

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ЗДРАВООХРАНЕНИЮ
И СОЦИАЛЬНОМУ РАЗВИТИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ
ПО КУРСУ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2006

УДК 621.313.33

M 54

М 54 **Методические указания к лабораторному практикуму по курсу «Электротехника» / Сост.: Е.Д. Эйдельман, А.Ю. Бабенко. — СПб.: Издательство СПХФА, 2006. — 56 с.**

Методические указания к лабораторным работам по курсу «Электротехника» для студентов факультета промышленной технологии лекарств, составлены в соответствии с учебной программой. Приведены схемы исследования, порядок выполнения работы, контрольные вопросы и содержание отчета.

Под общей редакцией:
проф. Е.Д. Эйдельман

*Рекомендовано методической комиссией
фармацевтического факультета.*

ISBN 5-8085-0273-X

© Санкт-Петербургская государственная
химико-фармацевтическая академия, 2006

Лабораторная работа № 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы:

1. Изучить принцип действия выпрямительных устройств.
2. Исследовать основные технические характеристики выпрямителей.
3. Изучить работу сглаживающего фильтра.

Оборудование:

1. Лабораторный стенд с одно- и двух- полупериодным выпрямителями.
2. Осциллограф.
3. Цифровой вольтметр.

Основные сведения:

Выпрямителем называется электротехническое устройство, предназначенное для преобразования переменного тока I в постоянный (ток одного знака). См. рис. 1.1.

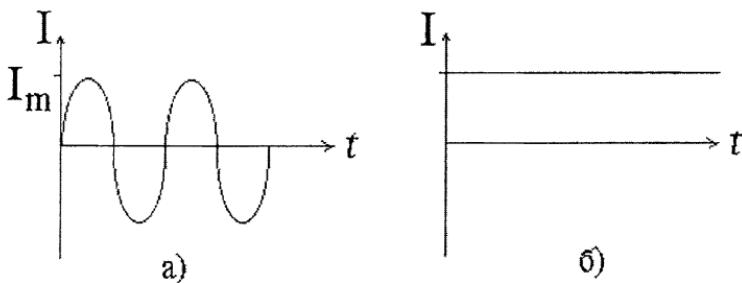


Рис. 1.1. Временные диаграммы токов
а — переменный ток, б — постоянный ток

Переменный ток меняется с течением времени по величине и направлению. В течении положительного полупериода он имеет одно направление, а в течении отрицательного полупериода направление тока меняется на противоположное.

Для преобразования переменного тока в постоянный необходимо решить две задачи:

1. Преобразовать переменный ток в ток одного направления.
2. Преобразовать пульсирующий ток одного направления в постоянный ток.

Первую задачу выполняют при помощи полупроводникового диода. Диодом называется устройство, способное пропускать электрический ток толь-

ко в одном направлении. Существуют диоды различных конструкций, но в настоящее время наибольшее распространение получили полупроводниковые диоды. Смотри рисунок 1.2.

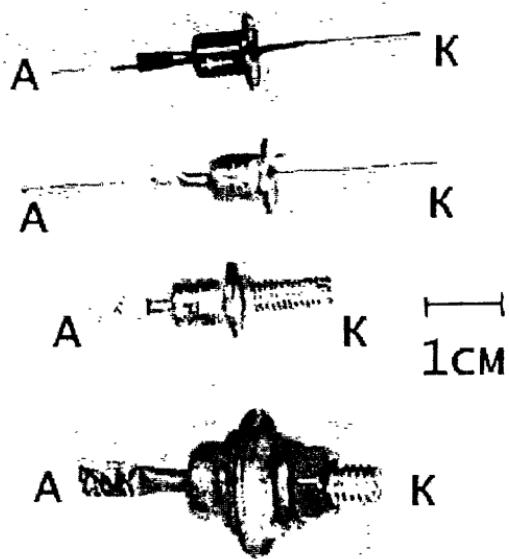


Рис. 1.2. Некоторые полупроводниковые выпрямительные диоды

На электрических схемах полупроводниковый диод (иногда его называют вентилем) обозначается значком:

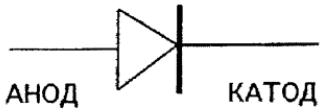


Рис. 1.3. Условное обозначение полупроводникового диода

Когда анод имеет положительный потенциал относительно катода, сопротивление диода очень мало (доли ома). Такое состояние диода называется открытым, и ток свободно проходит в направлении от анода к катоду. Если к аноду приложен отрицательный потенциал, то сопротивление диода составляет миллионы ом. Такое состояние диода называется закрытым и ток через диод не проходит.

При включении полупроводникового диода в электрическую цепь переменного тока (см. рис 1.4), диод будет пропускать ток только в течении положительного полупериода. В течении отрицательного полупериода диод будет закрыт и ток в цепи течь не будет.

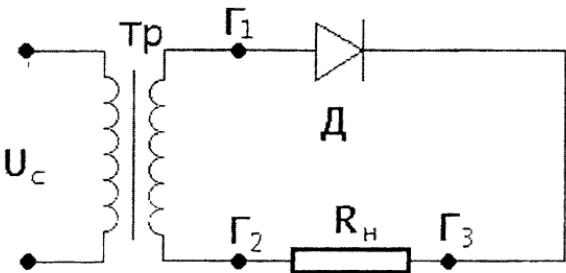


Рис. 1.4. Цепь переменного тока с полупроводниковым диодом (Д)

В этой цепи через сопротивление нагрузки R_H будет протекать пульсирующий ток одного знака. (см. рис. 1.5)

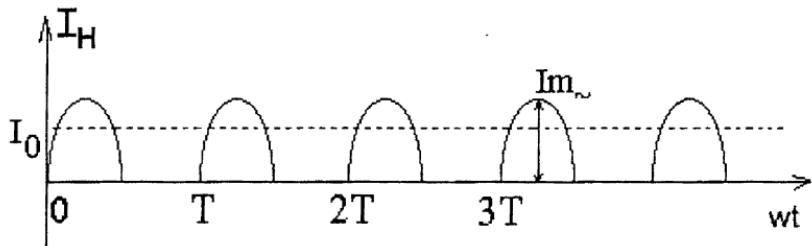


Рис. 1.5. Временная диаграмма на тока на выходе однополупериодного выпрямителя

Схема на рисунке 1.4 является схемой простейшего однополупериодного выпрямителя.

Пульсирующий ток является током одного знака, но он изменяется по величине от 0 до I_m . Такой ток можно рассматривать как совокупность двух токов: постоянного тока величиной I_0 и переменного тока с амплитудой I_m .

По такому же закону будет изменяться и напряжение на нагрузке.

Непостоянность такого пульсирующего тока характеризуется коэффициентом пульсации:

$$K_{\Pi} = \frac{I_m}{I_0} = \frac{U_m}{U_0}.$$

Для питания электрических приборов требуется напряжение одного знака с как можно меньшим коэффициентом пульсации. Для этого требуется уменьшить переменную составляющую выходного тока и напряжения. Эту задачу выполняет сглаживающий фильтр.

Одна из конструкций сглаживающего фильтра представляет собой индуктивную катушку из толстого медного провода, намотанного на стальной сердечник для получения как можно большей индуктивности при малом активном сопротивлении (см. рис 1.6).

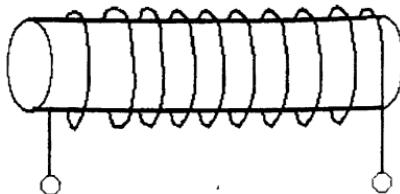


Рис. 1.6. Сглаживающий фильтр

Сглаживающий фильтр включается последовательно с нагрузочным сопротивлением R_H . При этом переменная составляющая пульсирующего тока будет задерживаться, а постоянная проходить.

