с выходом на постоянном токе

С увеличением K_{oc} коэффициенты усиления растут. При $K_{oc} = 1$ $K'_i = K'_u = \infty$. Статическая характеристика имеет вертикальный участок. Если $K_{oc} > 1$, статическая характеристика содержит участок с отрицательным наклоном (рис. 1.9, а), а МУ переходит в релейный режим. С ростом K_{oc} статическая характеристика смещается влево. Это объясняется тем, что начальный ток I_0 , протекая по виткам W_{oc} , создает начальное подмагничивание, смещающее характеристику.

При $K_{oc} \cong 1$ увеличивается нестабильность МУ и чувствительность к колебаниям напряжения и температуры. Исходя из этого, величину K_{oc} обычно выбирают в пределах 0,95...0,97. На рис. 1.10 приведены схемы простейших одноктных **МУ с внутренней обратной связью**. Вентили в рабочих цепях МУ включены так, что напряжение питания в каждый полупериод оказывается приложенным к одной из обмоток W_p . По каждой обмотке течет однополупериодный выпрямленный ток, МДС от постоянной составляющей которого и создает эффект положительной ОС. МУ с внутренней ОС называют также усилителями с самонасыщением. Это название связано с тем, что постоянное поле, созданное рабочим током, стремится насытить сердечники МУ даже при отсутствии управляющего сигнала. Состояние насыщения при этом наступает уже через один или несколько полупериодов после подачи питания. В этом смысле внутреннюю ОС можно рассматривать как положительную. Из этого следует, что управление МУ с внутренней ОС возможно лишь сигналами, выводящими

сердечники из состояния самонасыщения, т. е. отрицательными по отношению к постоянной составляющей поля рабочих обмоток.

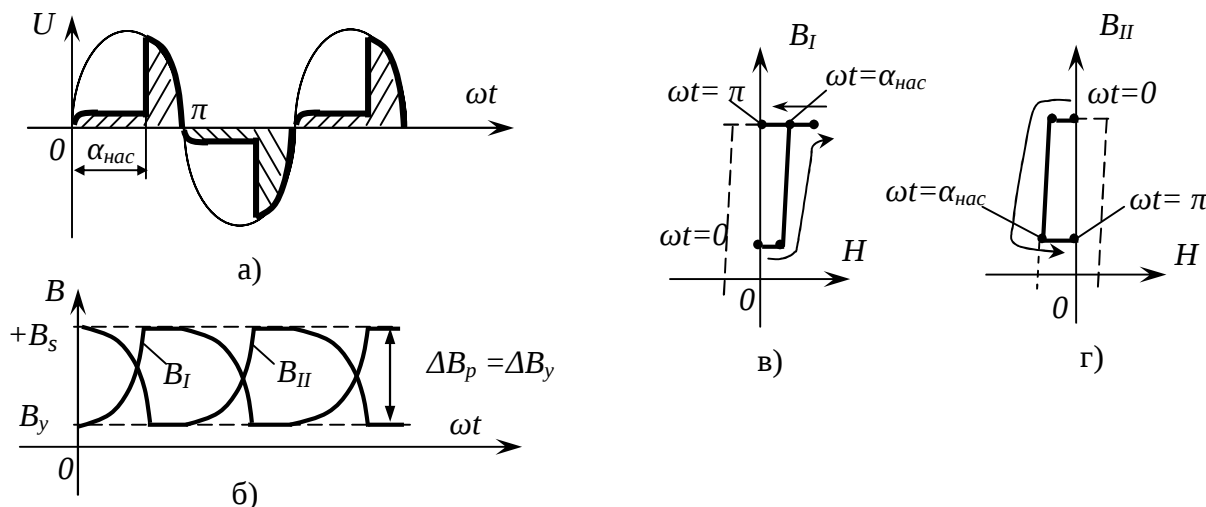


Рис. 1.11. Кривые переменных величин однопериодного МУ с внутренней ОС:

а – напряжения; б, в, г – индукции

В положительный полупериод напряжения питания, когда соответствующие вентили (вентиль) открыты, процессы в дросселе целиком определяются МДС, создаваемой рабочей обмоткой. Поэтому положительный полупериод называется рабочим. В следующий, отрицательный для данных W_p и B , полупериод магнитное состояние сердечника и процессы в дросселе определяются лишь МДС обмотки W_y . Этот полупериод называется управляющим.

Очевидно, что при поданном питании каждый полупериод для одного сердечника будет рабочим, а для другого управляющим. В следующем полупериоде они как бы меняются местами. Процессы в сердечниках оказываются сдвинутыми на половину периода.

Работу усилителя с внутренней ОС рассмотрим на примере схемы, изображенной на рис. 1.10, а. Допустим, что первый положительный полупериод напряжения питания является рабочим для сердечника I и управляющим для сердечника II.

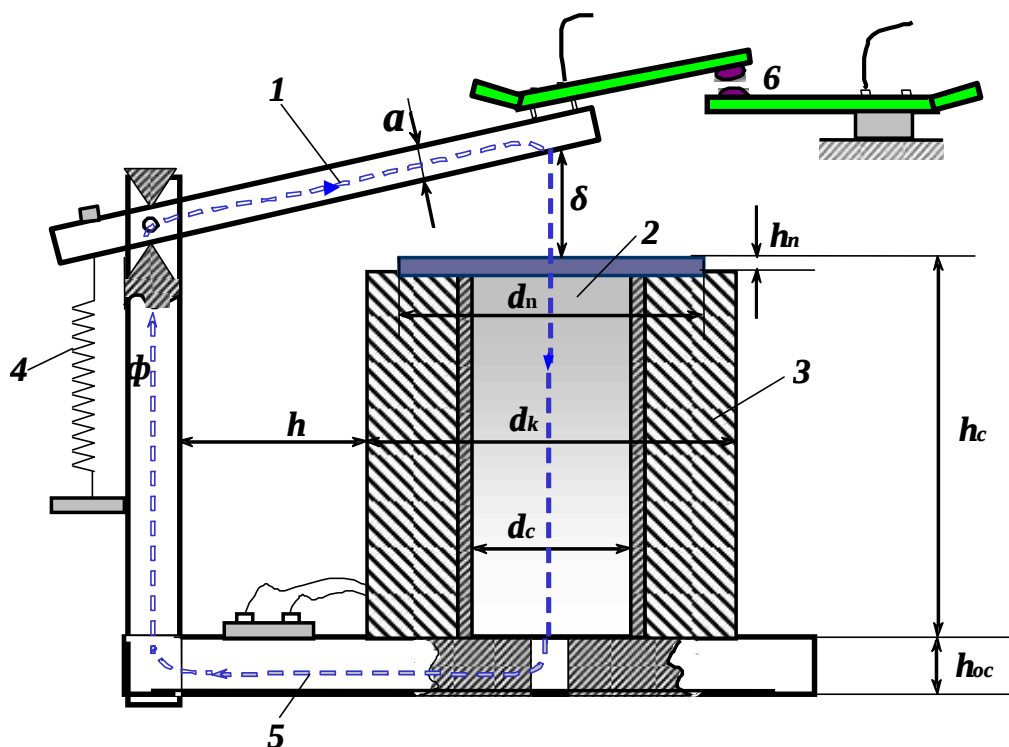
Под влиянием приложенного напряжения (рис. 1.11, а) индукция в насыщающемся сердечнике I будет изменяться по закону $B_I = B_y + B_m(1 - \cos \alpha_{нас})$, где B_y – начальный уровень индукции, достигнутый в сердечнике в предыдущем управляющем полупериоде.

Этот же полупериод для сердечника II является управляющим. Индукция в нем будет уменьшаться от $+B_s$ до B_y по закону $B_{II} = B_s - B_m(1 - \cos \alpha_{нас})$ (рис. 1.11, б). Приращение индукции в первом (ΔB_p) и во втором сердечнике (ΔB_y) в установившемся режиме будет равно, т. е. $|\Delta B_p| = |\Delta B_y|$, и к моменту насыщения первого из них ($\omega t = \cos \alpha_{нас}$) индукция во втором сер-

дечнике достигает значения B_y . В оставшуюся часть полупериода ($\alpha_{нас} \leq \omega t \leq \pi$) ЭДС самоиндукции рабочей обмотки будет равна нулю, и все напряжение питания окажется приложенным к сопротивлению нагрузки. По обмотке W_{p1} и R_n течет ток i_n . В момент $\omega t = \pi$ напряжение питания изменяет свой знак, сердечники как бы меняются местами, и процесс повторяется. Величина $K_{ос}$ МУ с самонасыщением примерно равна единице.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

Тема: Снятие тяговой характеристики электромагнита постоянного тока



Время: 4 часа.

Место проведения: помещение 156.

Цель:

1. Снять и построить семейство нагрузочных характеристик электромагнита постоянного тока.
2. Используя нагрузочные характеристики построить тяговые характеристики электромагнита постоянного тока.

План

1. Вводная часть – 10 мин.
2. Основная часть – 60 мин:
 - а) подготовить к работе электромагнитную установку – 10 мин;
 - б) ознакомиться с назначением и техническими характеристиками лабораторной установки – 20 мин;
 - в) изучить устройство, принцип работы агрегата и его элементов – 20 мин;
 - г) снять нагрузочные характеристики электромагнита постоянного тока и построить тяговые характеристики – 60 мин;
 - д) оформить работу – 40 мин;
 - е) защитить работу – 10 мин.
3. Заключительная часть – 10 мин.

В результате проведения лабораторного занятия студенты должны ЗНАТЬ:

1. Назначение и технические характеристики лабораторной установки.
2. Устройство и работа составных частей лабораторной установки.
3. Устройство и работу лабораторной установки.
4. Контрольно-измерительные приборы, используемые для снятия характеристик электромагнита.
5. Порядок работы, измерения параметров, регулирование и настройка.
6. Указание мер по электробезопасности.

УМЕТЬ:

1. Строить тяговые характеристики электромагнита.
2. Получать экспериментальные нагрузочные характеристики электромагнита.
3. Оценивать качественные показатели характеристик электромагнита.

Литература

1. Агрегат выпрямительный типа ВАКС-2.75-115. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2ПС.932.033 ТО.
2. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. - М.: Машиностроение, 1973.
3. Техническая кибернетика, устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. - В 3-х кн. / Под ред. В.В. Солодовникова. - М.: Машиностроение, 1973. - Кн. 1; 1975. - Кн. 2; 1976. - Кн. 3.
4. Справочник по корабельной автоматике / Ю.К. Баленко, П.И. Бухтияров и [др.] - М.: Воениздат, 1974.
5. Электрические аппараты : учебник и практикум для академического бакалавриата / Под ред. П.А. Курбатова. - М.: Издательство Юрайт, 2018. - 250 с. - (Серия: Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-9715-6.

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАНЯТИЯ № 2

I. Программа выполнения работы:

1. Изучить используемую аппаратуру, оборудование, схему и принцип работы установки.
2. Снять и построить семейство нагрузочных характеристик электромагнита постоянного тока.
3. Используя нагрузочные характеристики построить тяговые характеристики электромагнита постоянного тока.

II. Порядок выполнения работы.

1. Собрать лабораторную установку (рис. 2.1) и предъявить ее преподавателю.
2. В обесточенном состоянии электромагнита с помощью винта **1** установить по шкале **2** величину зазора d_n (начальное значение величины зазора), равное 5° .
3. Груз **m** на якоре электромагнита **3** установить в первое положение. С помощью регулятора напряжения медленно повышать напряжение на катушке электромагнита ЭМ и, как только якорь электромагнита притянется к сердечнику, снять показания вольтметра **V** и длину плеча ℓ .
4. Снять питание с катушки электромагнита и переместить груз **m** в следующее положение, увеличив плечо ℓ на $\Delta\ell$. Медленно повышая напряжение на катушке электромагнита ЭМ, добиться срабатывания электромагнита и снять те же показания, что и в п.4. Опыт повторить с тем же самым грузом **m**, увеличивая плечо ℓ на всю длину плеча **3** (снять 6 точек), не изменяя величину зазора.

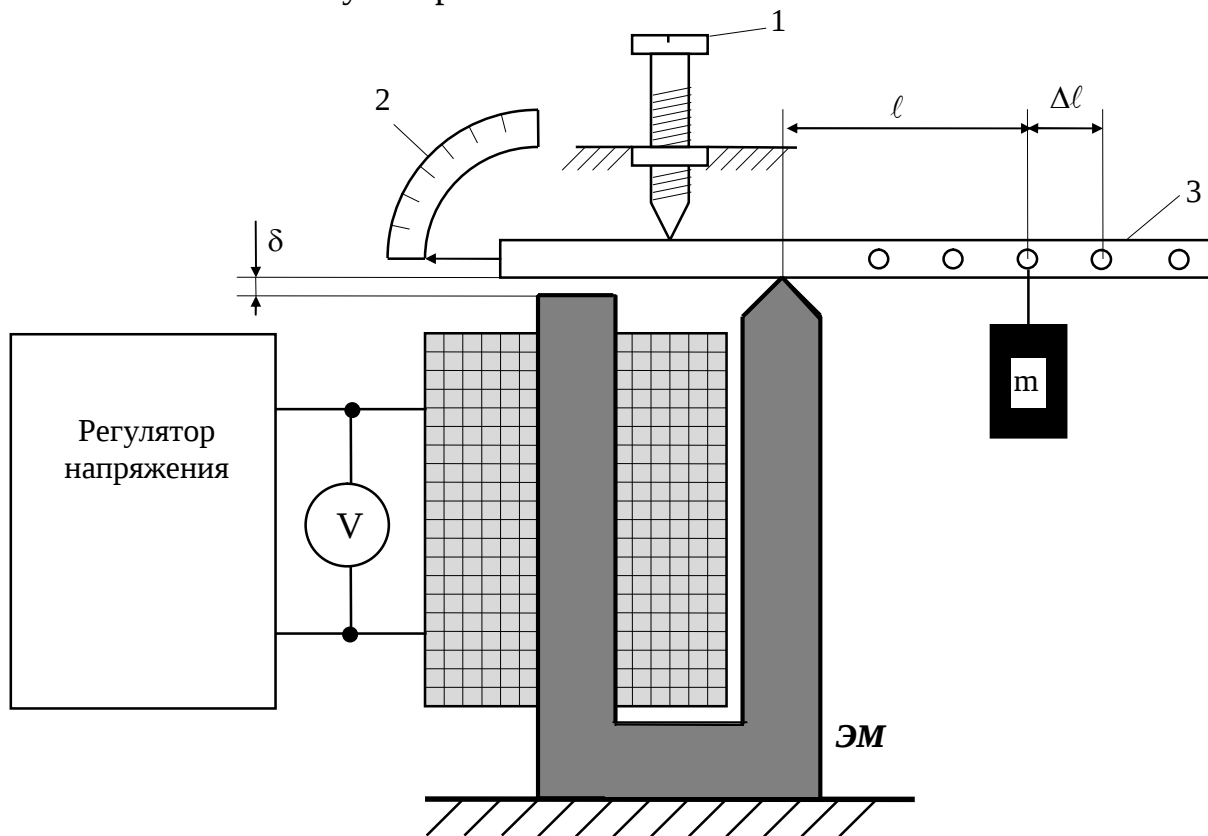


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки

5. Аналогично снять показания для величин воздушного зазора, соответствующих $d = 7^\circ$, $d = 10^\circ$ и $d = 15^\circ$.
6. Произвести расчёт тяговых усилий при различных d и U для заданного **m**, исходя из выражения

$$P = m \cdot g \cdot \ell,$$

где ℓ - величина плеча, выраженная в метрах;

m - масса груза, выраженная в килограммах.

7. Результаты измерений и расчётов свести в табл. 2.1:

Т а б л и ц а 2.1

№ п/п	ℓ	m	U				P
			при $d = 5^\circ$	при $d = 7^\circ$	при $d = 10^\circ$	при $d = 15^\circ$	
			B	B	B	B	
1							
2							
3							
4							
5							
6							

8. По результатам измерений и расчётов построить зависимости $P = f(U)$ при $d = \text{const}$ и через зависимости $P = f(U)$ построить статические тяговые характеристики $P = f(d)$ при $U = \text{const}$ и равном, соответственно, 40 В, 60 В, и 100 В для заданного значения массы груза m .

Для построения статических тяговых характеристик $P = f(d)$ необходимо:

- по результатам измерений и расчётов построить нагрузочные характеристики $P = f(U)$ для различных углов d (левый квадрант рис. 2.2);

- для напряжений $U = 40, 60$ и 100 В (по указанию преподавателя могут быть заданы другие величины напряжений) провести прямые, параллельные оси ординат до пересечения с характеристиками $P = f(U)$ при $d = \text{const}$;

- из точек пересечения провести прямые, параллельные оси абсцисс, до пересечения с линиями, соответствующими заданным значениям d в правом квадранте рис. 2.2;

- по полученным точкам пересечения построить статические тяговые характеристики $P = f(d)$ для напряжений $U = 40, 60$ и 100 В (или выбранные вами).

Вид вышеуказанных зависимостей представлен на рис. 2.2.

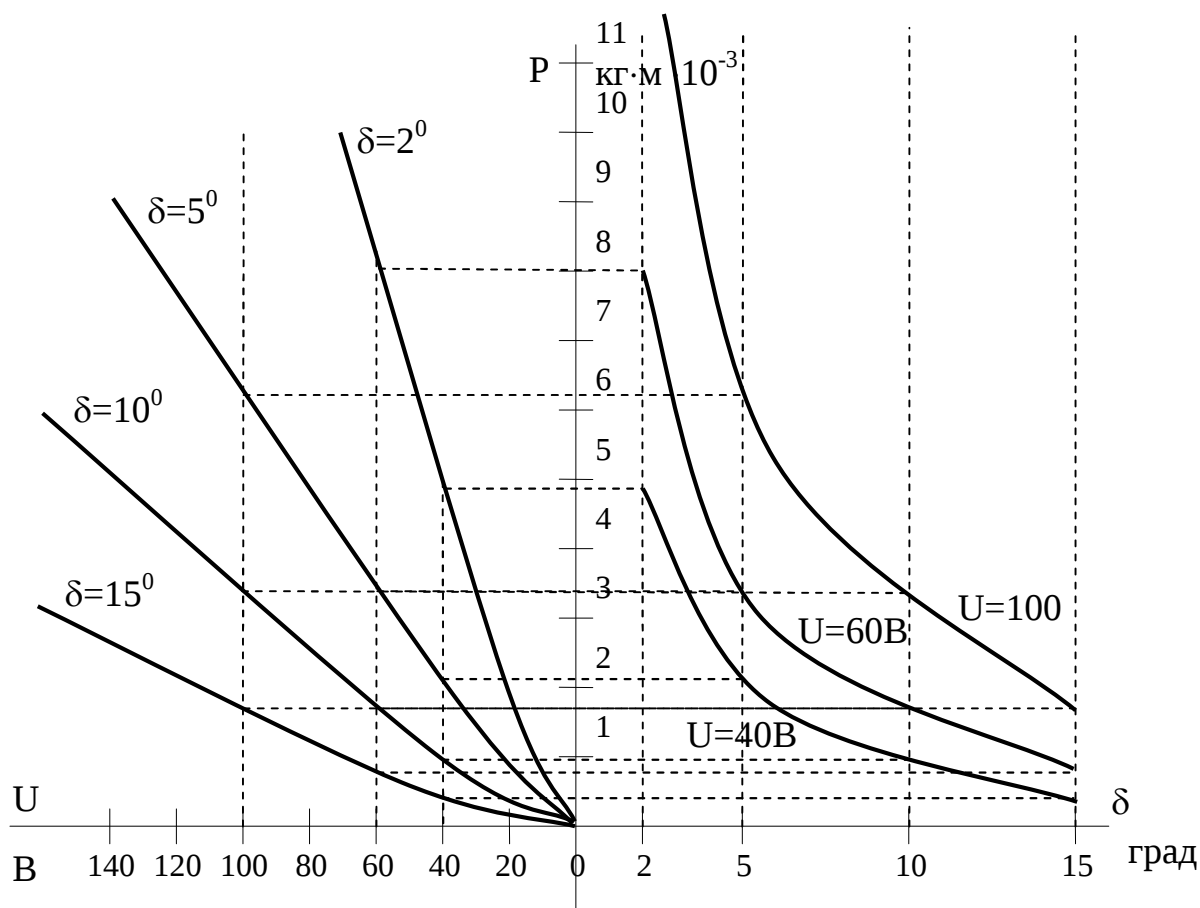


Рис. 2.2. Тяговые характеристики электромагнита постоянного тока

III. Содержание и оформление отчета:

Отчет должен содержать:

- схему лабораторной установки;
- таблицу с результатами измерений и расчетов (табл. 2.1);
- семейство нагрузочных и тяговых характеристик;
- выводы о полученных тяговых характеристиках.