Это объясняется тем, что для переменной составляющей тока сглаживающий фильтр обладает реактивным сопротивлением X_L , равным:

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L,$$

где f — частота переменной составляющей тока,

L — индуктивность фильтра.

Для постоянной составляющей тока ($f=0$) сглаживающий фильтр не оказывает никакого сопротивления. Схема однополупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром приведена на рисунке 1.7.

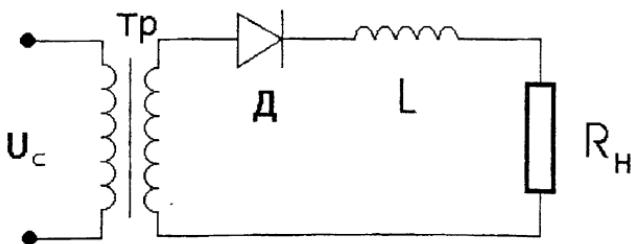


Рис. 1.7. Выпрямитель со сглаживающим фильтром

Эффективность работы сглаживающего фильтра оценивается коэффициентом сглаживания q . Коэффициент сглаживания показывает во сколько раз уменьшается коэффициент пульсации выходного напряжения при включении фильтра.

Однополупериодный выпрямитель имеет два существенных недостатка. Во-первых, большой коэффициент пульсации выходного тока и напряжения (теоретическое значение $K_p = 1,57$ без фильтра). Во-вторых, низкий КПД, так как используются только положительные полупериоды, и половину времени понижающий трансформатор работает «вхолостую».

В большинстве случаев используются двухполупериодные выпрямители. Одна из схем двухполупериодного выпрямителя приведена на рисунке 1.8.

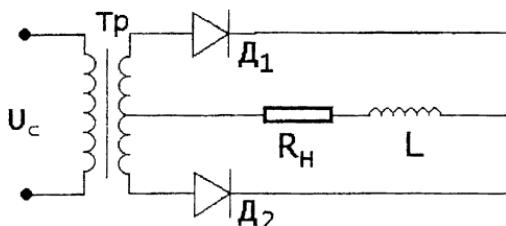


Рис. 1.8. Электрическая схема двухполупериодного выпрямителя с фильтром

Двухполупериодный выпрямитель имеет два диода. Диод D_1 пропускает ток в течении положительного полупериода, а диод D_2 — отрицательного. Через сопротивление нагрузки R_H течет пульсирующий ток одного знака (см. рис 1.9).

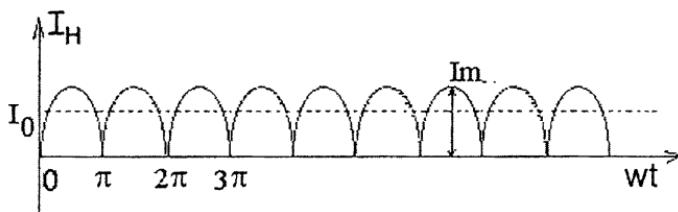


Рис. 1.9. Временная диаграмма на тока
на выходе двухполупериодного выпрямителя

Коэффициент пульсации выходного напряжения в двухполупериодном выпрямителе будет в два раза меньше, а постоянная составляющая тока и напряжения больше, чем у однополупериодного выпрямителя.

Электрическая схема лабораторной установки приведена на рисунке 1.10. Включение выпрямителя осуществляется тумблером B_1 . Сглаживающий фильтр подключается тумблером B_2 . Нагрузочное сопротивление, подключенное к выпрямителю, может изменяться при помощи тумблеров B_3 — B_{16} . Электрическая лампочка L сигнализирует о включении стенда. Гнезда Γ_1 — Γ_{10} используются для подключения измерительных приборов (вольтметра и осциллографа) и исследования работы выпрямителя.

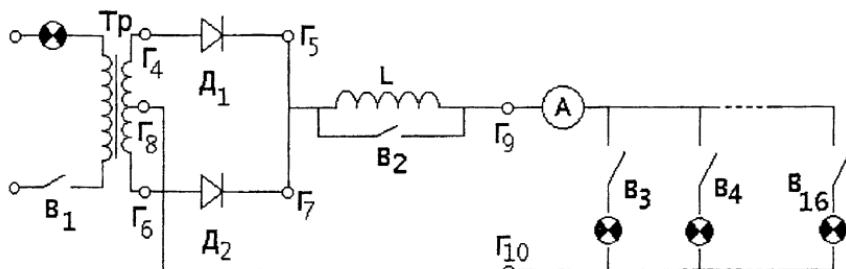


Рис. 1.10. Электрическая схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы.

1. Включить стенд. Тумблер В₁ поставить в положение «вкл». Контрольная лампа Л должна загореться.
2. Включить цифровой вольтметр. Кнопку «Сеть» на лицевой панели поставить в положение «нажато». На индикаторе вольтметра должны загореться цифры. Перевести вольтметр в режим измерения переменной составляющей напряжения. Для этого кнопку «Род работы» переведите в положение «~».
3. Включить осциллограф. Кнопку «сеть» на лицевой панели поставить в положение «вкл». Контрольная лампа на лицевой панели должна загореться.

Часть 1. Исследование однополупериодного выпрямителя

Схема установки изображена на рисунке 1.4.

1. Подключить цифровой вольтметр и осциллограф к точкам схемы обозначенным на схеме Г₁ и Г₂. Для этого штеккеры сигнального кабеля вставить в гнезда Г₁ и Г₂.

2. Получить на экране осциллографа временную диаграмму входного напряжения выпрямителя. Для этого установите вертикальный масштаб изображения 10 вольт на клетку и с помощью ручек настройки изображения получите максимально четкое изображение.

3. Зарисуйте изображение с экрана осциллографа с соблюдением вертикального и горизонтального масштабов. (горизонтальный масштаб 10 мс на клетку).

4. Запишите действующее значение входного напряжения U_{вх1}.

5. Подключить цифровой вольтметр и осциллограф к точкам схемы обозначенным на схеме Г₂ и Г₃. Для этого штеккеры сигнального кабеля вставить в гнезда Г₂ и Г₃. Если вольтметр показывает отрицательное значение, поменяйте штеккеры местами.

6. Зарисуйте с экрана осциллографа временную диаграмму выходного напряжения однополупериодного выпрямителя.

7. Измерьте вольтметром действующее значение переменной составляющей выходного напряжения U_~ и запишите.

4. Переведите вольтметр в режим измерения постоянного напряжения U₀. Для этого кнопку «Род работы» переведите в положение «—».

8. Измерьте постоянную составляющую выходного напряжения выпрямителя U₀ и запишите.

Часть 2. Исследование двухполупериодного выпрямителя.

Схема установки изображена на рисунке 1.10.

1. Перевести вольтметр в режим измерения переменной составляющей напряжения.

2. Подключить цифровой вольтметр и осциллограф к точкам схемы обозначенным на схеме Γ_4 и Γ_8 . Для этого штеккеры сигнального кабеля вставить в гнезда Γ_4 и Γ_8 .

3. Получить на экране осциллографа временную диаграмму входного напряжения выпрямителя. Для этого установите вертикальный масштаб изображения 5 вольт на клетку и с помощью ручек настройки изображения получите максимально четкое изображение.

4. Зарисуйте изображение с экрана осциллографа с соблюдением вертикального и горизонтального масштабов. (горизонтальный масштаб 10 мс на клетку).

5. Запишите действующее значение входного напряжения $U_{\text{вх}2}$.

6. Проследите, чтобы тумблер B_3 находился в положении «вкл», а тумблеры B_2 и B_4-B_{16} в положении «выкл». При этом достигается максимальное значение сопротивления нагрузки.