Контрольные вопросы

1. Устройство электромагнита постоянного тока.
2. Что собой представляет регулятор напряжения в лабораторной установке?
3. Что такое нагрузочная характеристика электромагнита?
4. Что такое статическая тяговая характеристика электромагнита?
5. Как влияет величина воздушного зазора на тяговое усилие электромагнита постоянного тока?
6. Как влияет величина тока в катушке на тяговое усилие электромагнита постоянного тока?
7. Как влияет величина МДС на тяговое усилие электромагнита постоянного тока?

8. Назовите основные элементы электромагнит постоянного тока.
9. Порядок построения нагрузочной характеристики электромагнита.
10. Как определяется тяговая характеристика электромагнита постоянного тока?
11. Как определяется тяговая характеристика электромагнита переменного тока?

При неизменном значении величины начального воздушного зазора и увеличении противодействующего усилия для срабатывания электромагнита постоянного тока необходимо увеличивать напряжение на катушке, а, следовательно, ток в катушке и намагничивающую силу электромагнита.

При изменяющейся величине воздушного зазора и неизменном напряжении тяговое усилие электромагнита с уменьшением величины зазора возрастает.

С увеличением приложенного к катушке напряжения тяговое усилие возрастает из-за увеличения намагничивающей силы катушки.

IV. Организационно-методические указания по проведению занятия

4.1. Перед выполнением лабораторной работы студент обязан проработать материал, выносимый на самостоятельную подготовку. Приготовить бланк отчёта по лабораторной работе, где должно быть указано:

- Ф.И.О. студента и номер класса;
- нарисован рис. 2.1 и описана лабораторная установка;
- расчерчена таблица измерений и вычислений для случаев увеличения и уменьшения воздушного зазора и питающего напряжения.

4.2. Перед проведением лабораторной работы преподавателем проверяются знания и наличие подготовленных бланков для проведения лабораторной работы. Студенты, не подготовившиеся к проведению лабораторной работы, к занятию не допускаются.

4.3. Учебная группа делится на несколько подгрупп и приступает к выполнению лабораторной работы под руководством преподавателя и инженерно-технического состава лаборатории.

4.4. После выполнения работы, студенты оформляют бланк отчёта и сдают его преподавателю на проверку.

4.5. Во время, отведённое на самостоятельное изучение дисциплины «Электрические аппараты» в часы консультаций преподавателя, уметь ответить на контрольные вопросы, изложенные ниже.

4.6. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы, во время, отведённое на выполнение лабораторной работы - самостоятельно занимаются подготовкой к работе в помещении лаборатории. Выполнение лабораторной работы производится в дополнительное время, указанное преподавателем.

4.7. Студенты, допущенные к выполнению лабораторной работы, но не выполнившие её по техническим причинам, выполняют экспериментальную часть работы под руководством инженерного состава лаборатории в указанное время.

Литература

1. Электрические аппараты: учебник и практикум для академического бакалавриата / Под ред. П.А. Курбатова. - М.: Издательство Юрайт, 2018. - 250 с. - ISBN 978-5-9916-9715-6.

2. Родштейн Л.А. Электрические аппараты: учебник для техникумов. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 304 с.

3. Яшутин В.М., Анисимов О.Ю. Электрические аппараты: учеб. пособие. - Севастополь: СИЯЭиП, 2000.

4. Яшутин В.М. Электрические аппараты: альбом рисунков к учебному пособию. - Севастополь: СИЯЭиП, 1997.

ПРИЛОЖЕНИЕ
к лабораторному занятию № 2
для самостоятельной проработки студентом

Электромагниты и электромагнитное реле

Электромагниты широко применяются в таких электрических аппаратах, как контакторы, пускатели, автоматы, электромагнитные муфты и т.д.

Электромагнитное реле представляет собой устройство, предназначенное для замыкания и размыкания контактов электрических цепей. При этом часто входной сигнал, управляющий работой реле, имеет малую мощность, а замыкаемая электромагнитным реле электрическая цепь питается источником значительно большей мощности. В таких случаях реле играет роль усилителя мощности. Простейшее электромагнитное реле представлено на рис. 2.3.

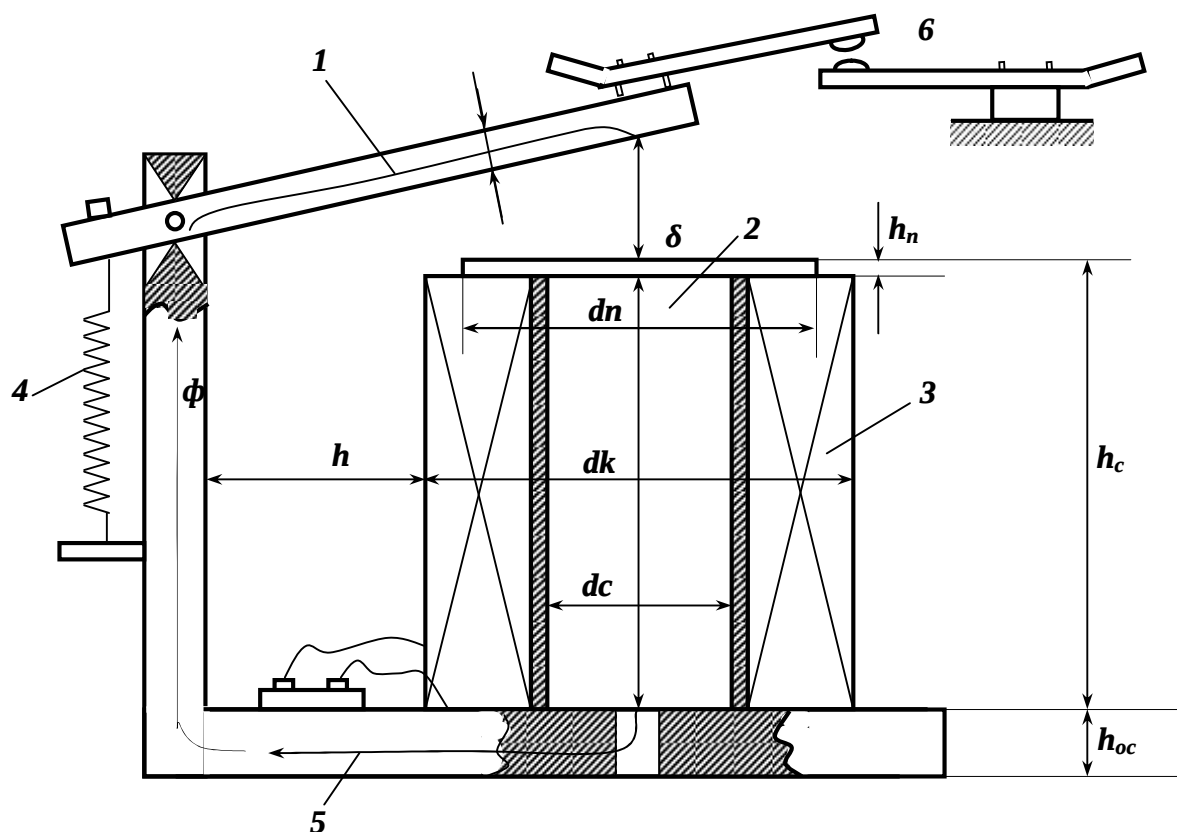


Рис. 2.3. Электромагнитное реле

На рис. 2.3 указаны основные элементы электромагнитного реле: 1 - якоря электромагнитного реле; 2 - сердечник магнитопровода; 3 - катушка электромагнита; 4 - противодействующая пружина перемещения якоря электромагнита; 5 - магнитопровод; 6 - контактная группа электромагнита.

Общие сведения о магнитных цепях

Магнитной цепью называют совокупность деталей, в том числе и воздушных зазоров через которые замыкается магнитный поток. Магнитная цепь (рис. 2.4, а) состоит из магнитопровода с подвижной **1** и неподвижной **3** частями, источника магнитодвижущей силы (МДС) - катушки **2** и воздушных зазоров δ . При замкнутых магнитопроводах воздушный зазор может отсутствовать (рис. 2.4, б).

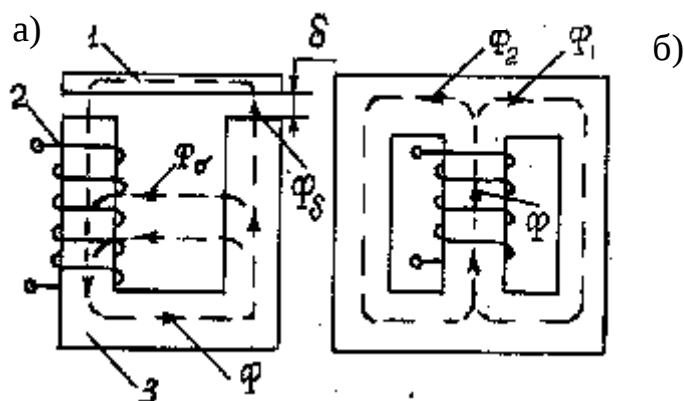


Рис. 2.4. Магнитная цепь электромагнита:
а) неразветвленная; б) разветвленная

Магнитные цепи бывают *неразветвленные*, когда магнитный поток замыкается последовательно по всем участкам магнитопровода (рис. 2.4, а), и *разветвленные*, когда магнитный поток замыкается по нескольким параллельным магнитопроводам (рис. 2.4, б).

При прохождении тока по намагничивающей катушке **2** создается МДС, под действием которой создается магнитный поток Φ . Часть магнитного потока, замыкающаяся через меняющийся при перемещении якоря **1** воздушный зазор, называется рабочим магнитным потоком Φ_δ . Все остальные потоки в магнитной цепи, замыкающиеся через другие пути, называются потоками рассеяния Φ_σ . Следует отметить, что $\Phi_\delta = (0,85 - 0,95) \Phi$.

Магнитная цепь состоит из участков ферромагнитных материалов и воздушных зазоров. Каждый из участков оказывает некоторое сопротивление прохождению магнитного потока.

Сопротивление участка ферромагнитного материала:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}, \quad (2.1)$$

где l - длина участка;

S - сечение участка магнитопровода;

μ - магнитная проницаемость.

Соппротивление воздушного зазора

$$R_d = \frac{d}{m_0 \cdot S_d}. \quad (2.2)$$

Аналогично закону Ома для электрической цепи, можно записать закон Ома для магнитной цепи: общий магнитный поток Φ равен МДС F , умноженную на магнитную проводимость всей цепи, т.е.

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{F}{\frac{l_1}{m_1 S_{m1}} + \frac{l_2}{m_2 S_{m2}} + \dots + \frac{l_n}{m_n S_{mn}} + \frac{l_{d1}}{m_0 S_{d1}} + \dots + \frac{l_{dn}}{m_0 S_{dn}}} = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{m_i S_{mi}} + \sum_{i=1}^n \frac{l_{di}}{m_0 S_{di}} = \frac{F}{R_m + R_d} = F \cdot \Lambda \end{aligned} \quad (2.3)$$

Для магнитной цепи справедливы и все другие законы электрических цепей.

Согласно *первому закону Кирхгофа*, сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю.

$$\sum_{i=1}^k \Phi_i = 0. \quad (2.4)$$

Второй закон Кирхгофа - для всякого замкнутого пути сумма падений магнитных потенциалов на отдельных участках магнитной цепи равна сумме МДС обмоток, которые создают магнитный поток.

$$\sum_{i=1}^k \Phi_i \cdot R_{mi} = \sum_{i=1}^k F_i. \quad (2.5)$$

Сила тяги электромагнита постоянного тока

Для оценки эффективности электромагнитов очень важно знать величину силы, действующий на подвижный якорь и динамику ее изменения. Эту силу принято называть силой тяги, а зависимость силы тяги от воздушного зазора δ при неизменном токе в обмотке - *статической тяговой характеристикой электромагнита*. Получим выражение для тягового усилия в электромагните постоянного тока.

Исходя из закона сохранения энергии, можно сказать, что энергия, полученная электромагнитом, равна сумме энергии потерь в активном сопротивлении цепи и энергии, затраченной на создание магнитного поля:

$$\int_0^t u i dt = \int_0^t i^2 \cdot r dt + \int_0^t i dy$$

где $\int_0^t u i dt$ - энергия, поступающая из сети;
 $\int_0^t i^2 r dt$ - потери энергии в катушке электромагнита;
 $\int_0^t i dy = W_m$ - энергия, сообщенная электромагниту (работа источника, затраченная на изменение потокосцепления катушки).

Вместе с тем, энергия, полученная магнитным полем при элементарном перемещении якоря, определяется механической работой, произведенной якорем, и изменениями запаса электромагнитной энергии:

$$i dy = P dx dW_m, \quad (2.6)$$

где $i d\Psi$ - элементарная энергия, полученная полем при перемещении якоря;
 $P dx$ - элементарная работа, произведенная якорем;
 dW_m - приращение магнитной энергии.

Из (6) следует

$$P = i \cdot \frac{dy}{dx} - \frac{dW_m}{dx}. \quad (2.7)$$

Учитывая, что элементарное перемещение $dx = -d\delta$ (воздушный зазор уменьшается) и $W_m = (1/2) i\Psi$, получим для ненасыщенной магнитной системы электромагнита

$$P = -i \cdot \frac{dy}{dd} + \frac{1}{2} i \cdot \frac{dy}{dd} + \frac{1}{2} y \cdot \frac{di}{dd}. \quad (2.8)$$

С учетом того, что для электромагнитов постоянного тока ток i при элементарном перемещении $d\delta$ не меняется, выражение (8) для тягового усилия представляется в виде

$$P = -\frac{1}{2} I \frac{dy}{dd}. \quad (2.9)$$

Рассмотрим расчет силы тяги для электромагнита с двумя рабочими зазорами. Полное потокосцепление складывается из рабочего потокосцеп-

ления Ψ_δ и потока рассеяния Ψ_σ . Поскольку ненасыщенная магнитная цепь линейна, потокосцепление:

$$y_d = \Phi_d w = F w l_d = I w^2 l_d, \quad (2.10)$$

где $F = I \cdot w$ - МДС обмотки электромагнита;

λ_δ - магнитная проводимость воздушного зазора.

Потокосцепление рассеяния

$$y_s = \int_0^l \frac{w}{l} \cdot \frac{F}{l} \cdot x^2 \cdot l_s dx = I w^2 \cdot \frac{l_s \cdot l}{3}, \quad (2.11)$$

где λ_σ - магнитная проводимость пути потока рассеяния;

l - длина пути потока рассеяния.

Подставив (10) и (11) в (9), получим

$$P = -\frac{1}{2} (l \cdot w)^2 \left[\frac{d l_d}{d d} + \frac{1}{3} \cdot \frac{d (l \cdot l_s)}{d d} \right].$$

Поскольку проводимость λ_σ от зазора не зависит, то $d(l \lambda_\sigma) / d \delta = 0$ и сила тяги электромагнита

$$P = -\frac{1}{2} F^2 \frac{d l_d}{d d}. \quad (2.12)$$

Если известна зависимость $\lambda_\delta = f(\delta)$, то $d \lambda_\delta / d \delta$ находится аналитически. Если λ_δ определяется в результате построения картины поля, то производится расчет λ_δ для ряда положений якоря электромагнита, после чего строится зависимость $\lambda_\delta = f(\delta)$, и производится графическое дифференцирование.

При достаточно малом зазоре (рис. 2.4а) можно считать

$$l_d = \frac{\mu_0 S}{2d} \quad \text{и} \quad \frac{d l_d}{d d} = -\frac{\mu_0 S}{2d^2}.$$

где μ_0 - магнитная проницаемость воздушного зазора;

S - сечение воздушного зазора.

Тогда сила тяги электромагнита:

$$P = \frac{1}{4} F^2 \frac{\mu_0 S}{d^2}. \quad (2.13)$$

Сила тяги электромагнита при одном рабочем зазоре и той же МДС

$$P = \frac{1}{2} F^2 \frac{m_0 S}{d^2}. \quad (2.14)$$

Таким образом, при одной и той же МДС сила тяги электромагнита с одним рабочим зазором в два раза больше, чем при двух зазорах.

Согласно (2.13) сила тяги пропорциональна квадрату МДС обмотки, площади полюса и обратно пропорциональна квадрату размера зазора. Зависимость $P = f(\delta)$ при неизменной МДС, называют *статической тяговой характеристикой*, она представлена на (рис. 2.5) (кривая 1).

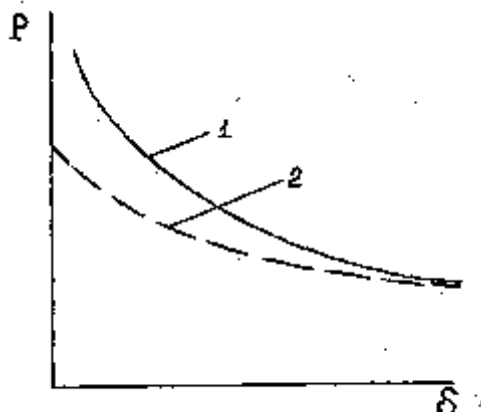


Рис. 2.5. Статические тяговые характеристика электромагнита

По мере уменьшения δ сила тяги резко возрастает и при $\delta = 0$ стремится к бесконечности. В действительности при $\delta \rightarrow 0$ возрастает магнитный поток и увеличивается падение магнитного потенциала в магнитопроводе, причем только часть МДС оказывается приложенной к воздушному зазору. Зависимость $P = f(\delta)$ может быть получена из формулы Максвелла:

$$P = \frac{1}{2m_0} B_d^2 S, \quad (2.15)$$

где B_δ - индукция в рабочем зазоре;

S - сечение сердечника.

Так как при $\delta = 0$ вся МДС тратится на проведение магнитного потока по стали магнитопровода, то напряженность магнитного поля $H = F / l_{cm}$. Индукция B при этом может быть найдена по кривой намагничивания, а сила по выражению (2.15) и имеет конечное значение. На рис. 2.5 кривая 2 изображает зависимость $P = f(\delta)$, снятую экспериментально.

Многочисленные исследования показали, что для расчета силы тяги можно пользоваться (2.16). При этом вместо F подставляется падение магнитного потенциала F_δ :

$$P = \frac{1}{2\mu_0} F_d^2 \frac{dI_d}{dd}. \quad (2.16)$$

Значение F_δ находят в результате расчета магнитной цепи.

Сила тяги электромагнита переменного тока

Рассмотрим электромагнит с двумя рабочими зазорами, приняв следующие допущения: магнитное сопротивление стали, активное сопротивление обмотки и потери стали равны нулю, напряжение, ток и магнитный поток изменяются синусоидально. В этом случае магнитный поток не зависит от зазора, т.е. $d\Psi/d\delta = 0$. Тогда в соответствии с (2.17) получим

$$P = \frac{1}{2} F_d^2 \frac{d}{dd}, \quad (2.17)$$

или с учетом принятых допущений о синусоидальности i и Ψ ,

$$P = \frac{1}{2} \Psi_m \frac{dI_m}{dd} \sin^2 \omega t = P_m \sin^2 \omega t, \quad (2.18)$$

где $P_m = \frac{1}{2} \Psi_m \frac{dI_m}{dd}$ - амплитуда сила тяги электромагнита.

Амплитудное значение силы тяги может быть найдена и из формулы Максвелла:

$$P_m = \frac{B_M^2 S}{2\mu_0} = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 S}. \quad (2.19)$$

Поскольку при изменении зазора амплитуда магнитного потока не меняется, амплитуда силы тяги от зазора тоже не зависит. Вместе с тем, мгновенное значение силы тяги можно записать так же в виде

$$p = P_m \sin^2 \omega t = \frac{P_m}{2} - \frac{P_m}{2} \cos 2\omega t. \quad (2.20)$$

Учитывая, что среднее значение силы тяги

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{P_m}{2},$$

мгновенное значение силы тяги, выраженное через среднее значение силы, представим в виде

$$p = P_{cp} - P_{cp} \cos 2\omega t. \quad (2.21)$$

Таким образом, мгновенное значение силы тяги пульсирует с двойной частотой по отношению к частоте тока и напряжения.

Такое изменение силы во времени отрицательно сказывается на работе электромагнита. В определенные моменты времени противодействующее усилие пружин становится больше силы тяги, что вызывает отрыв якоря от сердечника. Затем по мере нарастания силы тяги якорь вновь притягивается к сердечнику. В результате якорь электромагнита непрерывно вибрирует, что значительно ухудшает работу контактов.

Устранение вибрации в однофазных электромагнитах достигается применением короткозамкнутого витка из меди или алюминия, который насаживается на расщепленный наконечник сердечника (рис. 2.6, а).

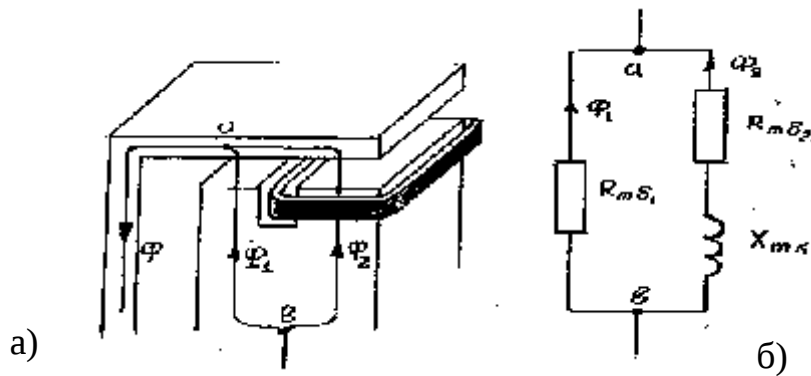


Рис. 2.6. Электромагнит с короткозамкнутым витком а) и его схема замещения б)

Наличие короткозамкнутого витка на пути потока Φ_2 приводит к его фазовому сдвигу относительно потока Φ . Возникновение этого сдвига фаз объясняется наведением ЭДС самоиндукции, действие которой определяется принципом Ленца. На схеме замещения участка магнитной цепи (рис. 2.6, б), эквивалентирование этого соотношения между Φ_1 и Φ_2 достигается введением реактивного магнитного сопротивления X_{mk} .

На рис. 2.7, а показана векторная диаграмма для распределения магнитных потоков и падений магнитного напряжения на этом участке магнитной цепи.

В левой части полюса согласно (2.21) имеет место сила тяги:

$$p_1 = P_{cp1} - P_{cp1} \cos 2\omega t. \quad (2.22)$$

В правой части полюса развивается сила тяги:

$$p_2 = P_{cp2} - P_{cp2} \cos(2\omega t - 2\gamma). \quad (2.23)$$

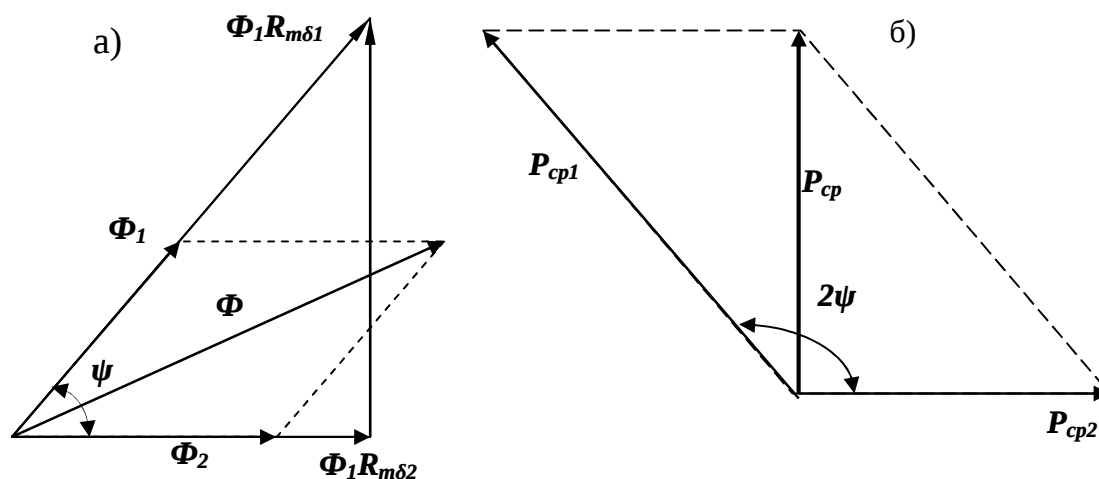


Рис. 2.7. Векторная диаграмма распределения магнитных потоков а)
И определение амплитуды переменной составляющей б)

Если изобразить $P_{cp1} \cdot \cos 2\omega t$ и $P_{cp2} \cdot \cos(2\omega t - 2\psi)$ соответствующими векторами, то амплитуда переменной составляющей может быть найдена из векторной диаграммы (рис. 2.7, б):

$$P_m \approx \sqrt{P_{cp1}^2 + P_{cp2}^2 + 2P_{cp1}P_{cp2} \cos 2\psi} \quad (2.24)$$

Электромагниты проектируются так, чтобы минимальная сила P_{min} была больше противодействующей силы пружины, действующей на подвижный якорь аппарата P_{np} :

$$P_{min} = P_{cp} - P_m > P_{np} \quad (2.25)$$

Пульсация потока будет отсутствовать при $P_m = 0$. Это возможно при одновременном выполнении двух условий:

1. $P_{cp1} = P_{cp2}$, т.е. $\Phi_1 = \Phi_2$;
2. $2\psi = \pi$, т.е. угол сдвига между Φ_1 и Φ_2 равен 90° .

В системах с короткозамкнутыми витками достигнуть сдвига в 90° практически невозможно. В существующих системах $\psi = 50...60^\circ$, а минимальное значение пульсации и получается при соблюдении первого условия.

В трехфазном электромагните, если в магнитном отношении все его три фазы симметричны, силы тяги, развиваемые под каждым полюсом, равны

$$\begin{aligned} p_A &= P_m \cdot \sin 2\omega t; \\ p_B &= P_m \cdot \sin 2(\omega t - 120^\circ); \\ p_C &= P_m \cdot \sin 2(\omega t - 240^\circ). \end{aligned}$$

Результирующая сила, действующая на якорь, равна сумме этих сил:

$$p = P_A + P_B + P_C = \frac{3}{2} P_m.$$

Таким образом, в трехфазном электромагните результирующая сила, действующая на якорь, во времени не меняется. Однако вибрация якоря полностью не устраняется. При прохождении магнитного потока в каждой фазе через ноль сила, развиваемая этой фазой, также равна нулю. В результате точка приложения равнодействующей силы тяги всех трех фаз перемещается по телу якоря, а поскольку точка приложения противодействующей силы неизменна, то из-за этого возникает вибрация якоря.

Сравнительный анализ тяговых характеристик электромагнитов постоянного и переменного тока

Для электромагнитов постоянного и переменного тока с двумя рабочими зазорами сила тяговая характеристика может быть рассчитана по (2.19):

$$P = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad \text{или} \quad P_m = \frac{B_m^2 S}{2\mu_0}.$$

Если площади полюсов электромагнитов одинаковы и одинаковы значения индукции в зазорах B_m , то максимальное значение силы тяги электромагнита переменного тока равна силе тяги электромагнита постоянного тока.

Поскольку на переменном токе $P_{cp} = P_m/2$, то средняя сила, развиваемая электромагнитом переменного тока в два раза меньше силы, развиваемой электромагнитом постоянного тока.

Недостатком электромагнита переменного тока является и вибрация якоря. Применение короткозамкнутого витка с целью уменьшения вибрации приводит к снижению среднего значения силы тяги.

Сравним теперь тяговые характеристики электромагнитов. Как следует из (2.13), сила тяги электромагнита постоянного тока обратно пропорциональна квадрату зазора. В связи с этим для обеспечения большей силы тяги электромагнит должен иметь либо малый ход якоря, либо большую МДС втягивающей катушки, создающей магнитный поток.

В электромагните переменного тока с ростом зазора с одной стороны, растет магнитное сопротивление зазора, с другой - растет ток в обмотке, так что магнитный поток остается практически неизменным. При большом зазоре создается большая МДС обмотки, которая обеспечивает необходимый Φ_m . В связи с этим электромагниты переменного тока могут работать при относительно больших ходах якоря.

Электромагнитный привод

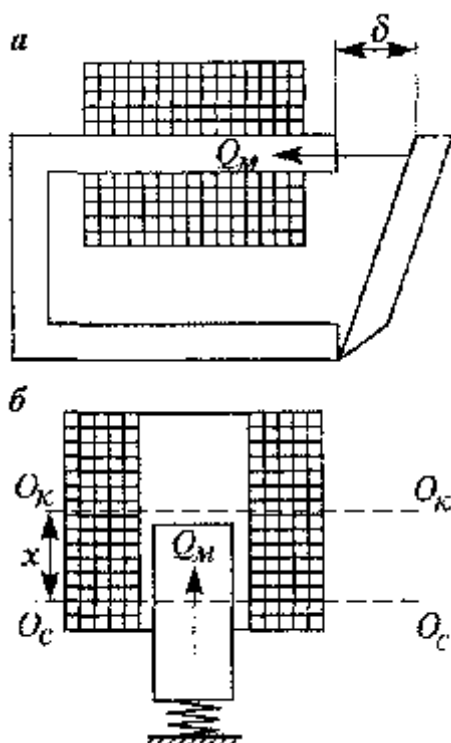


Рис. 2.8. Магнитопроводы электромагнитов

В электромагнитном приводе используется сила притяжения якоря к сердечнику электромагнита или сила, которая перемещает якорь в середине сердечника растягиваемой пружины.

В тяговых аппаратах электромагнитные приводы применяют только как индивидуальные. Попытки применить их как групповые не увенчались успехом, т.к. эти приводы при значительных перемещениях подвижных частей оказываются громоздкими, требуют значительного количества энергии, имеют низкий КПД. Кроме аппаратов защиты, электромагнитные приводы обычно имеют индивидуальные контакты вспомогательных цепей и реле различного назначения.

В тяговых аппаратах различают электромагниты с замкнутым (рис. 2.8, а) и разомкнутым (рис. 2.8, б) магнитопроводом.

Большое применение имеют аппараты с замкнутым магнитопроводом и поворотным якорем, т.к. при разомкнутой магнитной системе необходима большая МДС (магнитодвижущая сила) для формирования потока в системе с большим сопротивлением воздушного промежутка.

Зависимость силы Q_m от воздушного промежутка δ (хода якоря x) называют тяговой характеристикой электромагнитного привода $Q_m = f(\delta)$.

Рассмотрим метод построения тяговых характеристик **электромагнита постоянного тока** по кривым намагничивания.

Допустим, что катушка электромагнита получает питание от постоянного источника с напряжением U_0 . При включении тока

$$U_0 = ir + W \left(\frac{d\Phi}{dt} \right), \quad (2.26)$$

где W - количество витков катушки;

Φ - магнитный поток.

Умножим обе части равенства (26) на idt . В результате интегрирования получим

$$\int_0^t (U_0 i - i^2 r) dt = \int_0^{\Phi_c} i W d\Phi = \int_0^{\Phi_c} F d\Phi, \quad (2.27)$$

где F - МДС катушки электромагнита.

Первая часть равенства (27) - энергия, полученная магнитным полем до достижения постоянного магнитного потока за время t , т.е. полученная от источника питания за исключением потерь в сопротивлении цепи.

Действие электромагнитного привода можно разделить на 2 этапа; увеличения тока до начала перемещения якоря и перемещение якоря электромагнита. Зависимость $\Phi(F)$ при неподвижном якоре до его притягивания изображена зависимостью O_a (рис. 2.9.)

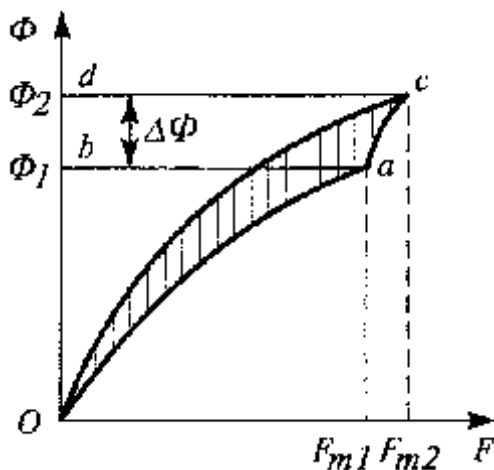


Рис. 2.9. Зависимость $\Phi(F)$

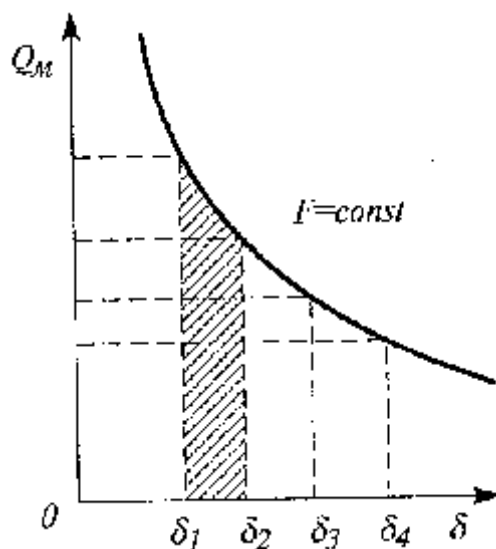


Рис. 2.10. Тяговая характеристика электромагнита

Площадь, ограниченная ординатами δ_1 и δ_2 и кривой $Q_m(\delta)$, отвечает механической работе по перемещению якоря на участке $\delta_1 - \delta_2$ (рис. 2.10).

Пригодность электромагнита для данного аппарата можно определить сопоставляя диаграмму сил $Q_n(\delta)$ сопротивления подвижной, которые привод должен преодолеть, с тяговой характеристикой электромагнита. Диаграмма сил может иметь разный вид в зависимости от характеристик пружин, их предварительного натяжения.

Типовые характеристики $Q_M(\delta)$ и $Q_n(\delta)$ для электромагнитных индивидуальных контакторов приведены на рис. 2.11.

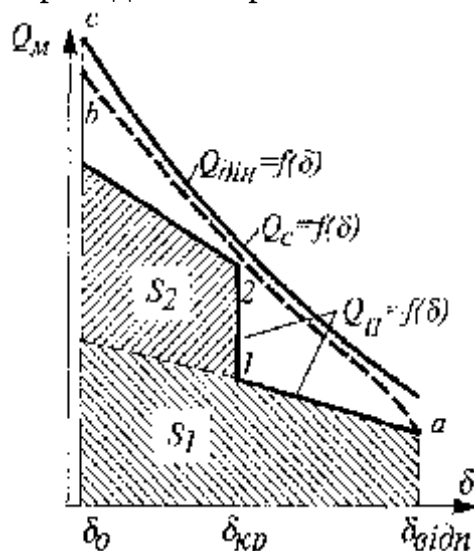


Рис. 2.11. Тяговая и противодействующая характеристики электромагнитного контактора

Противодействующая (механическая) характеристика $Q_n(\delta)$ определяется совокупностью силы отключающей пружины и веса подвижных частей (площадь S_1) и силами контактных пружин (площадь S_2).

Характеристики приведены к рабочему зазору электромагнита.

Зазор $\delta_{отп}$ отвечает отпущенному, а зазор δ_0 — притянutoму состоянию якоря.

В точке $\delta_{отп}$ сила Q_n образовывается в основном весом подвижной системы и силой отключающей (поворотной) пружины (силами трения пренебрегаем).

Во время движения якоря зазор δ уменьшается, а сила Q_n увеличивается вследствие дополнительного сжатия отключающей пружины. В точке $\delta_{кр}$ происходит столкновение контактов, при этом Q_n увеличивается скачкообразно до значения начальной силы надавливания контактов, которая определяется предварительным надавливанием контактной пружины, а дальше Q_n возрастает плавно за счет дополнительного сжатия этой пружины.

Противодействующие силы пружин и веса подвижной системы всегда направлены в одну сторону независимо от направления перемещения якоря.

Для обеспечения четкого и надежного включения контактора тяговая характеристика должна лежать выше механической.

Электромагнитные приводы в большинстве случаев питаются постоянным током от аккумуляторных батарей, кроме электромагнитов некоторых реле, которые контролируют силовые цепи переменного тока.

Структура электромагнитных приводов позволяет повышать или снижать быстродействие аппаратов, уменьшая или увеличивая вихревые токи

в магнитопроводах. Так для повышения быстродействия аппарата вихревые токи уменьшают, применяя магнитопроводы из электротехнической стали с узкой петлей гистерезиса.

Если быстродействие не нужно, применяют пассивную магнитную систему, при которой время срабатывания составляет 0,08...0,15 с. Для образования больших замедлений - выдержек времени - на сердечник электромагнита устанавливают охватывающее его массивное кольцо из меди, латуни - демпферное кольцо - якобы усиливающее действие вихревых токов.

При изменении магнитного потока в кольце наводится ЭДС

$$e_D = \left(-W_D \frac{d\Phi}{dt} \right),$$

где $W_D = 1$ - количество витков кольца.

Под действием этой ЭДС в кольце, которое имеет очень малое электрическое сопротивление, r_D возникает относительно большой ток i_D и МДС F_D

$$i_D = F_D \approx \left(\frac{e_D}{r_D} \right).$$

Результирующая МДС электромагнита

$$F = iW_K + F_D = iW_K - \left(\left(\frac{d\Phi}{dt} \right) / r_D \right).$$

Для оценки эффективности электромагнитов важно знать величину силы, действующей на подвижный якорь, и зависимость этой силы от величины приложенного напряжения к катушке электромагнита при неизменном воздушном зазоре и от величины воздушного зазора между якорем и магнитопроводом при неизменном приложенном напряжении.

Зависимость тяговой силы электромагнита от величины МДС катушки при неизменном воздушном зазоре называется **нагрузочной характеристикой**. МДС катушки $F = i \cdot w$, где w - число витков катушки. При неизменном числе витков ток в катушке $i \propto U$. Из этого следует, что $F \propto U$ и нагрузочную характеристику можно представить зависимостью $P = f(U)$.

Зависимость тяговой силы электромагнита от величины воздушного зазора при неизменной МДС (приложенном напряжении) катушки называется **статической тяговой характеристикой электромагнита** $P = f(d)$.

Тяговую силу электромагнита можно вычислить по энергетической зависимости:

$$P = -0,5 \cdot F^2 \frac{d\lambda_{\delta}}{d\delta};$$

где F - МДС катушки;

λ_{δ} - магнитная проводимость воздушного зазора;

δ - величина воздушного зазора между якорем и магнитопроводом.

При использовании электромагнита с одним воздушным зазором и при достаточно малой его величине можно считать допустимым следующее:

$$\lambda_{\delta} = \frac{\mu_0 \cdot S}{\delta}; \quad \text{и} \quad \frac{d\lambda_{\delta}}{d\delta} = -\frac{\mu_0 \cdot S}{\delta^2};$$

где μ_0 - магнитная проницаемость воздушного зазора;

S - сечение воздушного зазора.