7. Подключить цифровой вольтметр и осциллограф к точкам схемы обозначенным на схеме Γ_9 и Γ_{10} . Для этого штеккеры сигнального кабеля вставить в гнезда Γ_9 и Γ_{10} . Если цифровой вольтметр показывает отрицательное значение, поменяйте штеккеры местами.

8. Зарисуйте с экрана осциллографа временную диаграмму выходного напряжения двухполупериодного выпрямителя.

9. Измерьте вольтметром действующее значение переменной составляющей выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и запишите.

10. Переведите вольтметр в режим измерения постоянного напряжения U_0 . Для этого кнопку «Род работы» переведите в положение «—».

11. Измерьте постоянную составляющую выходного напряжения выпрямителя U_0 и запишите.

12. Включите сглаживающий фильтр. Для этого тумблер B_2 переведите в положение «вкл».

13. Повторите пункты 8—11 при включенном фильтре.

Часть 3. Снятие нагрузочной характеристики двухполупериодного выпрямителя

1. Подключите вольтметр к точкам схемы Γ_9, Γ_{10} .

2. Переведите вольтметр в режим измерения постоянного напряжения U_0 . Для этого кнопку «Род работы» переведите в положение «—».

3. Выключите сглаживающий фильтр. Для этого тумблер B_2 переведите в положение «выкл».

4. Последовательно включить, не выключая, тумблеры B_3-B_{16} , при каждом включении измерять ток I_0 по амперметру, расположенному на передней панели стенда и напряжение U_0 .

5. Результаты измерений занести в таблицу 1.
 6. Повторить пункты 4, 5 при включенном сглаживающем фильтре. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 1

Значения тока и напряжения при выключенном фильтре

№ тумблера	B ₁	B ₂	B ₃	...	B ₁₄	B ₁₅	B ₁₆
I ₀ , A							
U ₀ , В							

Таблица 2. «Значения тока и напряжения при включенном фильтре» выглядит так же.

Обработка результатов измерений.

- Приведите в отчете временные диаграммы входного и выходного напряжений однополупериодного выпрямителя.
- Приведите действующее значение входного и постоянное значение выходного напряжений однополупериодного выпрямителя.
- Рассчитайте и укажите в отчете коэффициент пульсации напряжения однополупериодного выпрямителя по формуле:

$$K_{\Pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{-D}}{V_0}. \quad (1.1)$$

- Приведите в отчете временные диаграммы входного и выходного напряжений двухполупериодного выпрямителя при выключенном и включенном сглаживающем фильтре.

- Приведите действующее значение входного и постоянное значение выходного напряжений двухполупериодного выпрямителя при выключенном фильтре.

- Рассчитайте и укажите в отчете коэффициент пульсации напряжения двухполупериодного выпрямителя при выключенном и включенном сглаживающем фильтре.

- Рассчитайте и укажите в отчете коэффициент сглаживания фильтра по формуле:

$$q_{\text{сглаж}} = \frac{K_{\Pi\text{б.ф.}}}{K_{\Pi\text{с.ф.}}}. \quad (1.2)$$

- По результатам измерений (табл. 1 и 2) постройте графики зависимости U₀ = f(I₀).

9. Рассчитайте и укажите в отчете внутреннее сопротивление двухполупериодного выпрямителя при выключенном и включенном сглаживающем фильтре по формуле:

$$r_{\text{внут}} = \frac{V_1 - V_{16}}{I_{16} - I_1}. \quad (1.3)$$

Контрольные вопросы.

1. Что такое выпрямитель?
2. Что такое полупроводниковый диод?
3. Для чего используется сглаживающий фильтр?
4. У какого выпрямителя, одно- или двух- полупериодного, больше значение выходного напряжения при одинаковом входном переменном напряжении?
5. У какого выпрямителя, одно- или двух- полупериодного, больше коэффициент пульсации выходного напряжения?
6. Два сглаживающих фильтра имеют индуктивное сопротивление 10 Ом и 20 Ом. У какого из них будет больше коэффициент сглаживания?
7. Как изменится временная диаграмма выпрямленного напряжения, если диод в однополупериодном выпрямителе подключить в противоположном направлении?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы.

1. Изучить устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.

2. Снять рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя.

Оборудование.

1. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

2. Амперметр.

3. Вольтметр.

4. Ваттметр.

5. Тормозное устройство.

6. Разобранный образец трехфазного асинхронного двигателя.

Основные сведения.

Электродвигателями называются электрические машины, преобразующие энергию электрического тока в механическую.

В настоящее время наиболее распространенным типом электрических двигателей являются асинхронные двигатели.

Принцип действия асинхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с индуцированными токами в проводниках ротора.

Статором называется неподвижная часть асинхронного двигателя, представляющая собой полый цилиндр, на внутренней поверхности которого, в пазах, размещена трехфазная обмотка. Трехфазная обмотка, в простейшем случае, выполняется в виде трех катушек, смещенных в пространстве на 120° (рис. 2.1).

Катушки статорной обмотки могут соединяться между собой как по схеме «звезда», так и по схеме «треугольник». Протекающие

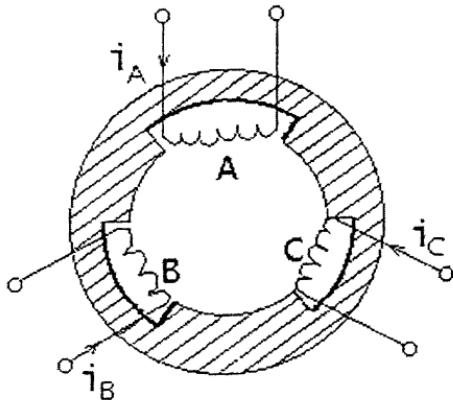


Рис. 2.1. Статор трехфазного асинхронного двигателя

через катушки фазные токи смешены друг относительно друга по фазе на треть $2\pi/3$ (120°).

$$i_A = I_m \sin \omega \cdot t, i_B = I_m \sin(\omega \cdot t + \frac{2}{3}\pi), i_C = I_m \sin(\omega \cdot t + \frac{4}{3}\pi).$$

Каждый из этих токов создает собственный магнитный поток:

$$\Phi_A = \Phi_m \sin \omega \cdot t, \Phi_B = \Phi_m \sin(\omega \cdot t + \frac{2}{3}\pi), \Phi_C = \Phi_m \sin(\omega \cdot t + \frac{4}{3}\pi).$$

Эти три магнитных потока складываются и создают результирующий магнитный поток Φ , вращающийся с постоянной угловой скоростью. Таким образом, статорная обмотка создает вращающееся магнитное поле.

Скорость вращения магнитного поля зависит от числа пар его полюсов. Если в статоре только три катушки, то магнитное поле имеет одну пару полюсов. Частота вращения магнитного поля будет равна частоте переменного тока в сети. Следовательно, за одну минуту поле сделает число оборотов равное:

$$n = 60f,$$

где f — частота переменного тока в сети (50 Гц).

Если статорная обмотка выполнена из шести катушек смешенных в пространстве на 60° относительно друг друга, то результирующее магнитное поле будет иметь четыре полюса (две пары). Частота вращения поля будет в два раза меньше, чем у поля с двумя полюсами. Число оборотов многополюсного магнитного поля в минуту будет равно:

$$n = \frac{60f}{p},$$

где p — число пар полюсов.

Внутри статора асинхронного двигателя помещена его подвижная часть, называемая ротором. Ротор представляет собой цилиндр, собранный из отдельных железных листов, изолированных друг от друга для уменьшения потерь на вихревые токи. На железном цилиндре ротора размещена его обмотка в виде цилиндрической клетки из алюминиевых стержней. Стержни вставляются в пазы сердечника ротора. Торцевые концы стержней замыкаются накоротко алюминиевыми кольцами.