При этом сила тяги электромагнита определяется по формуле

$$P = 0,5 \cdot F^2 \frac{\mu_0 \cdot S}{\delta^2}.$$

Силу тяги электромагнита можно определить по формуле Максвелла, если магнитное поле в рабочем зазоре равномерное и магнитопровод не насыщен:

$$P = \frac{B^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0};$$

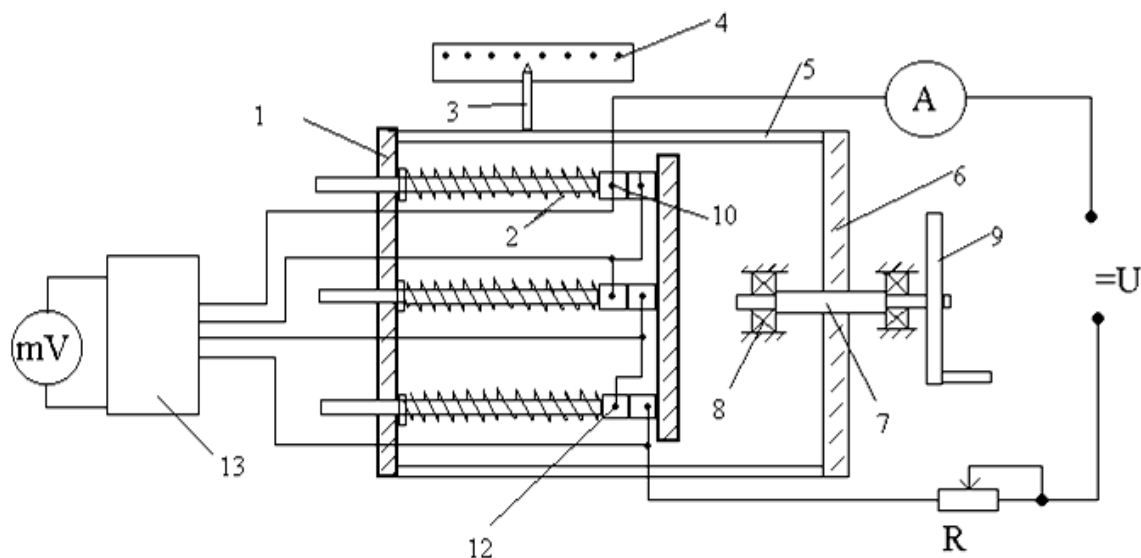
где B - индукция в рабочем воздушном зазоре;

S - сечение воздушного зазора.

Аналитическое определение статической тяговой характеристики представляет определённую трудность. По этой причине, как правило, статическую тяговую характеристику определяют экспериментальным путём.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

Тема: Исследование зависимости переходного сопротивления контакта от контактного нажатия и материала контакта.



Место проведения: помещение 156.

Цель: Исследовать влияние контактного нажатия и материала контакта на его переходное сопротивление.

План

1. Вводная часть – 10 мин.
2. Основная часть – 60 мин:
 - а) подготовить к работе лабораторную установку – 10 мин;
 - б) ознакомиться с назначением и техническими характеристиками лабораторной установки – 20 мин;
 - в) изучить устройство, принцип работы лабораторной установки и ее элементов – 20 мин;
 - г) снять показания амперметра и вольтметра в зависимости от силы нажатия контактов и их материала – 60 мин;
 - д) оформить работу – 40 мин;
 - е) защитить работу – 10 мин.

3. Заключительная часть – 10 мин.

В результате проведения лабораторного занятия студенты должны **ЗНАТЬ:**

1. Назначение и технические характеристики лабораторной установки.
2. Устройство и работа составных частей лабораторной установки.
3. Устройство и работу лабораторной установки.

4. Контрольно-измерительные приборы, используемые для снятия характеристик переходного сопротивления контактов.
5. Порядок работы, измерения параметров, регулирование и настройка.
6. Указание мер по электробезопасности.

УМЕТЬ:

1. Получать экспериментальные данные для определения переходного сопротивления контактов.
2. Рассчитать переходное сопротивление контактов.
3. Построить зависимости переходных сопротивлений контактов от силы их нажатия.

Литература

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты: учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1998. - 718 с.
2. Родштейн Л.А. Электрические аппараты: учебник для техникумов. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 304 с.
3. Яшутин В.М., Анисимов О.Ю. Электрические аппараты: учеб. пособие. – Севастополь: СИЯЭиП, 2000.
4. Яшутин В.М. Электрические аппараты: альбом рисунков к учебному пособию. – Севастополь: СИЯЭиП, 1997.
5. Основы теории электрических аппаратов / Б.К. Буль и др. - М.: Высшая школа 1990. - 230 с.
7. Электрические аппараты: учебник и практикум для академического бакалавриата / Под ред. П. А. Курбатова. - М.: Издательство Юрайт, 2018. - 250 с. - (Серия : Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-9715-6.
8. Аполлонский С.М. Электрические аппараты управления и автоматики: учеб. пособие / С.М. Аполлонский, Ю.В. Куклев, В.Я. Фролов. - СПб.: Издательство "Лань", 2017. – 256 с.: ил.

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАНЯТИЯ № 3

I. Программа выполнения работы:

1. Изучить используемую аппаратуру, оборудование, схему и принцип работы установки.
2. Снять экспериментальные данные для определения переходного сопротивления контактов.
3. Рассчитать переходные сопротивления контактов от их силы нажатия и материала.

4. Построить зависимости переходных сопротивлений контактов от силы их нажатия.

II. Порядок выполнения работы

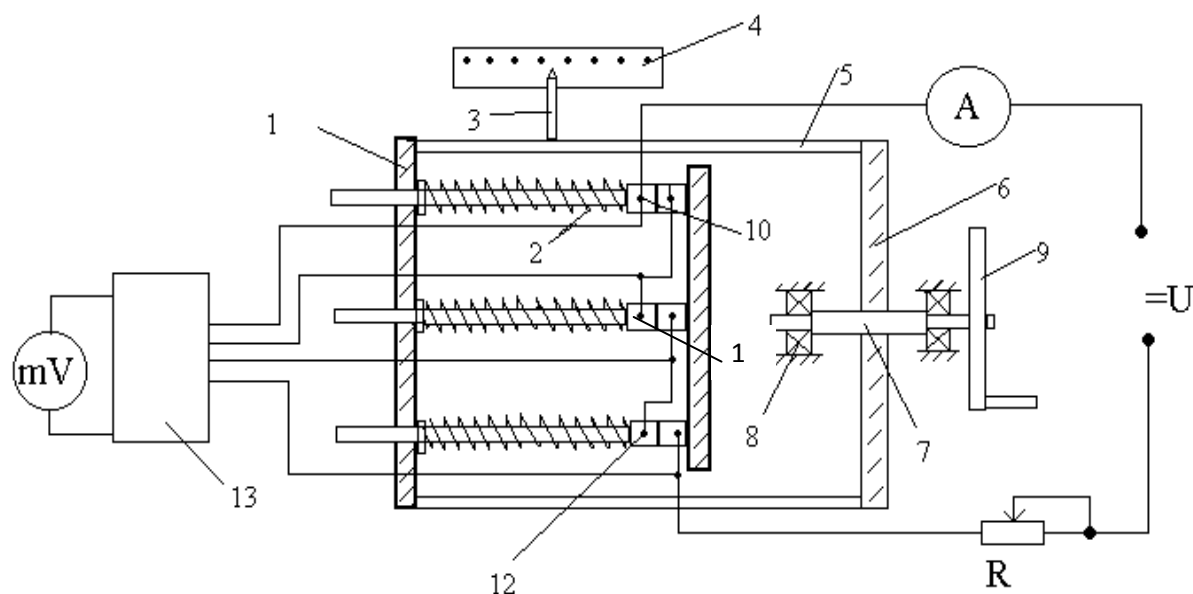


Рис. 3.1. Лабораторная установка для определения переходного сопротивления контактов

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой и собрать электрическую схему измерения параметров (рис. 3.1).

2.2. Маховиком 9 привести в соприкосновение контакты 10, 11, 12.

2.3. Подать напряжение на электрическую схему лабораторной установки и с помощью реостата R установить ток в цепи 4 А.

2.4. Переключателем 13 последовательно подключить милливольтметр на контакты 10, 11, 12 и снять показания.

2.5. Записать показания по шкале 4 в табл. 3.1.

2.6. Реостатом R уменьшить ток в цепи до минимально возможной величины и отключить напряжение.

2.7. Маховиком 9 увеличить контактное нажатие.

2.8. Подключить напряжение, установить ток в цепи 4 А и снять все необходимые показания.

2.9. Аналогично снять показания ещё при трёх значениях силы нажатия.

2.10. Аналогично снять показания при уменьшении контактного нажатия.

2.11. Рассчитать переходное сопротивление контактов по выражению:

$$R_n = U_k / I_k,$$

где U_k - показания милливольтметра в мВ; I_k – ток в цепи в А.

2.12. По выражению $R_n = \epsilon / P^n$ определить силу нажатия контактов в ньютонах, при её увеличении и уменьшении. Величины ϵ и n выбираются из настоящей методики.

2.13. Результаты измерений и расчётов при увеличении и уменьшении нажатия свести в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

Материал контактов	Величины напряж (В)	Ток (А)	Показания шкалы/сила нажатия P			
Медь						
Алюминий						
Латунь						

2.14. По результатам измерений и расчётов построить зависимости $R_n = f(P)$ для материалов: меди, алюминия и латуни.

2.15. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы по выполненной работе.

III. Содержание и оформление отчета:

Отчет должен содержать:

- схему лабораторной установки;
- таблицу с результатами измерений и расчетов (табл. 3.1);
- зависимости $R_n = f(P)$;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое переходное сопротивление контакта?
2. Зависимость переходного сопротивления контакта от формы контакта и материала контакта?
3. Зависимость переходного сопротивления контакта от силы нажатия контактов?
4. Зависимость переходного сопротивления контакта от температуры?
5. Зависимость переходного сопротивления контакта от состояния контактных поверхностей.

IV. Организационно-методические указания

4.1. Перед выполнением лабораторной работы студент обязан проработать материал выносимый на самостоятельную подготовку, изложенный выше в данной методичке. Приготовить бланк отчёта по лабораторной работе, где должно быть указано:

- Ф. И. О. студента и номер класса.
- Нарисована рис. 3.1 и описана лабораторная установка.
- Расчерчена таблица измерений и вычислений для случаев увеличения и уменьшения воздушного зазора и питающего напряжения.

4.2. Перед проведением лабораторной работы преподавателем проверяются знания и наличие подготовленных бланков для проведения лабораторной работы. Студенты, не подготовившиеся к проведению лабораторной работы, к занятию не допускаются.

4.3. Учебная группа делится на несколько подгрупп и приступает к выполнению лабораторной работы под руководством преподавателя и инженерно-технического состава лаборатории.

4.4. После выполнения работы, студенты оформляют бланк отчёта и сдают его преподавателю на проверку.

4.5. Во время, отведённое на самостоятельное изучение дисциплины «Электрические аппараты» в часы консультаций преподавателя, уметь ответить на контрольные вопросы, изложенные ниже.

4.6. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы, во время, отведённое на выполнение лабораторной работы - самостоятельно занимаются подготовкой к работе в помещении лаборатории. Выполнение лабораторной работы производится в дополнительное время, указанное преподавателем.

4.7. Студенты, допущенные к выполнению лабораторной работы, но не выполнившие её по техническим причинам, выполняют экспериментальную часть работы под руководством инженерного состава лаборатории в указанное время.

ПРИЛОЖЕНИЕ
к лабораторному занятию № 3
для самостоятельной проработки студентом

3.1. Контакты и контактные элементы

1) Основные понятия о процессах в контактах и их конструкции.

Электрический контакт - это место перехода тока из одной токоведущей детали в другую.

По характеру движения при работе контакты можно разделить на неподвижные (жесткие), подвижные неразмыкающие и подвижные размыкающие. Неподвижные контакты могут использоваться в местах постоянного электрического соединения токоведущих деталей аппаратов, присоединения внешних проводов, шин и т.д. Такие контакты бывают разъемные и неразъемные. У разъемных контактов есть токопроводящие детали крепления (стальные) и токопроводящие (медные). В случаях неразъемных контактов применяют пайку специальными припоями. При этом электрический контакт более плотный, а сопротивление его стабильнее.

Подвижные неразмыкающие контакты (контакты скольжения) обеспечивают подвижные соединения токоведущих деталей. Например, роликовый контакт в аппарате, контакт токоведущей части приемника с контактным проводом или рейкой, контакт щетка - коллектор в электрических машинах. Основной недостаток скользящих контактов - затруднительное дугогашение.

Подвижные размыкающие и замыкающие контакты (разрывные) применяют для коммутации тока электрических цепей. Они являются основным видом контактов коммутационных аппаратов и называются коммутирующими.

Рассмотрим механизм коммутирования. Если посмотреть в микроскоп на профиль металлических контактных поверхностей. То увидим картину, аналогичную рис. 3.2.

Под действием кислорода, азота, озона и других химических элементов на поверхности контактов образовывается пленка окиси (на медном контакте - Cu_2O), сульфидные H_2S с толщиной 10^{-6} см, кислородные с толщиной более 10^{-7} см и которые представляют собой осажденные из воздуха молекулы кислорода, которые удерживаются на поверхности межмолекулярными силами.

По мере увеличения сил давления пленка в местах касания начинает лопаться и продавливаться, образуя зоны чисто металлического прикосновения, которые называются α -пятнами. Увеличение сил давления приводит к увеличению α - пятен и их площадей.

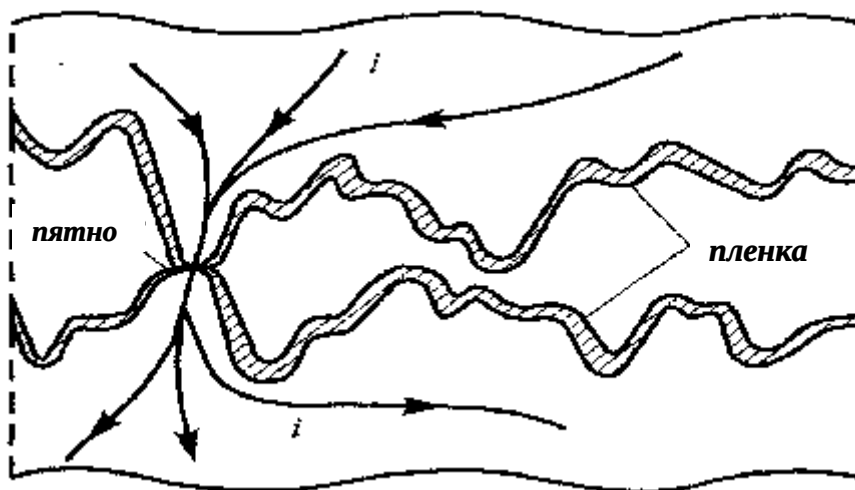


Рис. 3.2. Микроструктура электрического контакта

Пленки в этом процессе играют положительную роль. В местах чисто металлического прикосновения контактов развиваются большие силы межмолекулярного сцепления. При значительной степени такого прикосновения, которая могла бы образоваться при отсутствии пленок, контакты было бы невозможно оторвать один от другого теми силами, которые реальны для контактных устройств электрических аппаратов. При перемещении контактов один относительно другого пленки не позволяют развиваться большим площадям чисто металлического прикосновения.

При замыкании контактов, находящихся под напряжением сначала только небольшая часть электронов проходит через не разрушенные изоляционные пленки (их удельное сопротивление $\rho = 10^6 \dots 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) вследствие туннельного эффекта, представляющего собой проникновение электронов через потенциальный барьер. При достаточном значении градиента напряжения ($10^6 \dots 10^7 \text{ В/см}$) может происходить пробой на самых узких участках пленки, что приводит к образованию в них тонких металлических пересечений. Это явление называется фритингом. Фритинг наряду с продавливанием отдельных зон в пленке за счет сил давления приводит к образованию α -пятен в контакте, которые необходимы для прохождения нормального тока.

Прохождение тока только через α -пятна приводит к тому, что ток, равномерно распределенный по площади пересечения контактных деталей стягивается в α -пятнах. Это вызывает местное увеличение его плотности. Соответственно возникает электрическое сопротивление стягивания R_c .

В месте контактирования из-за неполного разрушения пленок, а также из-за наличия пыли существует сопротивление R_n этих пленок.

В совокупности R_c и R_n определяют переходное сопротивление контактов $R_{пер}$. В реальных контактах $R_{пер}$ имеет значительный разброс.

Сопротивление R_n по своей природе величина случайная. Оно зависит от материала контактных деталей, состояния контактных поверхностей (их обработке, степени окисления, загрязнения), силы давления и ее распределения по контактной поверхности.

2) Зависимость переходного сопротивления контакта от силы нажатия.

На основании опытных данных значение R_p определяется выражением

$$R_n = e / P^n, \quad (3.1)$$

где e - величина, зависящая от свойств материала и от состояния контактной поверхности ($Ом \cdot Н^n$); Значения e приведены в табл. 3.2.

P - сила, сжимающая контакты ($Н$);

n - коэффициент, зависящий от числа точек соприкосновения.

- для точечного контакта $n = 0,5$;
- для линейного $n = 0,7-0,8$;
- для плоского $n = 1$.

Т а б л и ц а 3.2

Материал контактной пары	Коэффициент $e \cdot 10^{-3} Ом \cdot Н$
Медь - медь	0,8...1,4
Медь - медь луженая	1,0...1,8
Серебро - сплавы серебра	0,3...0,6
Латунь - латунь	6,7...7,2
Сталь - сталь	73...77
Сталь - медь	3,6...3,8
Медь - латунь	3,5...3,8
Металлокерамика - металлокерамика	2,6...3,3

В табл. 3.2 наименьшие значения соответствуют абсолютно чистым поверхностям, наибольшие - граничным эксплуатационным состояниям.

Зависимость переходного сопротивления контактов от силы сжатия представлена на (рис.3.3.). *Кривая 1* соответствует процессу возрастания контактного нажатия. С увеличением силы нажатия переходное сопротивление уменьшается.

Кривая 2 соответствует снижению силы нажатия. Различный ход кривых объясняется наличием остаточных деформаций отдельных бугорков, по которым происходило соприкосновение.

Следует отметить, что при одном и том же нажатии переходное сопротивление одного и того же контакта при каждом замыкании может быть разным и отличаться в достаточно широких пределах. Объясняется это тем, что число и размер площадок контактирования при каждом замыкании могут быть разными. Значение переходного сопротивления в зави-

симости от силы нажатия практически выражается не какой то кривой, а областью, ограниченной кривыми 1 и 2.

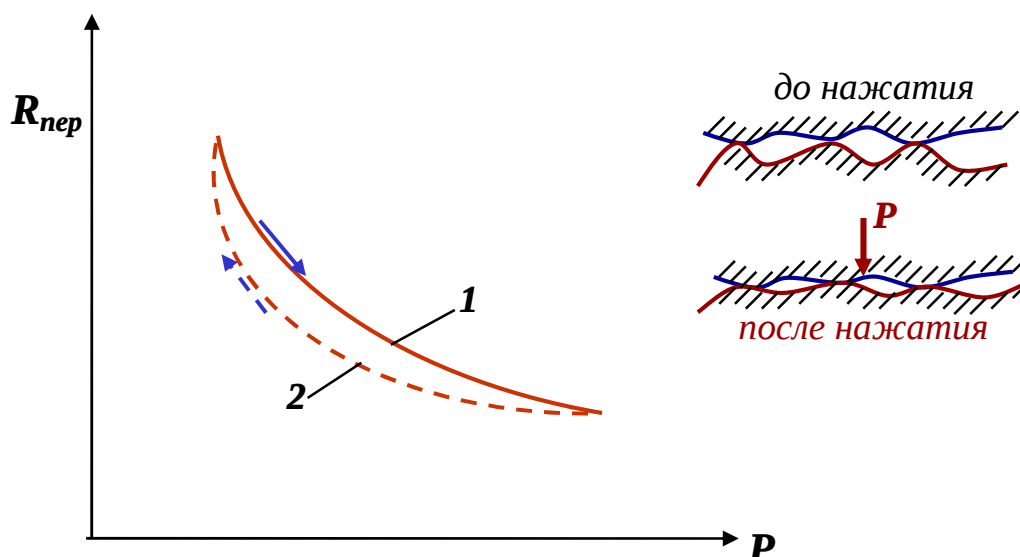


Рис. 3.3. Зависимость переходного сопротивления контактов от силы нажатия

3) Зависимость переходного сопротивления контакта от температуры.