Если на катушки статора подано трехфазное напряжение, то в системе статора возникает вращающееся магнитное поле. Это вращающееся поле будет пересекать проводники ротора, и возбуждать в них электродвижущую силу. Поскольку проводники ротора замкнуты, по ним потечет индукционный ток. На любой проводник с током, находящийся в магнитном поле будет действовать сила Ампера. Она будет направлена таким образом, что ротор начнет вращаться вслед за магнитным полем. Говорят, что движущееся магнитное поле увлекает проводники за собой. Однако ротор никогда не сможет вращаться с той же скоростью, что и магнитное поле. Ведь при этом проводники

ротора не будут двигаться относительно магнитного поля и индукционные токи в них течь не будут. Ротор всегда будет вращаться медленнее, чем магнитное поле статора (асинхронно).

Электродвижущая сила, индуцируемая в проводниках ротора, пропорциональна относительной скорости вращения магнитного поля относительно ротора. Эта относительная скорость называется скоростью скольжения n_s . Она равна разности между скоростями вращения магнитного n_1 поля и ротора n_2 . Отношение скорости скольжения к скорости вращения магнитного поля называется коэффициентом скольжения:

$$S = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (2.2)$$

Основные свойства асинхронного двигателя определяют его рабочие характеристики. Рабочие характеристики показывают зависимость основных эксплуатационных параметров двигателя от мощности нагрузки на валу P_2 .

К эксплуатационным параметрам относятся: линейный ток обмотки статора I_L , активная мощность потребляемая двигателем из сети P_1 , вращающий момент развиваемый двигателем M , коэффициент полезного действия h , скорость вращения ротора n_2 , коэффициент мощности $\cos\varphi$ и коэффициент скольжения S .

Рассмотрим влияние мощности нагрузки P_2 на эксплуатационные параметры двигателя.

При возрастании мощности нагрузки P_2 увеличивается тормозящий момент. Когда тормозящий момент оказывается больше вращательного момента M , скорость вращения ротора n_2 начинает уменьшаться. Это приводит к увеличению коэффициента скольжения S и, следовательно, к возрастанию индукционного тока ротора, из-за более интенсивного пересечения проводников ротора магнитным полем статора.

Вращающий момент двигателя увеличивается до тех пор, пока не наступит равновесие вращательного и тормозящего моментов. При скоростях вращения ротора не слишком сильно отличающихся от номинальной, уменьшение скорости вращения ротора сопровождается увеличением вращательного момента.

Если катушки статорной обмотки соединены звездой, то полная мощность, потребляемая из сети равна:

$$P_1 = 3 \cdot P_\Phi \quad (2.3)$$

где P_Φ — активная мощность одной фазы, измеряемая ваттметром.

$$P_\Phi = I_L V_\Phi \cos\varphi, \quad (2.4)$$

где I_L — линейный ток, измеряемый амперметром,

V_Φ — фазное напряжение, измеряемое вольтметром,

φ — угол сдвига фаз между током и напряжением.

Вращающий момент M , развиваемый двигателем, определяется по формуле:

$$M = \frac{P_2}{\omega} = 60 \frac{P_2}{2\pi \cdot n_2}. \quad (2.5)$$

Коэффициент полезного действия двигателя h определяется соотношением мощности нагрузки P_2 к потребляемой мощности из сети P_1 .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%. \quad (2.6)$$

Потребляемая мощность P_1 равна сумме полезной мощности P_2 и мощности потерь.

Потери в двигателе можно разделить на постоянные, практически не зависящие от нагрузки, и переменные.

Постоянные потери — это потери в стали сердечников статора и ротора на перемагничивание и вихревые токи, а также потери на трение в подшипниках. Переменными потерями являются потери на нагревание проводников статорной и роторной обмоток. Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя достигает максимального значения (75—90 % в зависимости от конструкции) при номинальном токе и номинальной мощности. По мере удаления условий работы двигателя от номинальных значений, КПД будет снижаться.

Зависимость скорости вращения ротора от мощности нагрузки $n_2 = f(P_2)$, называется скоростной характеристикой двигателя. С ростом нагрузки на валу двигателя, скорость вращения ротора снижается и при номинальной нагрузке будет на 10—15 % меньше скорости вращения магнитного поля статора. Скоростная характеристика играет важную роль при расчете и проектировании электрического привода.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ определяет эффективность использования электрической энергии, потребляемой двигателем из сети.

$$\cos \varphi = \frac{P_\Phi}{I_\Phi U_\Phi}, \quad (2.7)$$

где P_Φ — активная мощность одной фазы,

I_Φ — линейный ток,

U_Φ — фазное напряжение.

В режиме холостого хода коэффициент мощности составляет порядка 0,1—0,15. С увеличением мощности нагрузки он быстро растет и достигает максимального значения (0,7—0,9) при нагрузке близкой к номинальной. Неполная нагрузка асинхронных двигателей является причиной низких значений коэффициента мощности.

Установка для проведения лабораторных работ состоит из трехфазного асинхронного двигателя, магнитного пускового устройства, измерительных

приборов и тормозного устройства. См. рисунок 2.2. Тормозное устройство представляет собой ленточный тормоз с зажимной гайкой. При закручивании гайки создается тормозной момент на валу электродвигателя.

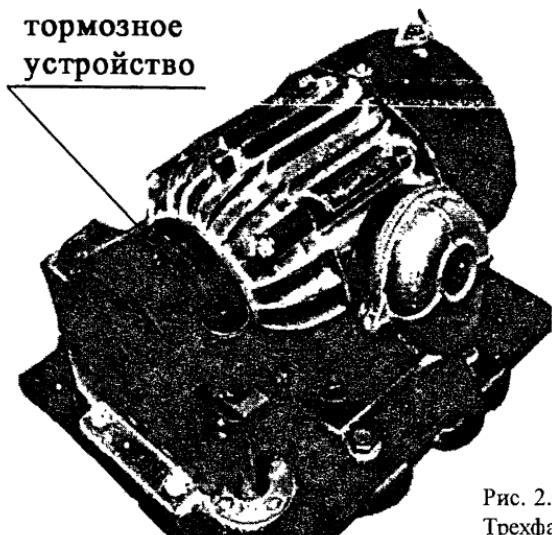


Рис. 2.2.

Трехфазный асинхронный двигатель

На рисунке 2.3 представлена принципиальная схема лабораторной установки. Катушки статорной обмотки соединены звездой. Обмотки статора расположены таким образом, чтобы создавать четырехполюсное магнитное поле ($p = 2$). На схеме показано подключение измерительных приборов для измерения тока, напряжения и мощности в одной из трех симметричных фаз (фаза A).

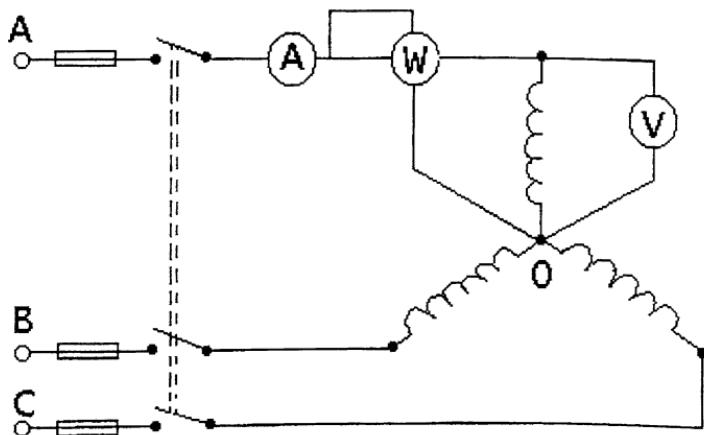


Рис. 2.3. Электрическая схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с типами измерительных приборов и порядком их включения в электрическую цепь.
2. Записать технические данные используемых приборов, а именно: предел измерения и цену деления.
3. Рассмотреть на разобранном образце асинхронного двигателя устройство статора и ротора. Выяснить назначение каждой детали.
4. Записать паспортные данные рабочего и разобранного двигателей в таблицу.