Зависимость переходного сопротивления от температуры представлена на (рис. 3.4).

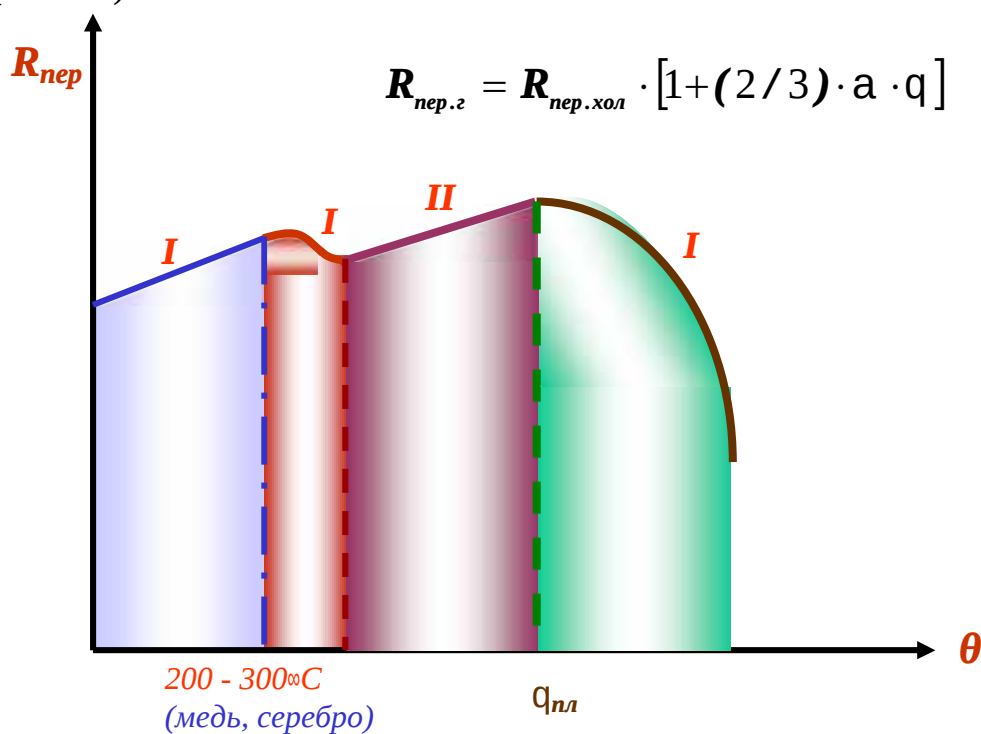


Рис. 3.4 Зависимость переходного сопротивления контактов от температуры

С увеличением температуры меняется структура бугорков и площади соприкосновения за счет изменения удельного сопротивления *смятию* δ . Поэтому температурный коэффициент здесь будет меньшим. Для меди $\alpha_1 = 2 / 3 \cdot \alpha$ и аналитически зависимость переходного сопротивления от температуры выражается формулой:

$$R_{пер.г} = R_{пер.хол} \cdot [1 + (2 / 3) \cdot \alpha \cdot q], \quad (3.2)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления материала контактов 1/°C

С ростом температуры переходное сопротивление вначале растет (участок 1 на рис. 3.4. Затем при некоторой температуре (для меди и серебра 200...300 °C) происходит резкое ухудшение механических свойств материала. При том же нажатии увеличивается площадь соприкосновения контактов, сопротивление падает (участок II). В дальнейшем (участок III) оно снова возрастает линейно с ростом температуры, и при температуре плавления материала контакты свариваются, переходное сопротивление резко падает (участок IV).

4) Зависимость переходного сопротивления контакта от состояния контактной поверхности.

Переходное сопротивление зависит от способа обработки контактов, чистоты контактных поверхностей, степени окисления контактов. У окисленных и грязных контактов переходное сопротивление возрастает. Шлифовка контактов уменьшает переходное сопротивление, так как происходит более плотное соприкосновение контактов и увеличивается площадь контактирования.

5) Зависимость переходного сопротивления контакта от материала контактов.

От материала контакта в значительной степени зависит как переходное сопротивление контактов, так и другие их характеристики. С увеличением проводимости материалов, переходное сопротивление их уменьшается. К материалам контактов предъявляются требования: они должны обладать высокой электрической проводимостью и теплопроводностью, быть устойчивыми против коррозии и иметь токопроводящую окисленную пленку, иметь высокую температуру плавления и испарения, иметь достаточную механическую прочность, иметь невысокую стоимость.

Для контактных соединений применяются следующие материалы:

Медь. Удовлетворяет всем требованиям к контактным материалам, но окислы меди имеют низкую проводимость, что увеличивает переходное сопротивление контактов. Медь нашла наибольшее применение в электрических аппаратах.

Серебро. Удовлетворяет всем требованиям к контактным материалам, за исключением сравнительно небольшой температуры плавления и испарения. Серебро применяется для главных контактов в аппаратах на большие токи и в электрических аппаратах наиболее ответственных устройств. Серебро обычно применяется в виде накладок - деталь выполняется из меди, а на рабочей поверхности контакта приваривается серебряная накладка.

Алюминий. По сравнению с медью обладает меньшей проводимостью и механической прочностью. Образует плохо проводящую окисную пленку, что существенно ограничивает его применение. Используется в основном в разборных контактах.

Платина, золото, молибден. Применяются для коммутирующих контактов на малые токи при малых нажатиях. Эти металлы не окисляются. Для повышения износостойкости применяют сплавы из платины с иридием.

Вольфрам и его сплавы. При большой твердости и высокой температуре плавления обладают высокой износостойкостью. Применяются сплавы для контактов с большей частотой размыкания. При средних и больших токах применяются как дугогасительные контакты.

Металлокерамика - механическая смесь двух практически не сплавляющихся металлов. При этом один из металлов обладает хорошей проводимостью, а другой обладает механической прочностью, является тугоплавким.

6) Зависимость переходного сопротивления контакта от формы контактов.

С увеличением площади соприкосновения контактов переходное сопротивление контактов уменьшается и увеличивается показатель степени n в выражении (3.1). Однако, беспредельное увеличение условной площади контактирования нецелесообразно, так как n достигает значение 1, а больше он не бывает.

3.2. Описание лабораторной установки

Кинематическая и электрическая схемы установки представлены на рис. 3.5.

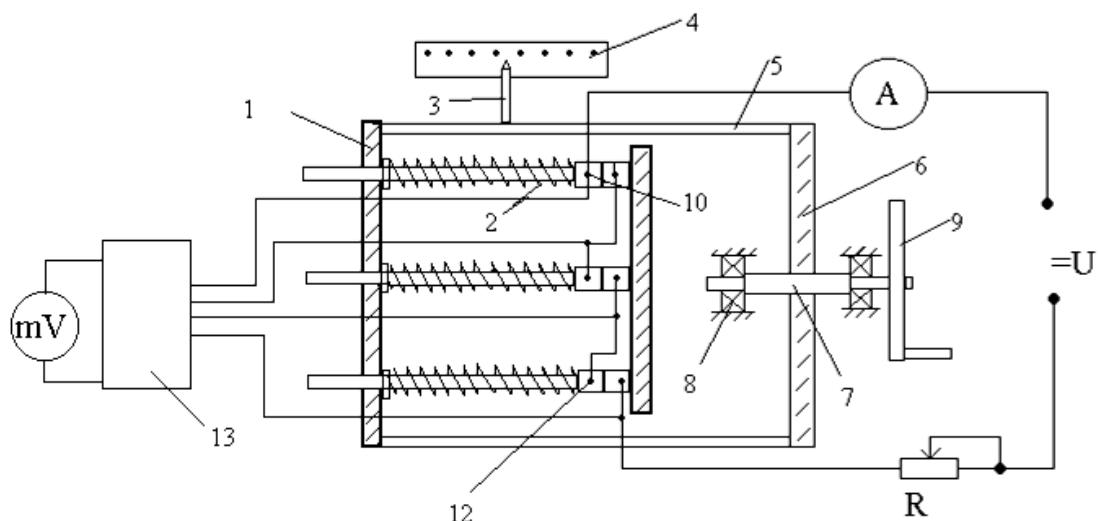


Рис. 3.5. Лабораторная установка определения переходного сопротивления контактов

При вращении рукоятки 9 вращается винт 7, установленный в подшипниках 8. Вращательное движение винта 7 преобразуется в поступательное движение траверсы 6, которая жёстко связана с подвижной планкой 1 с помощью шпилек 5. Планка, передвигаясь вправо, сжимает пружины 2, за счёт чего увеличивается контактное нажатие. С некоторым допущением можно считать, что контактное нажатие будет пропорционально перемещению траверсы 1 в миллиметрах. Поэтому контактное нажатие с помощью указателя 3 снимается со шкалы 4 в *миллиметрах*. Контакты 10, 11, 12 плоские и выполнены из различных материалов (меди, алюминия, бронзы). Все элементы установки размещаются на лабораторном столе. Все контакты соединяются последовательно и через регулируемое сопротивление R и амперметр A включаются на постоянное напряжение 24 В. Каждая пара контактов через переключатель 13 подключается к милливольтметру.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

Тема: Исследование дуги постоянного и переменного тока и способов её гашения.



Место проведения: помещение 156.

Цель: Исследовать возникновение и гашение дуги переменного и постоянного тока.

План

1. Вводная часть - 5 мин.
2. Основная часть: 80 мин;
 - а) подготовка к работе испытательной установки - 5 мин;
 - б) ознакомиться с установкой и ее техническими характеристиками - 10 мин;
 - в) изучить установку и принцип ее работы - 10 мин;
 - г) снять характеристики - 30 мин;
 - д) оформление работы - 20 мин;
 - е) защита работы - 5 мин.
3. Заключительная часть - 5 мин.

В результате проведения лабораторного занятия студенты должны **ЗНАТЬ:**

1. Принцип работы и основные элементы лабораторной установки.
2. Процессы происходящие в электрической дуге.

3. Процесс отключения дуги выключателя.
4. Способы гашения дуги в аппаратах напряжением до 1000 В.
5. Основные способы гашения дуги в аппаратах напряжением 1000 В и более.
6. Горение дуги в вакууме.
7. Гашение дуги в элегазе.

УМЕТЬ:

1. Подготовить лабораторную установку к работе.
2. Исследовать возникновение переменного и постоянного тока.
3. Исследовать гашение дуги переменного и постоянного тока.

Литература

1. Конспект лекций по курсу “Электрические аппараты”.
2. Чунихин А.А. Электрические аппараты. - М.: Энергоиздат, 1988.
3. Яшутин В.М., Анисимов О.Ю. Электрические аппараты: учеб. пособие. - Севастополь: СИЯЭиП, 2000.
4. Яшутин В.М. Электрические аппараты: альбом рисунков к учебному пособию. - Севастополь: СИЯЭиП, 1997.
5. Электрические аппараты : учебник и практикум для академического бакалавриата / под ред. П. А. Курбатова. - М.: Издательство Юрайт, 2018. - 250 с. - (Серия : Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-9715-6.

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАНЯТИЯ № 4

I. Программа выполнения работы:

1. Изучить принцип работы и основные элементы лабораторной установки.
2. Исследовать возникновение переменного и постоянного тока.
3. Исследовать гашение дуги переменного и постоянного тока.

II. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

- 2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой и собрать электрическую схему измерения параметров (см. *Описание лабораторной установки рис. 4.1.*).
- 2.2. Подключить к ней осциллограф. Дуговой промежуток установить максимальным.
- 2.3. После проверки схемы преподавателем подать напряжение на электрическую схему лабораторной установки и зажечь дугу.

2.4. Снять осциллограммы (перерисовав их на кальку) тока и напряжения дугового промежутка, предварительно записав показания вольтметра V_2 и амперметра A .

2.5. Записать показания приборов, изменяя дуговой промежуток от минимального (загорания дуги) до максимального (гашения дуги). Описать характер изменения процесса горения дуги, отраженного осциллографом.

Описание лабораторной установки

Электрические схемы установки представлены на рис. 4.1.

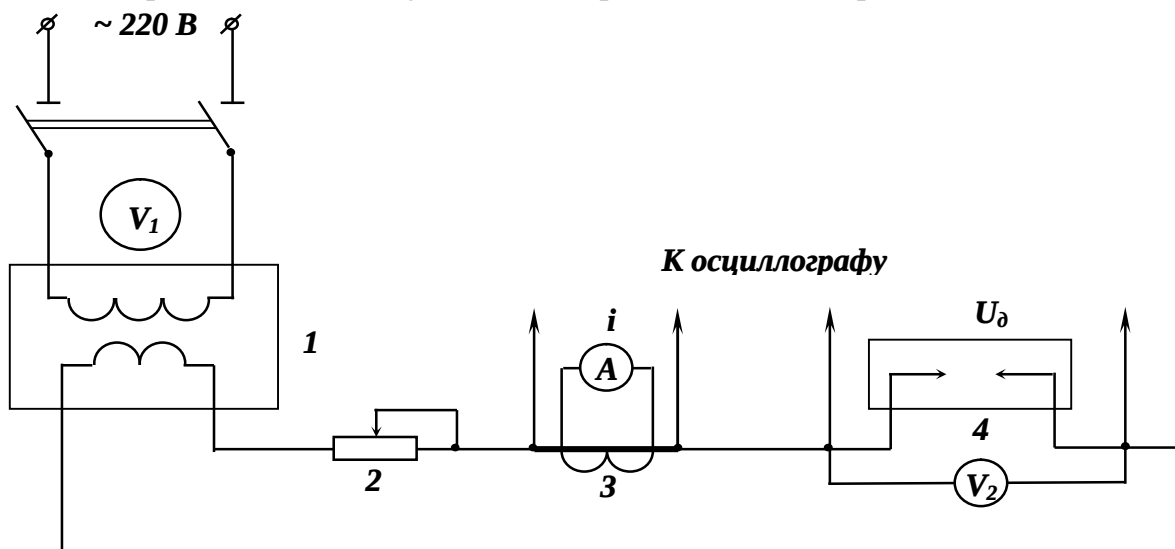


Рис. 4.1 Схема исследования электрической дуги:

1 – сварочный трансформатор; 2 – регулировочный реостат; 3 – трансформатор тока ($I_n = 200 \text{ A}$); 4 – устройство с регулируемым дуговым промежутком

III. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

- Ф.И.О. студента и номер класса;
- рис. 1 и описание лабораторной установки;
- показания вольтметра V_2 и амперметра A , тока и напряжения дугового промежутка;
- показания приборов при изменении дугового промежутка от минимального (загорания дуги) до максимального (гашения дуги). Описать характер изменения процесса горения дуги, отраженного осциллографом.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение дуги.
2. Назовите области дугового разряда.
3. Когда гасится дуга в выключателях переменного тока.
4. Что такое напряжение дуги и напряжение дугового промежутка.
5. Объясните понятие «восстанавливающееся напряжение».
6. Перечислите и охарактеризуйте способы гашения дуги в аппаратах напряжением до 1000 В и выше.
7. Объясните принцип распределения между многократными разрывами.
8. Как влияет сопротивление Z (см. рис. 4.1) на процесс горения и гашения дуги удлинением.

ПРИЛОЖЕНИЕ

к лабораторному занятию № 4
материал для самостоятельной проработки студентом

4.1. Процессы, происходящие в электрической дуге

Изучение конструкций коммутационных аппаратов должно предшествовать рассмотрению основных процессов, происходящих в электрической дуге.

Электрическая дуга (дуговой разряд) – самостоятельный разряд в газе, т.е. разряд, протекающий без внешнего ионизатора. Он характеризуется высокими температурой столба дуги и плотностью тока, а также сравнительно небольшим падением напряжения у катода. Горение дуги в вакууме является исключением и должно рассматриваться особо.

Выделяют следующие области дугового разряда: *катодного падения напряжения у анода и столб дуги.*

Область катодного падения напряжения – тончайший слой газа у поверхности катода. Падение напряжения в этом слое составляет 10...20 В, а напряженность электрического поля достигает $10^5 \dots 10^6$ В/см. Энергия, подводимая из сети, используется на выделение электронов с поверхности катода. Электроны освобождаются двумя способами:

- а) термоэлектронной эмиссией для тугоплавких электродов при их высокой температуре, достигающей до 6000 К и выше;
- б) автоэлектронной эмиссией, которая характеризуется вырыванием электронов из катода под действием сильного электрического поля при «холодном» катоде.

Освободившиеся электроны движутся через дуговой столб к аноду и образуют в его зоне отрицательный объемный заряд. Падение напряжения в этой зоне составляет несколько вольт.

Дуговой столб представляет собой плазму, т.е. ионизированный газ температурой до 20000 К со сбалансированным содержанием ионов и электронов, движению которых препятствует нейтральный газ. В связи с этим происходят частые соударения ионов и электронов с нейтральными частицами. Однако длина свободного пробега электронов при высоком давлении мала, а значит потеря энергии недостаточна для ионизации частиц. В результате этого энергия электронов передается нейтральному газу в виде теплоты.

Основным различием дуговых разрядов при высоком и низком давлениях является то, что ионы, электроны, а также нейтральные молекулы и атомы находятся в дуговом столбе в тепловом равновесии. Это объясняется тем, что дополнительная энергия, которую получают электроны и ионы в своем направленном движении вдоль оси дугового столба, незначительна

по сравнению с тепловой энергией газа, так как градиент напряжения и длина свободного пробега малы. Поэтому средняя энергия «электронного газа» не может существенно превысить среднюю энергию нейтрального газа.

При высоком давлении газа атомы и молекулы преобладают над электронами и имеют почти такую же температуру, поэтому они ионизируются при соударениях с нейтральными частицами, а не при столкновениях с электронами. Такой процесс называется термической ионизацией.

В дуговом столбе имеются потери энергии, которые возмещаются энергией из сети. Основная часть энергии уносится из дуги возбужденными и ионизированными атомами и молекулами. Вследствие разности концентраций заряженных частиц в дуговом столбе и окружающем пространстве, а также разности температур ионы диффундируют к поверхности дугового столба и нейтрализуются. Эти потери должны компенсироваться образованием новых ионов и электронов, т.е. ионизацией газа, связанной с затратами энергии.

4.2. Процесс отключения дуги выключателя

Размыкание контактов выключателя не приводит к немедленному прерыванию тока, так как образовавшийся разрыв перекрывается дугой, сопротивление которой мало. По мере приближения силы тока к нулю температура ионизации и проводимость дугового промежутка быстро уменьшаются и в какой-то момент времени, близкий к моменту естественного достижения нуля током, дуга гасится (рис. 4.2, а).

В этот момент промежуток между расходящимися контактами в некоторой степени еще ионизирован, что определяется отставанием тепловых процессов от изменения тока. После гашения дуги процесс превращения дугового промежутка из проводника в диэлектрик происходит довольно быстро, но не мгновенно. В этот же период времени восстанавливается напряжение на контактах выключателя. Пока горит дуга, напряжение на разрыве U_0 относительно мало. В момент гашения дуги оно изменяет знак и восстанавливается до напряжения сети, близкого к амплитудному.