Таблица 2.1

Паспортные данные двигателей

№ п/п	Тип двигателя	Год выпуска	Заводской №	Номинальная мощность Вт	Номинальное напряжение В	Номинальный ток А	Номинальная скорость вращения n_2	КПД η	$\cos\phi$	Соединения обмоток
1										
2										

5. Ручку тормозного устройства отвернуть до предела против часовой стрелки.

6. Включить двигатель кнопкой дистанционного управления.

7. Измерить величину линейного тока I_{L1} , фазного напряжения U_ϕ и активной фазной мощности P_ϕ в режиме холостого хода. Результаты занести в таблицу 2.2.

8. Постепенно поворачивая ручку тормозного устройства по часовой стрелке, нагружайте электродвигатель, увеличивайте значения линейного тока до максимального значения 2,1 А, с шагом 0,2 А.

9. Результаты измерения линейного тока I_{L1} , фазного напряжения U_ϕ и активной фазной мощности P_ϕ занесите в таблицу 2.2. Мощности нагрузки на валу двигателя P_2 и число оборотов ротора n_2 , соответствующие указанным значениям тока I_{L1} , приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Результаты исследования рабочих характеристик асинхронного двигателя

Измерить				Вычислить						
Режим	I_{L1} , А	P_ϕ , Вт	U_ϕ , В	n_2 , об/мин	P_2 , Вт	η , %	M , Нм	P_1 , Вт	$\cos\phi$	S , %
Холостой ход	1,1			1490	12					
Под нагрузкой	1,3			1450	90					
	1,5			1400	185					
	1,7			1350	275					
	1,9			1300	375					
	2,1			1250	475					

Обработка результатов измерений

1. Вычислите вращательный момент M двигателя по формуле 2.5.
2. Вычислите активную мощность P_1 , потребляемую двигателем из сети по формуле 2.3.
3. Вычислите коэффициент полезного действия η , по формуле 2.6.
4. Вычислите коэффициент мощности $\cos\phi$, по формуле 2.7.
5. Вычислите коэффициент скольжения S , по формуле 2.2.
6. Результаты расчетов занесите в таблицу 2.2.
7. Постройте рабочие характеристики двигателя (графики):
 - а) $M = f(P_2)$;
 - б) $\eta = f(P_2)$;
 - в) $\cos\phi = f(P_2)$;
 - г) $I_L = f(P_2)$;
 - д) $n_2 = f(P_2)$;
 - е) $S = f(P_2)$;
8. Отметьте на графиках номинальные значения рассматриваемых величин.
9. Сделайте выводы о том, как изменяются эксплуатационные характеристики двигателя при изменении мощности нагрузки.

Контрольные вопросы.

1. Что означает слово «асинхронный» в названии трехфазного асинхронного двигателя?
2. Из каких основных частей состоит асинхронный двигатель?
3. Чему равна скорость вращения магнитного поля, создаваемого статором?
4. Что такое скольжение?
5. Под действием каких сил происходит вращение ротора двигателя?
6. Может ли коэффициент мощности двигателя быть равным 2? Почему?
7. Как будет вращаться ротор электродвигателя, если вращающий момент не будет равен тормозящему?
8. Чему равен коэффициент скольжения в момент пуска асинхронного двигателя?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ

Цель работы.

1. Ознакомиться с простейшими линейными электрическими цепями переменного тока, содержащими активные и реактивные элементы.
2. Ознакомиться с явлением резонанса в электрических цепях переменного тока.
3. Определить величину индуктивности катушки тремя способами: по закону Ома, методом резонанса тока и методом резонанса напряжений.
4. Определить добротность колебательного контура.

Оборудование.

1. Генератор сигналов.
2. Вольтметр переменного тока.
3. Амперметр переменного тока.
4. Катушка индуктивности.
5. Магазин емкостей.
6. Панель переключателей.

Основные сведения.

Совокупность устройств, предназначенная для прохождения в них электрического тока, называется электрической цепью.

Переменным называется электрический ток, непрерывно изменяющийся с течением времени по закону синуса или косинуса.

Основными элементами электрической цепи переменного тока, являются активные сопротивления r , индуктивности L и емкости C .

Активным сопротивлением называется элемент цепи, в котором энергия не запасается, а только преобразуется в какой-либо другой вид.

Индуктивностью называют и элемент цепи, способный запасать энергию в виде магнитного поля и количественную характеристику этой способности (L), которая измеряется в Генри (Γ).

Емкостью называют и элемент цепи, способный запасать энергию в виде электрического поля и количественную характеристику этой способности (C), которая измеряется в Фарадах (Φ). Часто емкость называют конденсатором.

В электрической цепи, содержащей только активное сопротивление r , синусоидальные напряжение и ток совпадают по фазе. Мгновенные значения тока и напряжения в цепи с активным сопротивлением равны:

$$u(t) = U_m \sin \omega t;$$

$$i(t) = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

Для наглядного представления синусоидально изменяющихся величин используется векторная форма. При этом модуль вектора равен амплитуде рассматриваемой величины, а угол между горизонтальной осью и вектором равен начальной фазе. В случае активного сопротивления векторы тока и напряжения совпадают по направлению. См. рисунок 3.1.

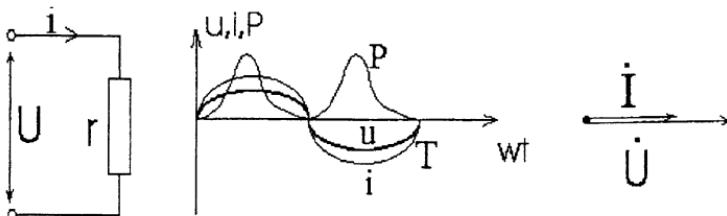


Рис. 3.1. Активное сопротивление в цепи переменного тока

Мгновенная мощность, выделяющаяся в цепи, P равна произведению мгновенных значений напряжения и тока.

$$P(t) = u \cdot i = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$

Видно, что мгновенная мощность изменяется пропорционально $\sin^2 \omega t$. Среднее значение мощности выделяющейся на активном сопротивлении за период равно:

$$P_{\text{ср}} = \frac{U_m I_m}{2}.$$

В цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности (см. рисунок 3.2) ток обуславливается совместным действием напряжения внешнего источника и ЭДС самоиндукции e_L , возникающей в катушке.

$$e_L = -L \frac{di}{dt}.$$

Если пренебречь активным сопротивлением катушки, то падение напряжения на ней будет равно ЭДС самоиндукции со знаком минус $u = -e_L$.

Принимая начальную фазу тока за ноль получаем мгновенные значения тока и напряжения:

$$i(t) = I_m \sin \omega t;$$

$$u(t) = L \frac{di}{dt} = I_m \omega \cdot L \cos \omega t = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

где $U_m = I_m \omega L$ — амплитуда напряжения.

Величина $X_L = \omega L$ называется индуктивным сопротивлением катушки.

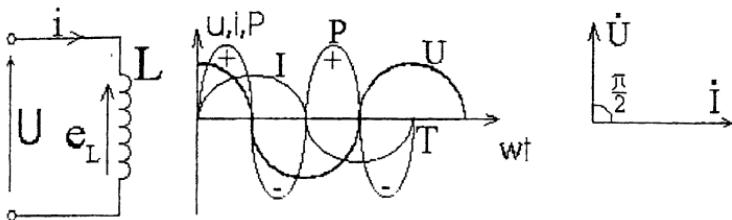


Рис. 3.2. Катушка индуктивности в цепи переменного тока.