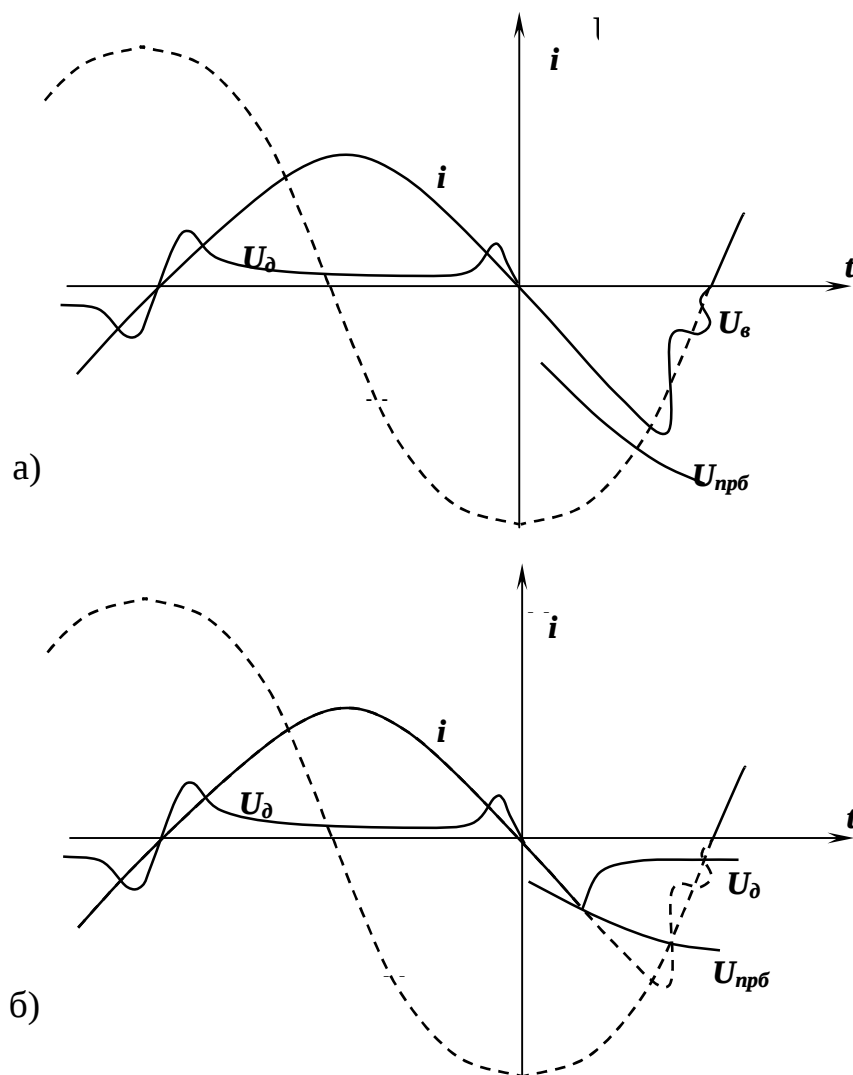


Рис. 4.2. Гашение (а) и зажигание (б) дуги

Если восстанавливающаяся электрическая прочность промежутка (напряжение, необходимое для пробоя промежутка) $U_{прб}$ превышает восстанавливающееся напряжение $U_в$, дуга не возникает (рис. 4.2, а).

В противном случае происходит зажигание дуги (рис. 4.2, б). Через половину периода процесс повторяется, но за это время контакты разойдутся на большее расстояние, что способствует гашению дуги. Обычно дуга в выключателе горит 1 - 3 полупериода.

Для успешного отключения цепи необходимо, чтобы $U_{прб}$ (изоляционное свойство промежутка) увеличивалось быстрее чем напряжение, приложенное к контактам. Для этой цели выключатели снабжают дугогасительными устройствами, обеспечивающими эффективную деионизацию дугового столба.

4.3. Способы гашения дуги в аппаратах напряжением до 1000 В

1. Удлинение дуги быстрым разведением контактов до момента, когда напряжение источника не в состоянии поддерживать дугу на таком расстоянии.

Деление дуги на участки с помощью токопроводящих пластин (рис. 4.3). В этом случае напряжение дуги U_d будет состоять из n участков с анодным U_a и катодным U_k падениями напряжения и падением напряжения в столбе дуги U_c :

$$U_d = \sum_1^n (U_a + U_k + U_c)$$

Когда падение напряжения в дуге будет меньше напряжения источника, дуга погаснет. Эффективность такого способа гашения дуги заключается в том, что сумма катодного и анодного падений напряжения значительно больше падения напряжения в столбе неразделенной дуги.

Для дуги постоянного тока

$$U_k + U \approx 20 \dots 25 \text{ В}$$

Дугу переменного тока тоже можно разделить на участки. В момент прохождения тока через нуль околосреднее пространство приобретает электрическую прочность 150...250 В.

2. Дуга в узких щелях из дугостойких изоляционных материалов (рис. 4.3) гасится интенсивным охлаждением и деионизацией столба дуги, которая соприкасается с материалом щели.

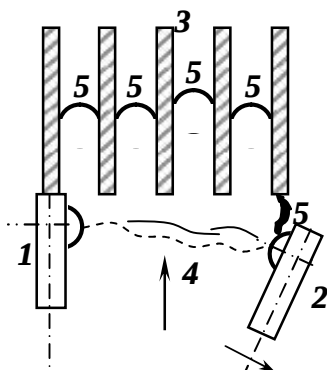


Рис.4.3. Деление дуги: 1,2 – контакты выключателя; 3 – дугогасительные токопроводящие пластины; 4 – исходная дуга в момент размыкания сети; 5 – дуга в момент ее гашения в конечной фазе отключения

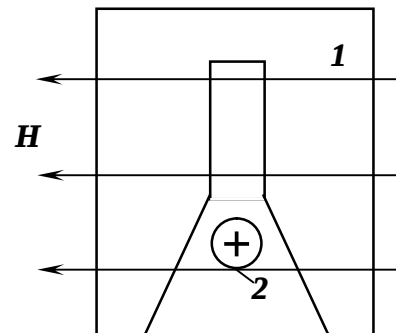


Рис.4.4. Гашение дуги в узких щелях; 1 – дугогасительная пластина; 2 – дуга, в которой ток протекает перпендикулярно к рисунку в направлении «от нас»; H – напряженность магнитного поля

3. Движение дуги в магнитном поле. Если дугу поместить в магнитное поле, направленное перпендикулярно к ее оси, дуга начнет перемещаться, так как она представляет собой проводник стоком. В радиальном магнитном поле (рис.4.5) дуга будет вращаться и перемещаться, что способствует ее интенсивному охлаждению и деионизации.

Магнитное поле может быть создано постоянными магнитами, специальными катушками или самим контуром протекания отключаемого тока. Способы гашения дуги в узких щелях и движение в магнитном поле используются также в аппаратах напряжением выше 1000 В.

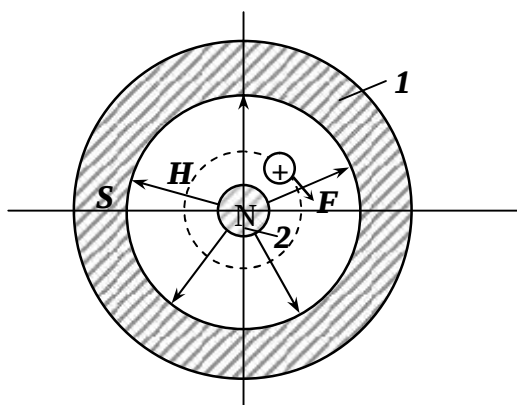


Рис. 4.5. Вращение дуги: 1,2 – полюса магнита (N и S);
F – сила, действующая на дугу

4.4. Основные способы гашения дуги в аппаратах Напряжением 1000 В и более

I. Гашение дуги в масле. Горение дуги в масле приводит к его интенсивному газообразованию и испарению. Вокруг дуги образуется газовый пузырь (рис. 4.6), состоящий в основном из водорода (70 – 80 %). Быстрое разложение масла приводит к повышению давления в пузыре, что способствует лучшему охлаждению и деионизации дуги, так как водород обладает высокими дугогасящими свойствами, а в газовом пузыре газ непрерывно движется.

II. Газовоздушное дутье. Используется принцип направленного

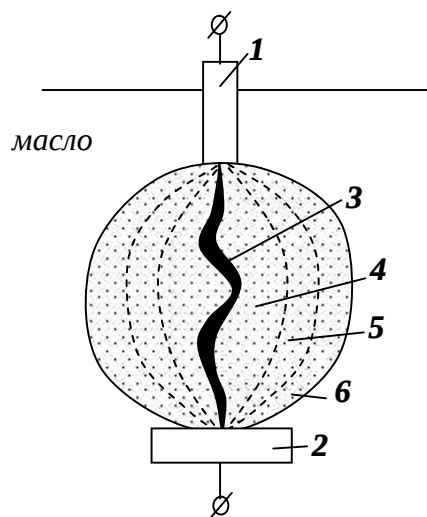


Рис. 4.6. Гашение дуги в масле:
1 – подвижный контакт; 2 – неподвижный контакт; 3 – ствол дуги; 4 – водородная оболочка; 5 – зона газа; 6 – зона пара

движения газов как вдоль (рис. 4.7, а), так и поперек дуги (рис. 4.7, б), что способствует проникновению газовых частиц в ствол дуги, интенсивной диффузии и охлаждению дуги.

Источники газового дутья:

- продукты разложения масла дугой (масляные выключатели;
- продукты разложения твердых газогенерирующих материалов (автогазовое дутье);
- специальные баллоны со сжатым холодным неионизированным воздухом (воздушные выключатели).

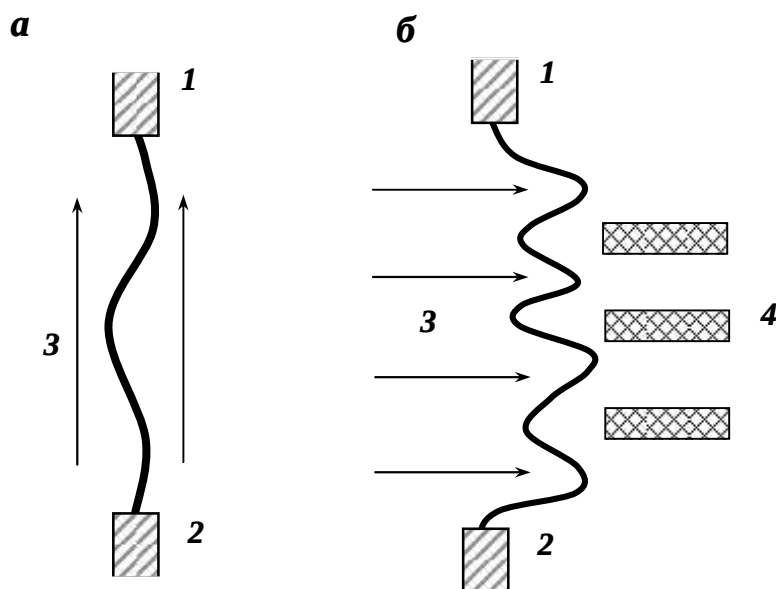


Рис. 4.7. Газо-воздушное дутье по принципу направленного движения газов вдоль (а) и поперек (б) дуги:

1, 2 – контакты выключателя; 3 – направленное движение газа;
4 – изоляционные дугостойкие пластины

III. Многократный разрыв цепи тока. Отключение больших токов на высоких напряжениях связано с проблемой больших энергий, подводимых из сети, что усложняет процесс де ионизации дугового промежутка. Использование многократных разрывов цепи на фазу позволяет уменьшить мощность гасимой дуги, так как прикладываемое к дуговому промежутку напряжение будет меньше номинального. Число разрывов зависит от конструкции выключателя и напряжения, на котором он используется. Для примера можно сказать, что в выключателях напряжением 500.....750 кВ может быть больше 12 разрывов на фазу. Для облегчения гашения дуги напряжение сети необходимо равномерно распределить между разрывами. С этой целью используются емкостные (рис. 4.8, а) и активные (рис. 4.8, б) делители напряжения. В выключателе с активным делителем напряжения (с шунтирующими сопротивлениями) необходимо создать разрыв цепи,

который реализуется вспомогательными контактами (ВК). Ток отключения ВК ограничен шунтирующими сопротивлениями.

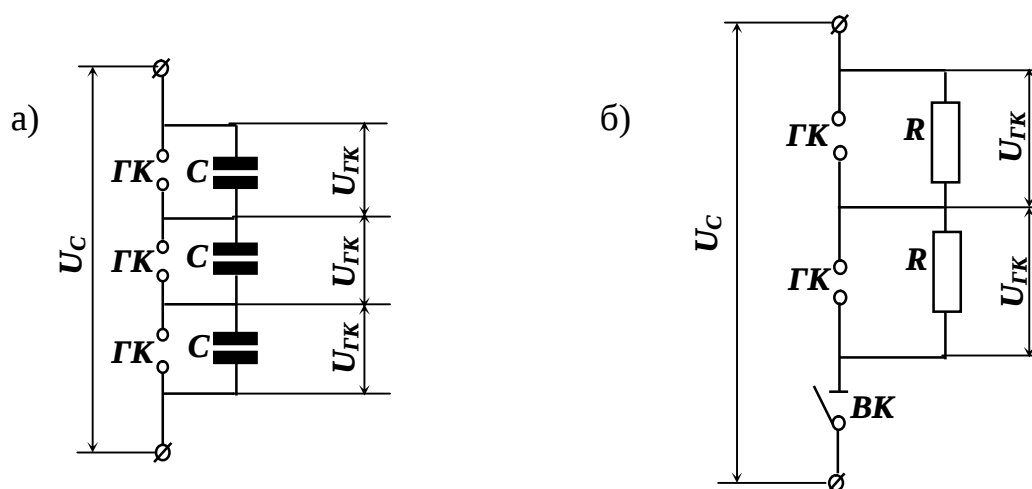


Рис. 4.8. Делители напряжения:

а – емкостные; б – активные: ГК – главные контакты выключателя;
 C – емкость; R – активное сопротивление; U_c – напряжение сети;
 $U_{ГК}$ – напряжение, приложенное к главным контактам выключателя

Рассмотрим масляный выключатель при однофазном коротком замыкании. Напряжение, прикладываемое к разрывам цепи, не одинаковое и зависит от емкости контактной системы относительно земли (рис. 4.9).

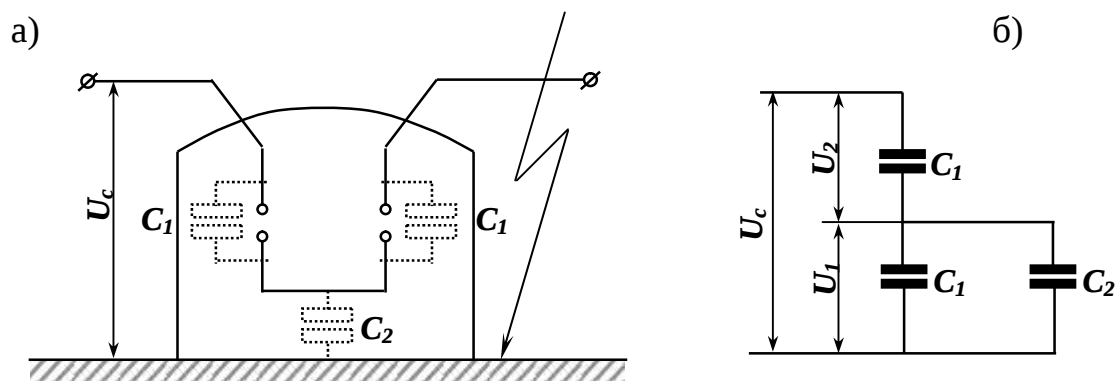


Рис. 4.9. Масляный выключатель:

а – конструктивные особенности; б – схема замещения;
 C_1 – емкость разрывов; C_2 – емкость контактной системы относительно земли;
 U_c – напряжение сети; U_1 – напряжение прикладываемое к правому контакту выключателя; U_2 – напряжение прикладываемое к левому контакту выключателя

Напряжение между контактами распределяется следующим образом:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1},$$

а так как $C_2 > C_1$, то $U_1 > U_2$, и гасительные устройства будут работать в неодинаковых условиях.

4.5. Горение дуги в вакууме

Описанные процессы происходили в электрической дуге, горящей в окружении газа, находящегося под высоким давлением. Высокоразреженный газ $10^{-6} \dots 10^{-8}$ Н/см² также обладает большой электрической прочностью, которая во много раз больше, чем у воздуха при атмосферном давлении. Вследствие глубокого вакуума достигается быстрая диффузия заряженных частиц в окружающее пространство, что позволяет восстанавливать прочность дугового промежутка сразу же после прохождения тока через нуль и избегать повторного загорания дуги.

Принцип дугогашения в вакууме

При размыкании контактов в вакуумной дугогасительной камере возникает электрическая дуга. Напряжение на дуге не превышает нескольких десятков вольт. При уменьшении тока до величины близкой нулю (ток среза) дуга за короткий промежуток времени (приблизительно 10^{-5} с) гаснет. Благодаря высокой электрической прочности вакуума (приблизительно 30 кВ/мм) гарантированное отключение происходит, если расстояние между контактами больше 1 мм, а ток уменьшился до величины тока среза.

4.6. Гашение дуги в элегазе

Шестифтористая сера SF₆ (элегаз) имеет большую электрическую прочность по сравнению с воздухом и водородом. Кроме того, она обладает высокими дугогасительными свойствами даже при атмосферном давлении. Процесс горения и гашения дуги в элегазе аналогичен тому, который уже был рассмотрен ранее для газов с большим давлением.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

Тема: Исследование плавких предохранителей



Время: 2 часа.

Место проведения: помещение 167.

Цель: 1. Ознакомиться с конструкцией и техническими данными низко-вольтовых предохранителей типов ПР-2, ПН-2, НППН-60.
2. Снять времятоковую характеристику плавкой вставки.

План

1. Вводная часть - 5 мин.
2. Основная часть - 80 мин:
 - а) подготовка к работе испытательной установки - 5 мин;
 - б) ознакомиться с установкой и ее техническими характеристиками - 10 мин;
 - в) изучить установку и принцип ее работы - 10 мин;
 - г) снять характеристики - 30 мин;
 - д) оформление работы - 20 мин;
 - е) защита работы - 5 мин.
3. Заключительная часть - 5 мин.

В результате проведения лабораторного занятия студенты должны **ЗНАТЬ:**

1. Принцип работы и основные элементы лабораторной установки;
2. Как получить экспериментальные исследования для построения времятоковой характеристики $t = f(I/I_H)$.

УМЕТЬ:

1. Подготовить лабораторную установку к работе.
2. Построить времятоковую характеристику $t = f(I/I_H)$.

Литература

1. Яштуин В. М., Анисимов О. Ю. Электрические аппараты. - Севастополь: СИЯЭиП, 1999.
2. Яштуин В. М. Электрические аппараты: альбом рисунков к учебному пособию. - Севастополь: СИЯЭиП, 1997.
3. Чунихин А. А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 718 с.
4. Бурда А. Г. Обучение в электромонтажных мастерских / А.Г. Бурда. – М.: Радиосвязь, 1988. – 232 с.
5. Кисаримов Р. А. Справочник электрика / Р.А. Кисаримов. – М.: Радио Софт, 1999. – 320 с.
6. Лабораторный практикум по электрическим аппаратам / Ю. Н. Новиков [и др.]. – М.: Высш. шк., 1971. – 196 с.
7. Электрические аппараты : учебник и практикум для академического бакалавриата / Под ред. П.А. Курбатова. - М.: Издательство Юрайт, 2018. - 250 с. - (Серия : Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-9715-6.

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАНЯТИЯ № 5

1. Теоретическое обоснование работы

Перечень приборов и оборудования (из расчёта на одно рабочее место): установка для изучения работы плавких предохранителей; ЛАТР; нагрузочный трансформатор 220/12 В мощностью 250 В·А; магазин сопротивлений (МС); электронный секундомер (ЭС); амперметр переменного тока с пределом измерения 20 А; три вольтметра переменного тока с пределом измерения 20 В; комплект плавких предохранителей; комплект соединительных проводов.

1.1. Основные сведения

Плавким предохранителем называют электрический аппарат, который при токе, больше определённого значения, размыкает электрическую цепь путём расплавления плавкой вставки, непосредственно нагретой током до расплавления.

Предохранители можно классифицировать по степени закрытия плавкой вставки:

- а) на предохранители с открытой плавкой вставкой (применяются редко);
- б) предохранители с полузакрытым патроном;

в) предохранители с закрытым патроном, в которых отсутствует выброс пламени дуги при перегорании плавкой вставки.

Предохранители с закрытым патроном могут быть с наполнителем и без него. В предохранителях с наполнением дуга гасится в порошкообразном наполнителе, а в предохранителях без наполнителя – вследствие высокого давления газов в патроне.

Материалы для плавких вставок должны иметь малое удельное сопротивление, небольшую температуру плавления и, кроме того, должны быть стойкими к окислению.

В современных предохранителях для плавких вставок обычно применяются медь, цинк, серебро.