Таким образом, если через катушку индуктивности проходит синусоидальный ток, то напряжение на катушке будет меняться также синусоидально и опережать по фазе ток на угол $\pi/2$.

Мгновенная мощность P выделяющаяся на индуктивности равна произведению мгновенных значений напряжения и тока.

$$P(t) = u \cdot i = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) I_m \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t.$$

Среднее значение мощности за период равно нулю, то есть в среднем, индуктивность не потребляет энергии, а лишь обменивается ей с цепью. Величину, характеризующую интенсивность этого обмена называют реактивной мощностью:

$$Q = \frac{U_m I_m}{2}.$$

В цепи переменного тока, содержащей конденсатор (см. рисунок 3.3) действует переменное синусоидальное напряжение. Заряд на обкладках конденсатора пропорционален приложенному напряжению.

$$q = uC.$$

При изменении заряда на обкладках конденсатора будут перемещаться и заряды в проводниках, соединяющих конденсатор с источником тока. Такое перемещение зарядов и есть электрический ток:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}.$$

Мгновенные значения напряжения и тока будут равны:

$$u(t) = U_m \sin \omega t;$$

$$i(t) = C \frac{du}{dt} = U_m \omega \cdot C \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

где $I_m = U_m \omega C$ — амплитуда тока. Величина $X_C = 1/\omega C$ называется емкостным сопротивлением конденсатора.

Следовательно, через конденсатор проходит синусоидальный ток, причем он опережает по фазе напряжение на угол $\pi/2$.

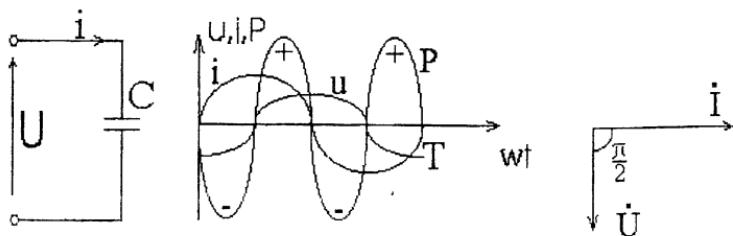


Рис. 3.3. Конденсатор в цепи переменного тока

Мгновенная мощность P выделяющаяся на емкости равна произведению мгновенных значений напряжения и тока.

$$P(t) = u \cdot i = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) I_m \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t.$$

Среднее значение мощности за период равно нулю, то есть в среднем, емкость не потребляет энергии, а лишь обменивается ей с цепью. Величину, характеризующую интенсивность этого обмена называют реактивной мощностью:

$$Q = \frac{U_m I_m}{2}.$$

Реактивная мощность измеряется в Вольт-Ампер-реактивных (ВАР).

Емкостное и индуктивные сопротивления, в отличие от активного сопротивления, не потребляют энергии из сети. Поэтому они называются реактивными сопротивлениями.

Любая реальная катушка индуктивности обладает активным сопротивлением r , отличным от нуля. См. рисунок 3.4.

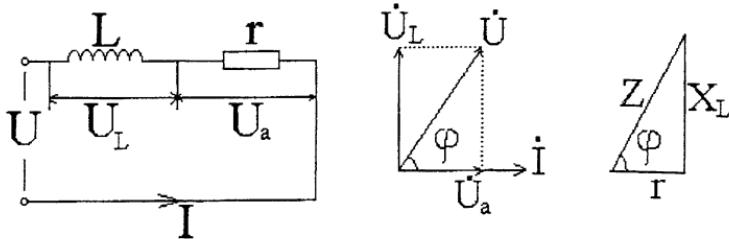


Рис. 3.4. Катушка индуктивности и активное сопротивление в цепи переменного тока

Значение тока I (действующее значение) одинаково в активном сопротивлении r и индуктивном сопротивлении $X_L = \omega L$, так как они соединены последовательно.

Переменное напряжение u , приложенное к цепи распределяется на активном и индуктивном сопротивлениях. $U_a = I \cdot r$ и $U_L = I \cdot \omega L$ — действующие значения падения напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях.

Напряжение на активном сопротивлении U_a совпадает по фазе с током, поскольку оно приложено к участку цепи, обладающему только активным сопротивлением.

Напряжение на индуктивном сопротивлении U_L опережает ток в цепи по фазе на угол $\pi/2$, поскольку оно приложено к участку цепи, обладающему только индуктивным сопротивлением.

Сложив геометрически напряжения U_a и U_L , получим действующее значение результирующего напряжения U , приложенного ко всей цепи. Прямоугольный треугольник, составленный из векторов U_a , U_L и U называется треугольником напряжений.

Величину Z называют полным сопротивлением цепи. Его можно определить по закону Ома:

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (3.1)$$

Разделив все стороны треугольника напряжений на величину тока I , получим треугольник сопротивлений, из которого находим Z .

$$Z = \sqrt{r^2 + X_L^2} = \sqrt{r^2 + (\omega \cdot L)^2}. \quad (3.2)$$

Зная полное сопротивление Z , активное сопротивление цепи r и циклическую частоту переменного тока $\omega = 2\pi f$, можно определить индуктивность катушки L .

Рассмотрим цепь переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, катушки индуктивности и емкости. Такая цепь называется последовательным колебательным контуром. См. рисунок 3.5.

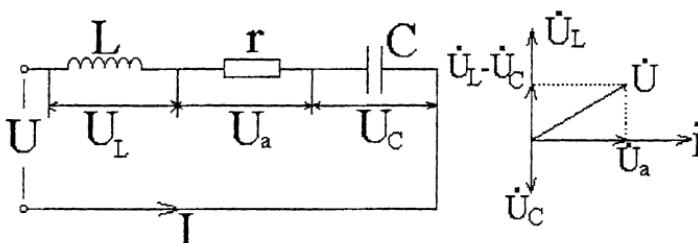


Рис. 3.5. Конденсатор, катушка индуктивности и активное сопротивление, соединенные последовательно в цепи переменного тока

Напряжение U , приложенное к цепи, распределяется на трех последовательно соединенных сопротивлениях: активном r , индуктивном $X_L = \omega L$ и емкостном $X_C = 1/\omega C$. $U_a = Ir$, $U_L = I \cdot \omega L$, $U_C = I/\omega C$ — действующие значения падения напряжений на активном и индуктивном и емкостном сопротивлениях.

Для мгновенных значений напряжений выполняется равенство:

$$U(t) = U_a(t) + U_L(t) + U_C(t).$$

Напряжение на активном сопротивлении U_a совпадает с током по фазе, напряжение на индуктивном сопротивлении U_L опережает ток по фазе на угол $\pi/2$, напряжение на емкостном сопротивлении U_C отстает от тока по фазе на угол $\pi/2$.

Сложив геометрически вектора U_a , U_L и U_C , получим вектор полного напряжения, приложенного ко всей цепи (треугольник напряжений). Зная полное напряжение и ток по закону Ома можно определить полное сопротивление цепи Z . Оно будет равно:

$$Z = \sqrt{r^2 + X^2},$$

где $X = X_L - X_C$ — полное реактивное сопротивление цепи.

Существует такая частота переменного тока, при которой индуктивное сопротивление катушки равно емкостному сопротивлению конденсатора. При этом реактивное сопротивление цепи равно нулю, а полное сопротивление цепи минимально и равно активному сопротивлению.

$$X_L = X_C; X = 0; Z = r.$$

Эта частота называется резонансной частотой последовательного колебательного контура.

$$\omega_{\text{рез}} L = \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C}, \text{ откуда следует:}$$

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ или } f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.3)$$

При частоте переменного тока равной резонансной частоте, падение напряжения на индуктивном сопротивлении U_L равно по модулю падению напряжения на емкостном сопротивлении U_C . Так как эти напряжения находятся в противофазе, то их сумма будет равна нулю. При этом сами величины падений напряжений U_L и U_C могут быть очень велики, во много раз больше, чем общее напряжение в цепи. Это явление называется резонансом напряжений. См. рисунок 3.6.

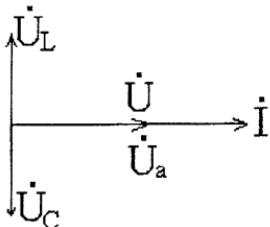


Рис. 3.6. Векторная диаграмма для случая резонанса напряжений на последовательном колебательном контуре

Рассмотрим электрическую цепь переменного тока с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора. См. рисунок 3.7.

Такая цепь называется параллельным колебательным контуром. В нашем случае активное сопротивление катушки индуктивности r мало, по сравнению с индуктивным сопротивлением $r \ll \omega L$, поэтому его можно не учитывать.

Ток, протекающий через ветвь контура с индуктивным сопротивлением I_L , определяется по формуле:

$$I_L = U \cdot b_L,$$

а ток в ветви с емкостным сопротивлением I_C :

$$I_C = U \cdot b_C,$$

где $b_L = 1/X_L = 1/\omega L$ — реактивная проводимость ветви с индуктивностью;

$b_C = 1/X_C = \omega C$ — реактивная проводимость ветви с емкостью.

Частота, при которой реактивные проводимости ветвей равны, называется резонансной частотой параллельного контура. Если активные сопротивления ветвей пренебрежимо малы, по сравнению с реактивными сопротивлениями индуктивности и конденсатора, то резонансная частота параллельного контура будет совпадать с резонансной частотой последовательного колебательного контура:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.3)$$

При частоте равной резонансной, ток в ветви с емкостью I_C , равен по модулю току в ветви с индуктивностью I_L . При этом величины токов I_L и I_C могут быть во много раз больше общего тока в цепи. Это явление называется резонансом токов.

Так как при резонансе токи I_L и I_C будут колебаться в противофазе, то их сумма, равная общему току в цепи, будет стремиться к нулю, а полное сопротивление цепи Z к бесконечности.

Основными характеристиками при анализе цепей, содержащих активные и реактивные элементы, являются частотные характеристики и добротность Q .

Частотными характеристиками, называются зависимости тока и напряжения, протекающих в цепи от частоты сигнала $U = f(\omega)$ и $I = f(\omega)$. Часто эти характеристики называют резонансными кривыми.

Добротность колебательного контура Q равна отношению реактивного сопротивления элементов к активному при резонансной частоте. Эта величина характеризует ширину резонансных кривых.

$$Q = \frac{\omega_{\text{рез}} L}{r} = \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C \cdot r}. \quad (3.4)$$

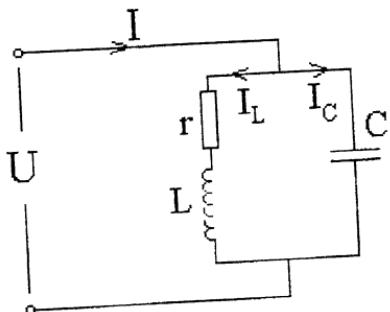


Рис. 3.7. Параллельное соединение катушки индуктивности и конденсатора

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 3.8. Ключи K_1 - K_4 позволяют менять схему соединения активных и реактивных элементов цепи.

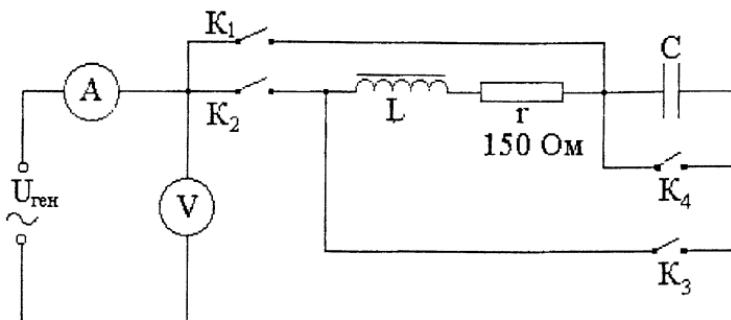


Рис. 3.8. Электрическая схема лабораторной установки

Положение 1: замкнуты ключи K_2 и K_4 , разомкнуты K_1 и K_3 . В этом положении катушка индуктивности соединена последовательно с активным сопротивлением в соответствии с рисунком 3.4.

Положение 2: замкнут ключ K_2 , разомкнуты K_1 , K_3 и K_4 . В этом положении включена схема последовательного колебательного контура (рисунок 3.5).

Положение 3: замкнуты ключи K_1 и K_3 , разомкнуты K_2 и K_4 . В этом положении включена схема параллельного колебательного контура (рисунок 3.7).

Порядок выполнения работы.

Часть 1. Исследование цепи с активным и индуктивным сопротивлением.

1. Включите генератор переменного сигнала. Подождите 10 минут, пока генератор не выйдет на полную мощность.

2. Замкните ключи K_2 и K_4 . Проследите за тем, чтобы ключи K_1 и K_3 были разомкнуты.

3. Установите частоту напряжения на выходе генератора $f = 50$ Гц.

4. Установите величину выходного напряжения $U \approx 15$ В (не обязательно точно).

5. Измерьте ток в цепи I .

6. Повторите измерения напряжения и тока при частотах 100 и 150 Гц. Результаты занесите в таблицу 3.1.

Часть 2. Исследование частотных характеристик последовательного колебательного контура.

7. Узнайте у преподавателя и запишите емкость конденсатора, подключенного к схеме.

8. Замкните ключ K_2 . Проследите за тем, чтобы ключи K_1 , K_3 и K_4 были разомкнуты.

9. Установите частоту напряжения на выходе генератора $f = 20$ Гц.

10. Изменяйте частоту напряжения от 20 до 200 Гц с шагом 20 Гц. При каждом значении частоты измеряйте величины тока и напряжения в цепи. Результаты занесите в таблицу 3.2.

11. Как можно точнее определите и запишите резонансную частоту $f_{\text{рез1}}$, при которой ток в цепи будет максимальен, а напряжение минимально.

Часть 3. Исследование частотных характеристик параллельного колебательного контура.

12. Замкните ключи K_1 и K_3 . Проследите, за тем, чтобы ключи K_2 и K_4 были разомкнуты.

13. Установите частоту напряжения на выходе генератора $f = 20$ Гц.

14. Изменяйте частоту напряжения от 20 до 200 Гц с шагом 20 Гц. При каждом значении частоты измеряйте величины тока и напряжения в цепи. Результаты занесите в таблицу 3.3.

15. Как можно точнее определите и запишите резонансную частоту $f_{\text{рез2}}$, при которой ток в цепи будет минимальен, а напряжение максимальным.

Таблица 3.1

Зависимость тока и напряжения от частоты на катушке индуктивности

f, Гц	Измерить		Вычислить	
	U, В	I, мА	ω , с ⁻¹	Z, Ом
50				
100				
150				

Таблица 3.2

Зависимость тока и напряжения от частоты
на последовательном колебательном контуре

f, Гц	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
U, В										
I, мА										

$$f_{\text{рез1}} =$$

Таблица 3.3

Зависимость тока и напряжения от частоты
на параллельном колебательном контуре

f, Гц	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
U, В										
I, мА										

$$f_{\text{рез2}} =$$

Обработка результатов измерений.