Медь по сравнению с цинком имеет малое удельное сопротивление, что позволяет применять плавкие вставки небольшого сечения.

Однако медь имеет весьма высокую температуру плавления (около 1083 °С) и подвержена окислению.

Серебро, как и медь, имеет малое удельное сопротивление и, кроме того, не окисляется, что обуславливает высокую стабильность пограничных токов серебряных вставок. Температура плавления серебра – 961 °С.

В предохранителях с медными или серебряными вставками при небольших токах перегрузки возможен значительный нагрев патрона предохранителя и его разрушение. Одним из способов снижения температуры плавления вставки является применение металлургического эффекта, когда на медную или серебряную вставку напаивают шарики из металла с низкой температурой плавления (олово, свинец). При нагреве от тока перегрузки шарик плавится и растворяет в себе металл вставки, что приводит, в конечном счёте, к изменению сечения вставки и её расплавлению в этом месте. Металлургический эффект способствует заметному снижению времени перегорания вставок при небольших токах перегрузки.

К достоинствам цинковых вставок следует отнести, помимо невысокой температуры плавления (419 °С), неизменность их сечения при эксплуатации.

Основными параметрами предохранителей являются:

а) $I_{ном. патр}$ – номинальный ток патрона – максимальный ток, при котором токоведущие и контактные части нагреваются не выше допустимой температуры;

б) $I_{ном. вст}$ – номинальный ток вставки – длительный рабочий ток, при котором плавкая вставка не должна перегорать;

в) $I_{ном. откл}$ – предельный ток отключения предохранителя.

Полное время отключения цепи предохранителем складывается из времени нагрева вставки до плавления, времени перехода из твёрдого состояния в жидкое (плавление) и времени горения (гашения дуги):

$$t_{откл} = t_{нагр} + t_{пл} + t_{дуги}. \quad (5.1)$$

Зависимость полного времени отключения цепи плавким предохранителем от тока называют времятоковой, или защитной характеристикой.

Предохранитель будет защищать объект лишь в том случае, если его защитная характеристика располагается несколько ниже защитной характеристики, защищаемого объекта при любом значении тока в цепи (рис. 5.1).

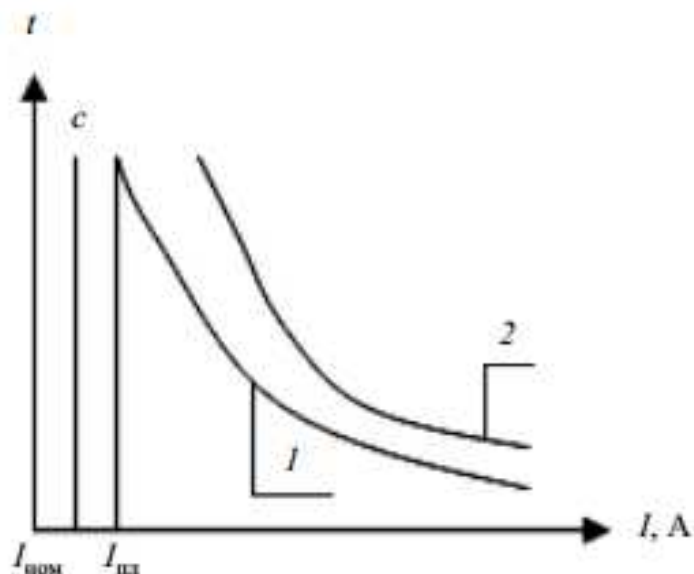


Рис. 5.1. Защитная характеристика предохранителя:
1 – характеристика предохранителя; 2 – характеристика объекта

Крутизна защитной характеристики предохранителя определяет быстродействие срабатывания предохранителя и, следовательно, надёжность защиты.

Значение тока, при котором вставка предохранителя не перегорает в течение длительного времени, называется пограничным током.

Номинальный ток плавкой вставки должен быть меньше пограничного тока.

Для обычных предохранителей отключение 5-10-кратного тока происходит примерно за время 0,5...0,1 с, а 1,5-2-кратного тока – за 20...50 с.

Для цепей, требующих большего быстродействия защиты, созданы специальные быстродействующие предохранители (серия ПНБ), которые отключают 5-10-кратный ток за время не более 0,01 с, а 1,5-2-кратный ток – за 10 с.

В некоторых случаях требуется, наоборот, повышение инерционности срабатывания предохранителя, например для защиты асинхронных двигателей с прямым пуском. Для таких цепей имеются специальные инерционные предохранители с двумя различными плавкими вставками, что обуславливает двухступенчатый вид защитной характеристики с различной крутизной.

Каждый тип предохранителя изготавливают на определённый номинальный наибольший ток, а плавкие вставки к нему делают на несколько значений номинального тока. Так, например, предохранитель на номинальный ток 60 А снабжают плавкими вставками на токи 15, 20, 25, 35, 45 и 60 А.

Выбор предохранителя производится:

а) по номинальному напряжению сети:

$$U_{ном} \geq U_{вст}, \quad (5.2)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение предохранителя; рекомендуется номинальное напряжение предохранителя выбирать по возможности равным номинальному напряжению сети;

б) по длительному расчётному току линии:

$$I_{ном. вст} \geq I_{длит}, \quad (5.3)$$

где $I_{ном. вст}$ – номинальный ток вставки;

в) по условиям пуска асинхронных двигателей (с КЗ ротором)

$$I_{ном. вст} = I_{пуск} / \alpha, \quad (5.4)$$

где α – коэффициент, зависящий от условия пуска,

$$\alpha = 1,5 \dots 2,5; \quad (5.5)$$

г) если предохранитель стоит в линии, питающей сразу несколько двигателей с КЗ ротором:

$$I_{ном. вст} = 0,4[I_{расч} + (I_{пуск} - I_{ном. дв})], \quad (5.6)$$

где $I_{расч}$ – расчётный номинальный ток линии, равный $I_{ном. дв}$; разность $(I_{пуск} - I_{ном. дв})$ берётся для двигателя, у которого она наибольшая;

для двигателей с фазным ротором, если

$$I_{пуск} < 2 I_{ном. дв}, \quad (5.7)$$

то

$$I_{ном. вст} \geq (1 \dots 1,25) I_{ном. дв}; \quad (5.8)$$

д) проверка по условиям КЗ:

$$I_{кз} / I_{ном. вст} = 3 \dots 4, \quad (5.9)$$

где $I_{кз}$ – ток КЗ двигателя.

В цепях управления и сигнализации плавкие вставки выбираются по соотношению

$$I_{ном. вст} \geq \sum I_{раб. max} + 0.1 \sum I_{вкл. max}, \quad (5.10)$$

где $\sum I_{раб. max}$.

I – наибольший суммарный ток, потребляемый катушками аппаратов, сигнальными лампами и т.д. при одновременной работе;

$\sum I_{вкл. max}$ – наибольший суммарный ток, потребляемый при включении катушек, одновременно включаемых аппаратов.

2. Задание

2.1. Ознакомиться с конструкцией плавких предохранителей низкого напряжения ПР-2, ПН-2, НПН-60.

2.2. Ознакомиться с установкой к лабораторной работе.

2.3. Заполнить таблицу по техническим данным применяемых электроизмерительных приборов.

2.4. Знать схему подключения и работы установки.

2.5. Получить данные для построения времятоковых характеристик.

2.6. Построить защитные характеристики.

2.7. Составить отчёт по проделанной работе.

2.8. Сделать краткие выводы.

3. Подготовка к лабораторной работе

3.1. Повторить теоретический материал по теме «Плавкие предохранители».

3.2. Подготовить на отдельных листах рабочий материал к данной лабораторной работе.

3.3. Повторить основные правила сборки электрических цепей и подключения электроизмерительных приборов, особенно это относится к электронному секундомеру.

3.4. Изучить методику выполнения лабораторной работы и соответствующие электрические схемы.

3.5. Подготовить таблицу «Технические данные электроизмерительных приборов», которую заполнить при проведении лабораторной работы.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Ознакомиться с конструкцией низковольтных плавких предохранителей по имеющимся образцам, плакатам и справочной литературе.

4.2. Для снятия времятоковых характеристик необходимо собрать схему, представленную на рис. 5.2. Выяснить назначения каждого элемента схемы и применяемых электроизмерительных приборов.

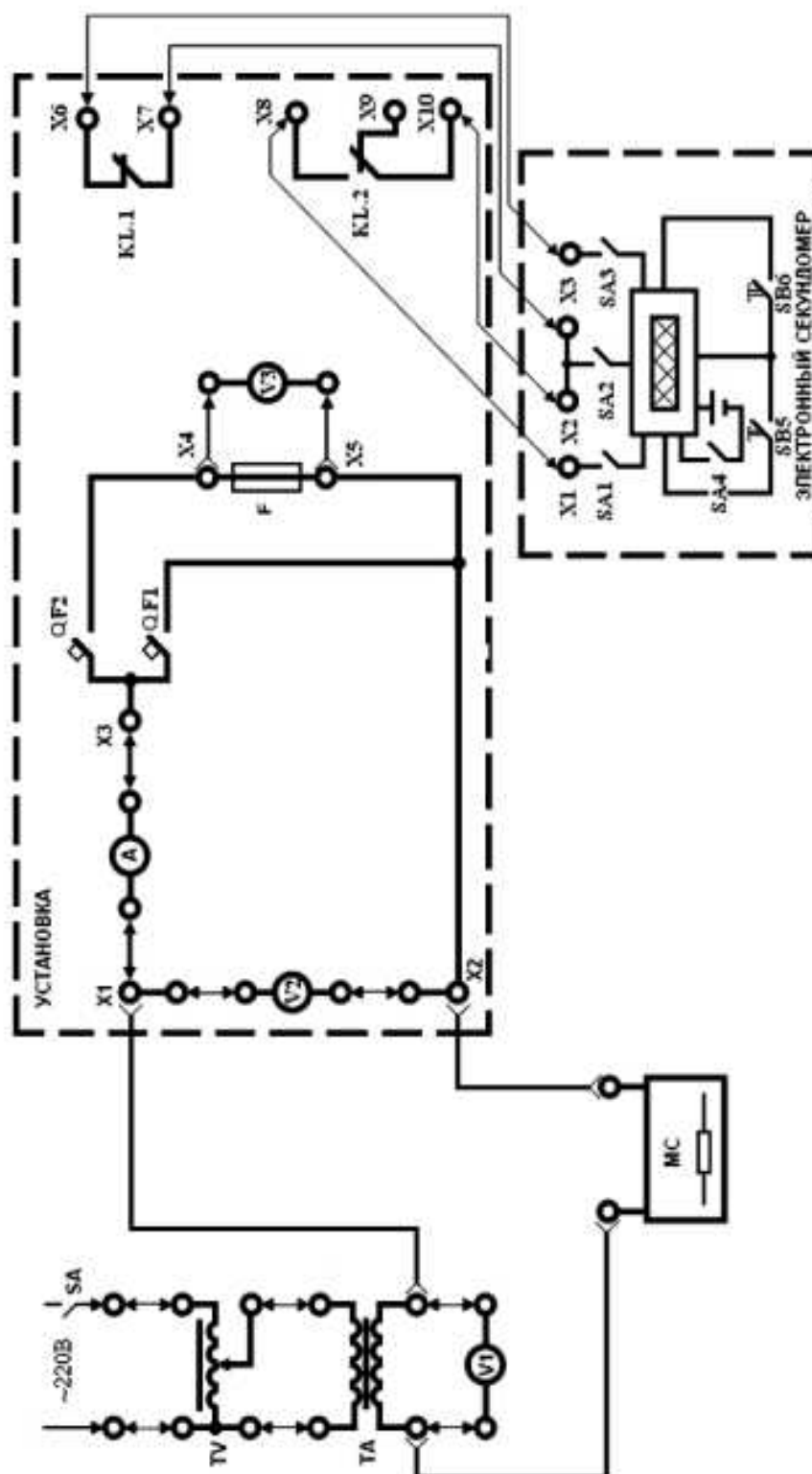


Рис. 5.2. Электрическая схема для изучения плавки предохранителей

5. Описание установки

5.1 Установка для изучения плавких предохранителей и снятия их защитных характеристик состоит из двух цепей: силовой и вспомогательной. Первая клеммами X1, X2 подключается к обмотке низшего напряжения трансформатора ТА (~12 В) через магазин сопротивлений МС и состоит из амперметра переменного тока А с пределом измерения 20 А и двух параллельных ветвей. В первую включён автомат QF1 (ВА47-С25), а во вторую – автомат QF2 (ВА47-С25) с последовательно включённым плавким предохранителем (F) между клеммами X4 и X5.

В схеме производится контроль напряжений: снимаемого с трансформатора ТА – вольтметром V1, входного на установку – вольтметром V2 и на плавкой вставке – вольтметром V3.

Вспомогательная цепь установки содержит два промежуточных реле KL.1 и KL.2, которые реагируют на напряжение разрыва цепи автоматами QF1 и QF2 (это KL.1) и на напряжение между клеммами X4 и X5. Эти реле на схеме не показаны, а лишь их контакты. Размыкающий контакт KL.1 между клеммами X6, X7 осуществляет запуск ЭС при исчезновении напряжения с обмотки реле KL.1 при выключении автомата QF2. Остановка ЭС производится замыкающим контактом KL.2 реле KL.2 при перегорании плавкой вставки предохранителя – появившееся напряжение между клеммами X4, X5 вызывает срабатывание реле KL.2.

Необходимо отметить, что входное напряжение при отключённых одновременно автоматах должно быть не ниже 8,5...9,0 В (контроль по вольтметру V1) для успешного срабатывания промежуточных реле KL.1 и KL.2. Изменения тока плавления (перегрузки) плавкой вставки осуществляется грубо с помощью магазина сопротивлений МС, тонко – с помощью ЛАТРа.

5.2. Схема установки работает следующим образом.

Подключив её к сети (~220 В) через ЛАТР (TV), нагрузочный трансформатор (ТА) и магазин сопротивлений (МС) и включив автомат QF1, выставляют заданный ток перегрузки плавкой вставки ($I_{пер}$), значения которого контролируют амперметром А (включён между клеммами X1, X3 установки); ЭС в это время отключён своими тумблерами SA1, SA2 и SA3.

Далее автомат QF1 отключают и включают ЭС – схема готова к работе.

Включают автомат QF2 и переводят выставленный ранее ток на плавкий предохранитель. Через некоторое время плавкая вставка перегорает; ЭС отключается, фиксируя время работы плавкого предохранителя при заданном токе перегрузки (плавления).

5.3. Получить данные для построения времятоковой характеристики плавкого предохранителя. Для этого в качестве плавкой вставки применяется медная проволока диаметром 0,1...0,3 мм, которая вплавляется в патрон перегоревшего предохранителя. Изготовленный таким образом плавкий предохранитель помещается в держатель установки между клеммами Х4, Х5.

5.4. Согласно методике испытаний, приведённой в п. 4, вначале определяют ток перегрузки, который вызывает практически мгновенное перегорание плавкой вставки. Так, для проволоки диаметром 0,2 мм значение такого тока составляет приблизительно 13...14 А, для проволоки диаметром 0,3 мм – 15...16 А. Этот ток, выставленный через автомат QF1 и затем направленный на плавкую вставку, необходимо держать неизменным до перегорания вставки с помощью ЛАТРа.

Из-за узкой области изменений токов между временем плавления, измеряемого единицами-десятками секунд, и временем плавления, измеряемого десятками минут, рекомендуемый шаг сброса значений тока между отдельными опытами от значения $I_{пер.мгн}$ (значение тока перегрузки, при котором плавкая вставка перегорает мгновенно) составляет приблизительно 0,2...0,3 А.

Таким образом, необходимо получить 4-5 экспериментальных точек для построения времятоковой характеристики плавкой вставки.

Данные эксперимента занести в табл. 5.1, при этом фиксировать значения следующих величин: тока через автомат QF1 I_1 , А; тока через автомат QF2 и плавкую вставку (ток перегрузки) $I_2 \equiv I_{пер}$, А; напряжения на плавкой вставке в момент включения автомата QF2 U_{30} , В и в момент плавления вставки $U_{3пл}$, В; время срабатывания предохранителя $t_{ср}$, мин.

Т а б л и ц а 5.1

Диаметр медной проволоки, мм	I_1 , А	I_2 , А	Напряжение на плавкой вставке		$t_{ср}$, мин	Сопротивление плавкой вставки		$P_{ср}$, Вт
			U_{30} , В	$U_{3пл}$, В		r_{30} , Ом	$r_{3пл}$, Ом	
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Произвести следующие расчёты:

а) сопротивления плавкой вставки, Ом, в момент включения автомата QF2 и в момент её плавления по формулам, считая сопротивления активными:

$$r_0 = U_{30} / I_2; \quad r = U_{3nl} / I_2; \quad (5.11)$$

б) мощность срабатывания плавкого предохранителя:

$$S_p \approx P_{cp} = U_{3nl} I_2, \text{ Вт}. \quad (5.12)$$

Результаты вычислений занести в табл. 5.1.

По данным табл. 5.1 построить следующие зависимости: времятоковую характеристику $t_{cp}(I_2)$; $r_{nl}(I_2)$; $P_{cp}(I_2)$.

Измерить время срабатывания плавкого предохранителя с использованием металлургического эффекта при тех же токах, что и в проводимых измерениях (см. п. 6). Для этого использовать плавкие предохранители с медной проволокой того же диаметра, что и в п. 6, с нанесёнными напаями из олова в средней части. Данные занести в табл. 5.2, при этом произвести аналогичные расчёты (см. п. 7).

Построить по данным табл. 5.2 следующие характеристики:

$$t_{cp}(I_2); \quad r_{nl}(I_2); \quad P_{cp}(I_2).$$

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы по выполненной работе.

Данные для построения защитной характеристики плавкого предохранителя с металлургическим эффектом.

Т а б л и ц а 5.2

Диаметр медной проволоки, мм	$I_1, \text{ А}$	$I_2, \text{ А}$	Напряжение на плавкой вставке		$t_{cp},$ мин	Сопротивление плавкой вставки		$P_{cp},$ Вт
			$U_{30}, \text{ В}$	$U_{3nl}, \text{ В}$		$r_0, \text{ Ом}$	$r_{nl}, \text{ Ом}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Отчётный материал

1. Номер, название и цель лабораторной работы.
2. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы.
3. Перечень электроизмерительных приборов и оборудования.
4. Таблица технических данных электроизмерительных приборов.
5. Электрическая схема.
6. Заполненные табл. 5.1 и 5.2.
7. Графическая и расчётная части.
8. Вывод по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение плавких предохранителей?
2. Требования к материалам плавких вставок.
3. Каково назначение металлургического эффекта в предохранителях?
4. Каковы особенности работы предохранителя при «пограничном» токе?
5. Каковы параметры предохранителей?
6. Как должна располагаться защитная характеристика предохранителя по отношению к времятоковой характеристике защищаемого объекта?
7. Схема включения предохранителей в электрическую цепь.

Методические указания

I. На самостоятельных занятиях накануне проведения лабораторной работы, проработать главу 5 учебного пособия Яшутин В.М., Анисимов О.Ю. «Электрические аппараты» и приготовить отчёт по лабораторной работе. В бланке отчёта по лабораторной работе должно быть указано:

Ф. И. О. студента и номер класса.

II. Нарисован рис. 1 и описана лабораторная установка.

III. Проверяются знания и наличие подготовленных бланков для проведения лабораторной работы. Студенты, не подготовившиеся к проведению лабораторной работы, к занятию не допускаются.

IV. Учебная группа делится на несколько подгрупп и приступает к выполнению лабораторной работы под руководством преподавателя и инженерно-технического состава лаборатории.

V. После выполнения работы, студенты оформляют бланк отчёта и сдают его преподавателю на проверку.

VI. Ответить на контрольные вопросы, указанные в § 5.

VII. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы, во время, отведённое на выполнение лабораторной работы самостоятельно занимаются подготовкой к работе в помещении лаборатории. Выполнение лабораторной работы производится во время, указанное преподавателем.

VIII. Студенты, допущенные к выполнению лабораторной работы, но не выполнившие её по техническим причинам, выполняют экспериментальную часть работы под руководством инженерного состава лаборатории в указанное время.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

Тема: Исследование магнитного пускателя



Время: 2 часа.

Место проведения: помещение 167.

Цель: Ознакомление с конструкцией и принципом работы основных узлов магнитного пускателя, исследование характеристик электромагнитного пускателя, изучение и получение навыков в сборке схем управления нереверсивных коммутационных аппаратов.

План

1. Вводная часть - 5 мин.
2. Основная часть - 80 мин:
 - а) подготовка к работе испытательной установки - 5 мин;
 - б) ознакомиться с установкой и ее техническими характеристиками - 10 мин;
 - в) изучить установку и принцип ее работы - 10 мин;
 - г) снять характеристики - 30 мин;
 - д) оформление работы - 20 мин;
 - е) защита работы - 5 мин.
3. Заключительная часть - 5 мин.

В результате проведения лабораторного занятия студенты должны **ЗНАТЬ:**

1. Принцип работы и основные элементы лабораторной установки.

2. Исследование характеристик электромагнитного пускателя, навыки в сборке схем управления нереверсивных коммутационных аппаратов.
3. Методы защиты в магнитных пускателях.

УМЕТЬ:

1. Подготовить лабораторную установку к работе.
2. Исследовать характеристики электромагнитного пускателя.
3. Осуществлять операции пуск и остановку.

Литература

1. Чунихин А. А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 718 с.
2. Бурда А. Г. Обучение в электромонтажных мастерских / А.Г. Бурда. – М.: Радиосвязь, 1988. – 232 с.
3. Кисаримов Р. А. Справочник электрика / Р.А. Кисаримов. – М.: Радио Софт, 1999. – 320 с.
4. Лабораторный практикум по электрическим аппаратам / Ю.Н. Новиков [и др.]. – М. : Высш. шк., 1971. – 196 с
5. Электрические аппараты: учебник и практикум для академического бакалавриата / Под ред. П. А. Курбатова. - М.: Издательство Юрайт, 2018. - 250 с. - (Серия : Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-9715-6.

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАНЯТИЯ № 6

I. Программа выполнения работы:

- изучить принцип работы и основные элементы лабораторной установки;
- исследование характеристик электромагнитного пускателя;
- изучение и получение навыков в сборке схем управления нереверсивных коммутационных аппаратов.

II. Порядок выполнения работы:

2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой и собрать электрическую схему магнитного пускателя (см. *Описание лабораторной установки рис. 6.1*).

2.2. Установить движок ЛАТР в нулевое положение и включить напряжение.

2.3. Плавным увеличением напряжения зафиксировать ток и напряжение срабатывания **Усрб**. И **Исрб** притяжения якоря **МП** (лампа индикатора загорается). Данные записать в табл. 6.1.

2.4. Увеличить напряжение до номинального значения катушки магнитного пускателя и зафиксировать ток включения **$I_{вкл.}$** (табл. 2.1).

2.5. Плавно уменьшить напряжение и определить величину напряжения возврата **$U_{воз}$** отпадания якоря. Зафиксировать значение тока **$I_{воз}$** и напряжения в этот момент (табл. 6.1).

2.6. Коэффициент возврата **$K_v = U_{воз}/U_{срб.}$** . Кратность пускового тока **$K_n = I_{срб.}/I_{вкл.}$** .

Т а б л и ц а 6.1

Результаты исследования

Номер опыта	1	2	3
Напряжение срабатывания $U_{срб.}, В$			
Ток срабатывания при не втянутом якоре $I_{срб.}, А$			
Ток при втянутом якоре $I_{вкл.}, А$			
Напряжение возврата $U_{воз.}, В$			
Ток возврата $I_{воз.}, А$			

2.7. Опыт повторить несколько раз с перерывом в 5-6 мин во избежание перегрева катушки магнитного пускателя. Данные записать в табл. 6.1.

2.8. Вычислить параметры катушки магнитного пускателя.

2.9. Номинальная полная мощность катушки **$S_H = I_{вкл.} \cdot U_H$** .

2.10. Пусковая полная мощность катушки **$S_{пуск} = I_{срб.} \cdot U_H$** .

2.11. Собрать схему управления АД с нереверсивным МП по рис. 6.1.

2.12. Выполнить пуск и остановку АД, определив ток, потребляемый обмоткой контактора.

2.13. Собрать электрическую схему для исследования магнитного пускателя рис. 6.2 а, б.

Описание лабораторной установки

Кинематическая и электрическая схемы установки представлены на рис. 6.1.

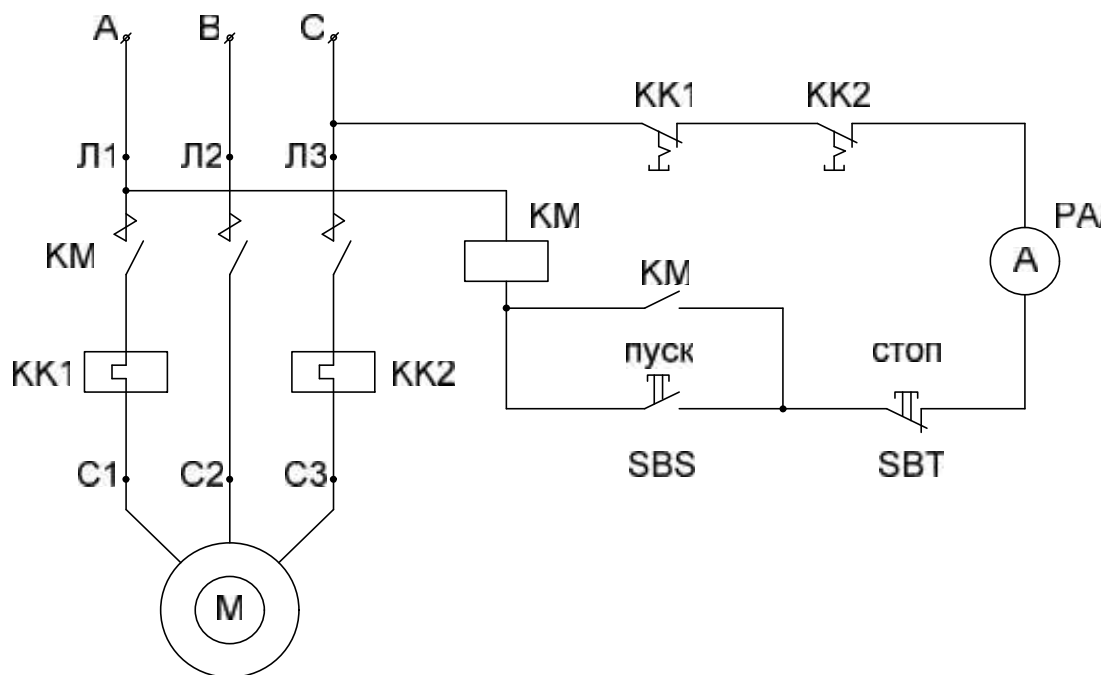


Рис. 6.1. Кинематическая и электрическая схемы лабораторной установки

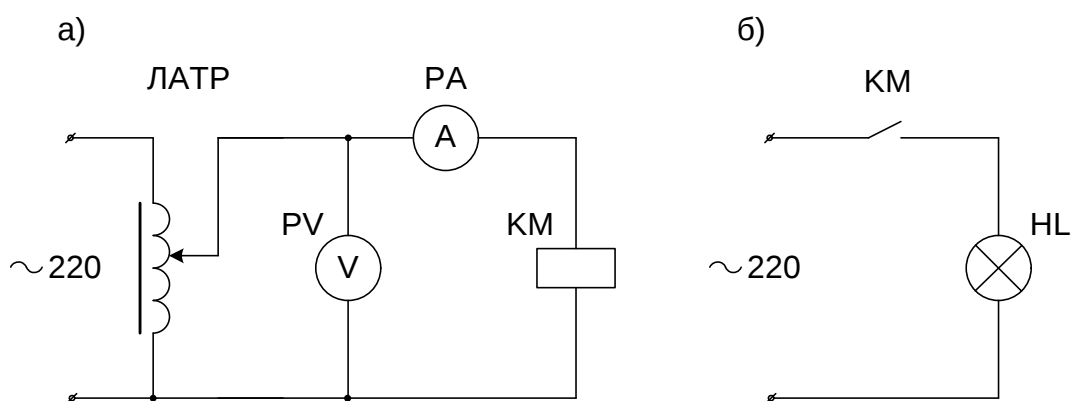


Рис. 6.2 Схема исследования магнитного пускателя:
а – включение катушки пускателя; б – включение индикатора

III. Содержание и оформление отчёта:

- Ф. И. О. студента и номер класса.
- Нарисован рис. 6.1 и описана лабораторная установка.
- Расчерчена и заполнена таблица измерений и вычислений.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип работы магнитного пускателя.
2. Как осуществляется защита потребителей от перегрузки и токов КЗ?

3. Объясните принцип работы реверсивной схемы управления МП.
4. Способы гашения дуги в магнитных пускателях.
5. Выбор магнитных пускателей.
6. Назначение короткозамкнутых витков на сердечнике магнитного пускателя.
7. Какое исполнение имеют магнитные пускатели серии МПЕ и как расшифровываются?
8. Какова номинальная шкала токов магнитных пускателей серии ПМЛ?
9. Какие элементы содержит магнитный пускатель?
10. В чем разница между магнитным пускателем и контактором?
11. Как расшифровываются типы магнитных пускателей ПМЛ-1100 и ПМЛ-2501?

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

Тема: Исследование воздушных автоматических выключателей



Время: 2 часа.

Место проведения: помещение 167.

Цель: 1. Ознакомиться с конструкциями воздушных автоматических выключателей (автоматов).

2. Определение времени отключения автомата (времени срабатывания расцепителя автомата) в зависимости от величины тока, протекающего через автомат.

План

1. Вводная часть - 5 мин.
2. Основная часть - 80 мин:
 - а) подготовка к работе испытательной установки - 5 мин;
 - б) ознакомиться с установкой и ее техническими характеристиками - 10 мин;
 - в) изучить установку и принцип ее работы - 10 мин;
 - г) снять характеристики - 30 мин;
 - д) оформление работы - 20 мин;
 - е) защита работы - 5 мин.
3. Заключительная часть - 5 мин.

В результате проведения лабораторного занятия студенты должны **ЗНАТЬ:**

1. Принцип работы и основные элементы лабораторной установки.
2. Принцип работы тепловых и электромагнитных расцепителей.
3. Основные узлы конструкции автомата и их назначение.
4. Основные параметры и характеристики автомата.
5. Методика снятия защитной характеристики автомат.

УМЕТЬ:

1. Подготовить лабораторную установку к работе.
2. Снять защитную характеристику автомат.

Литература

1. Чунихин А. А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 718 с.
2. Бурда А. Г. Обучение в электромонтажных мастерских / А. Г. Бурда. – М.: Радиосвязь, 1988. – 232 с.
3. Кисаримов Р. А. Справочник электрика / Р.А. Кисаримов. – М.: Радио Софт, 1999. – 320 с.
4. Лабораторный практикум по электрическим аппаратам / Ю.Н. Новиков [и др.]. – М.: Высш. шк., 1971. – 196 с.
5. Электрические аппараты : учебник и практикум для академического бакалавриата / Под ред. П.А. Курбатова. - М.: Издательство Юрайт, 2018. - 250 с. - (Серия: Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-9715-6.

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАНЯТИЯ № 7

1. Теоретическое обоснование работы

Приборы и оборудование

Амперметр Э365, $I_n = 100$ А.

Нагрузочный трансформатор $U_{1н} = 220$ В, $U_{2н} = 6$ В.

Автоматические выключатели различного вида исполнения

Электросекундомер ПВ-53.

Автоматический воздушный выключатель (автомат) – это аппарат, предназначенный для нечастых включений и отключений электрической цепи при нормальной нагрузке, а также для автоматического отключения цепи при возникновении ненормальных режимов, перегрузки, коротких замыканий и исчезновения или снижения напряжения.

Название «воздушный» выключатель получил потому, что электрическая дуга, возникающая между его контактами при отключении цепи, гасится в среде окружающего воздуха.

Различают несколько разновидностей выключателей: универсальные (работают на постоянном и переменном токе), установочные (предназначаются для установки в общедоступных помещениях), быстродействующие постоянного тока, гашения магнитного поля мощных генераторов и др.

Структурная схема конструкции универсальных и установочных автоматов в основном одинакова. Контакты К производят замыкание и размыкание электрической цепи. Они заключены в дугогасительную камеру, назначение которой – быстро гасить дугу и предотвращать выброс ионизированных газов из дугового промежутка

Контакты К связаны с приводом П через механизм свободного расцепления МСР, на который могут воздействовать также установленные в автомате различные расцепители РЗ, РН и отключающая катушка ОК. Благодаря наличию МСР, отключение автомата происходит при возникновении аварийного режима независимо от положения рукоятки привода.

Расцепители выполняют роль защитных элементов, реагирующих на отклонение определенного параметра от своего нормального значения. Они представляют собой электромагнитные или термобиметаллические реле, измерительные органы которых включены в электрическую цепь, а исполнительные – воздействуют на отключение контактов автомата К.

Автоматы могут снабжаться блок-контактами БК. Установочные автоматы чаще всего используются для защиты электроустановок от сверхтоков перегрузки и коротких замыканий КЗ. Этот тип автоматов позволяет заменить собой в распределительных устройствах неавтоматические выключатели и предохранители. Их применение вместо плавких предохранителей имеет следующие преимущества:

- при перегрузках или КЗ отключаются сразу три фазы, что устраняет возможность неполнофазного режима работы трехфазных двигателей;
- снижаются простои, так как на включение сработавшего автомата требуется меньше времени, чем на замену перегоревшего предохранителя,
- времятоковые характеристики защиты от перегрузок автоматов больше соответствуют параметрам защищаемого электрооборудования, чем предохранители.

Выключатели состоят из следующих основных элементов: главной контактной системы, дугогасительной системы, привода, расцепляющего устройства, расцепителей и вспомогательных контактов.

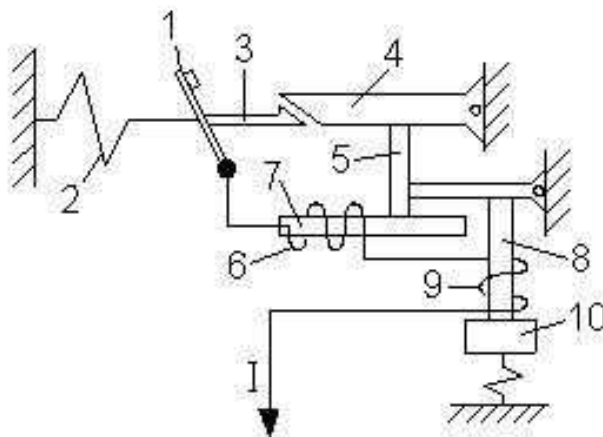


Рис. 7.1. Эскиз кинематических связей

При номинальном режиме ток проходит по контактам **1**, нагревательному элементу **6** и катушке **9** электромагнитного расцепителя и далее к нагрузке (рис. 7.1). При нагрузке ток, проходя по нагревателю теплового реле, нагревает биметаллическую пластину **7**, которая изгибается и действует на рычаг **5**, который связан с защёлкой **4**, которую он приподнимает. Защёлка **3** освобождается и под действием пружины **2** контакт **1** размыкается. При КЗ электромагнит **9** расцепителя втягивает сердечник **10** и толкателем **8** воздействует на рычаг **5**, происходит автоматическое отключение.

I. Программа выполнения работы

- Изучить принцип работы и основные элементы лабораторной установки;
- Снять защитную характеристику автомата.

II. Порядок выполнения работы

- Ознакомиться с конструкцией и принципом действия автомата.
- Составить эскиз кинематических связей подвижных элементов автомата, паспортные характеристики которого представлены в табл. 7.1.

Т а б л и ц а 7.1

Паспортные данные исследуемого автомата

Тип автомата	U_n , В	I_n , А	Число полюсов	Вид расцепителя	Ток расцепителя	Кратность тока расцепителя

2. Собрать электрическую схему, рис. 7.1.

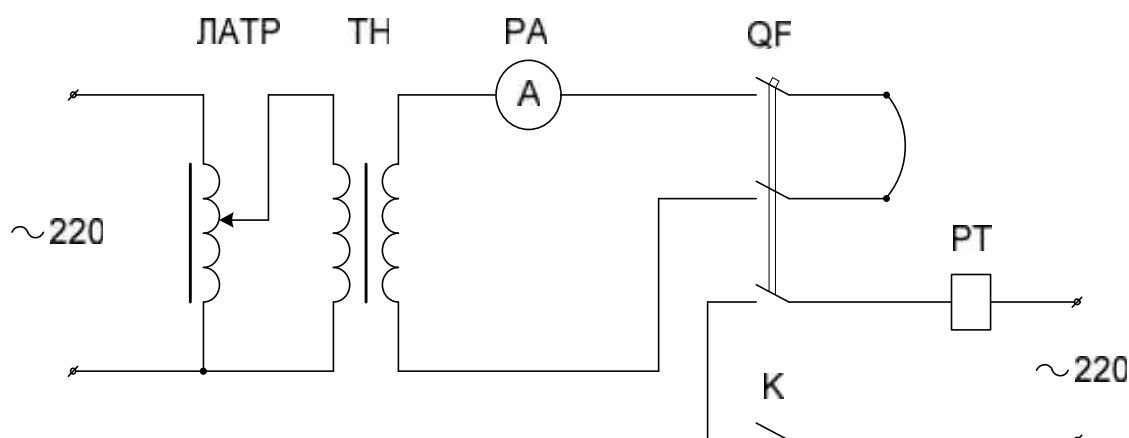


Рис. 7.1. Схема исследования автоматического выключателя

3. Автомат QF отключить, а движок ЛАТРа установить в нулевое положение.

4. Включить автомат QF и замкнуть ключ К. Проверить работоспособность электросекундомера и обнулить его.

5. Разомкнуть ключ К. Регулятором напряжения ЛАТР быстро установить ток 15 А и отключить автомат.

6. Через 2 мин включить автомат QF. Одновременно замкнуть ключ К и подключить нагрузочный трансформатор ТН к источнику регулируемого напряжения.

7. В момент срабатывания автомата зафиксировать значение тока и время срабатывания по электросекундомеру. Данные записать в табл. 7.2.

Т а б л и ц а 7.2

Результаты исследования

Ток I, А						
Кратность тока, $I/I_{расц.}$						
Время срабатывания, $t_{ср.}$						

Внимание. Все последующие опыты выполнять с интервалом через 3-4 мин.

8. Выполнить опыты для других значений, увеличивая ток на 5 А, начиная с п. 5, а данные записать в табл. 7.1.

9. По результатам измерений построить защитную характеристику автомата $t_{ср} = f(I/I_{расц.})$ и сделать выводы.

III. Содержание и оформление отчёта.

Цель работы, паспортные данные автомата, эскиз кинематических

связей подвижных элементов автомата, электрическую схему испытаний, результаты экспериментальных исследований, защитную характеристику автомата, выводы по результатам исследований.

Отчет должен содержать:

- Ф. И. О. студента и номер класса.
- Нарисован рис. 7.1 и описана лабораторная установка.
- Расчерчена и заполнена таблица измерений (табл. 7.2).

Контрольные вопросы

1. Назначение и область применения автоматов.
2. Устройство электромагнитного расцепителя автоматического выключателя.
3. Понятие о рабочих и защитных характеристик автомата.
4. Согласование защитных характеристик автомата.
5. Способы защиты коммутируемых цепей от перегрузки и коротких замыканий с помощью автоматов.
6. Принцип работы тепловых и электромагнитных расцепителей.
7. Основные узлы конструкции автомата и их назначение.
8. Основные параметры и характеристики автомата.
9. Методика снятия защитной характеристики автомата.

У ч е б н о е и з д а н и е

Слюсаренко Виктор Григорьевич,
Сперанский Максим Юрьевич,
Лавренчук Антон Анатольевич и др.

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Редактор - О.В. Дмитриева

Изд. № 60/18. Объем 6 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»