1. По данным таблицы 3.1 определите полное сопротивление первой схемы Z по формуле 3.1. Результаты занесите в таблицу 3.1.
 2. По данным таблицы 3.1 определите индуктивность катушки L по формуле 3.2. Результаты занесите в таблицу 3.1.
 3. Рассчитайте среднее значение индуктивности L_1 .
 4. Постройте по данным таблицы 3.2 частотные характеристики последовательного контура $U = f(f)$ и $I = f(f)$ (можно на одном графике).
 5. По резонансной частоте последовательного колебательного контура f_{pe1} вычислите величину индуктивности катушки L_2 по формуле 3.3.
 6. Рассчитайте добротность последовательного контура Q_2 по формуле 3.4.
 7. Постройте по данным таблицы 3.3 частотные характеристики параллельного контура $U = f(f)$ и $I = f(f)$ (можно на одном графике).
 8. По резонансной частоте последовательного колебательного контура f_{pe2} вычислите величину индуктивности катушки L_3 по формуле 3.3.
 9. Рассчитайте добротность параллельного контура Q_3 по формуле 3.4.
 10. Сравните значения индуктивности катушки L_1 , L_2 и L_3 измеренные тремя разными способами. Сделайте выводы.
- Контрольные вопросы.
1. Как связаны между собой мгновенные, амплитудные и действующие значения токов и напряжений?
 2. Изобразите переменное напряжение $u(t) = U_m \sin(\omega t + p/3)$ в виде вектора.
 3. В каких единицах измеряются индуктивность и емкость?
 4. Какое явление называется резонансом напряжений? Резонансом токов?
 5. При каких условиях возникают резонансы токов и напряжений?
 6. Постройте векторную диаграмму напряжений в цели с последовательным соединением элементов r , L и C .
 7. Отличаются ли резонансные частоты последовательного и параллельного контуров?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

Цель работы.

1. Изучить принцип действия и устройство трансформатора.
 2. Определить основные характеристики трансформатора.
 3. Изучить работу трансформатора в режимах холостого хода и нагрузки.
- Оборудование.

1. Трансформатор.

2. Вольтметр переменного тока — 2 шт.
3. Амперметр переменного тока — 2 шт.
4. Ваттметр переменного тока — 2 шт.
5. Реостат на 30 ом.
6. Двухполюсный ключ.

Основные сведения.

Трансформатором называется электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

Трансформатор имеет две или более обмоток, создающих общий магнитный поток Φ_M . Для усиления магнитной связи между обмотками их размещают на сердечнике, изготовленном из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь). См. рисунок 4.1.

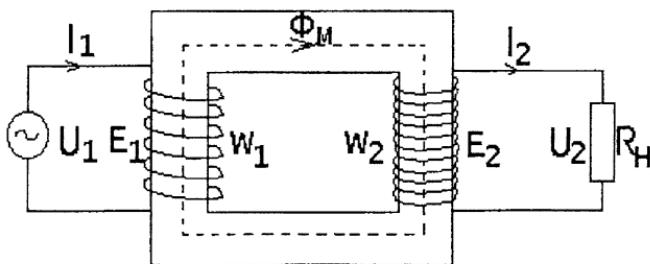


Рис. 4.1. Схема однофазного трансформатора

Обмотку, включенную на напряжение источника U_1 , называют первичной. Обмотка, к которой подключается потребитель электрической энергии R_H (нагрузка), называется вторичной.

Переменное напряжение U_1 , подведенное к первичной обмотке трансформатора, вызывает в ней ток I_1 , который возбуждает в ней переменный магнитный поток, амплитудой Φ_m . Магнитный поток концентрируется в пределах сердечника и пронизывает все обмотки (первичную и вторичные).

Под действием переменного магнитного потока в обмотках трансформатора индуцируется ЕДС электромагнитной индукции:

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

где ω_1 и ω_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках.

Отношение мгновенных и действующих значений ЭДС в обмотках равно отношению числа витков.

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

При работе трансформатора в режиме холостого хода, соответствующем подключению к бесконечному сопротивлению нагрузки R_H , напряжение вторичной обмотки U_2 равно ее ЭДС E_2 , а напряжение U_1 , приложенное к первичной обмотке равно ЭДС E_1 . Тогда:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = K. \quad (4.1)$$

Отношение напряжения вторичной обмотки к напряжению вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора, равно отношению числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки и называется коэффициентом трансформации K .

Если коэффициент трансформации $K > 1$, то трансформатор называется повышающим, так как выходное напряжение U_2 , больше чем входное U_1 . Наоборот, если коэффициент трансформации $K < 1$, трансформатор называется понижающим.

Трансформатор находится в рабочем режиме, если его вторичная обмотка подключена к нагрузке и через нее течет ток I_2 .

Зависимость напряжения на нагрузке от тока вторичной цепи $U_2 = f(I_2)$ называется внешней характеристикой трансформатора. До тех пор, пока ток вторичной цепи не превышает номинального значения, напряжение U_2 меняется мало (не более чем на 3 % от напряжения холостого хода). При больших значениях тока резко возрастают потери в обмотках, происходит их перегрев и трансформатор может выйти из строя.

Коэффициент мощности равен отношению активной мощности P_a , передаваемой трансформатором к потребителю, к полной мощности S вторичной цепи.

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{S} = \frac{P_a}{U_2 I_2}. \quad (4.2)$$

В режиме холостого хода коэффициент мощности стремиться к нулю. С ростом тока нагрузки коэффициент мощности возрастает и при номинальном значении тока нагрузки составляет 0,7—0,8. При дальнейшем росте тока нагрузки коэффициент мощности стремиться к 1. Это соответствует перегрузке трансформатора и сопровождается падением коэффициента полезного действия и выходом трансформатора из строя.

Важным эксплуатационным показателем трансформатора является коэффициент полезного действия h . Его значение зависит от величины потерь энергии в трансформаторе.

Часть активной мощности первичной обмотки трансформатора P_1 расходуется на нагревание проводов первичной обмотки $P_{\text{пп1}}$, на работу по перемагничиванию материала сердечника $P_{\text{маг}}$. Оставшаяся (большая) часть P_{12} передается во вторичную обмотку.

$$P_1 = P_{12} + P_{\text{пп1}} + P_{\text{маг}}.$$

Во вторичной обмотке часть мощности $P_{\text{пп2}}$ расходуется на нагревание проводов вторичной обмотки, а оставшаяся (большая) часть P_2 передается потребителю (нагрузке R_H).

$$P_2 = P_1 - P_{\text{пп1}} - P_{\text{пп2}} - P_{\text{маг}}.$$

Отношение мощности нагрузки P_2 к мощности, потребляемой из сети, P_1 называется коэффициентом полезного действия трансформатора (КПД).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%. \quad (4.3)$$

Активные мощности P_1 и P_2 измеряются ваттметрами,ключенными в первичную и вторичную цепи трансформатора.

Мощность магнитных потерь $P_{\text{маг}}$ остается примерно постоянной в различных режимах работы трансформатора. Мощности электрических потерь в проводниках обмоток $P_{\text{пп1}}$ и $P_{\text{пп2}}$ возрастают пропорционально квадрату токов. Значение тока нагрузки, при котором мощности магнитных и электрических потерь равны, называется номинальным током. При номинальном токе максимальных значений достигает коэффициент полезного действия трансформатора.

КПД трансформатора в режиме холостого хода равен нулю. При увеличении тока нагрузки он возрастает и при номинальных значениях тока может достигать 99 %.

Лабораторная установка позволяет определить основные параметры работы трансформатора.

Электрическая схема лабораторной установки приведена на рисунке 4.2.

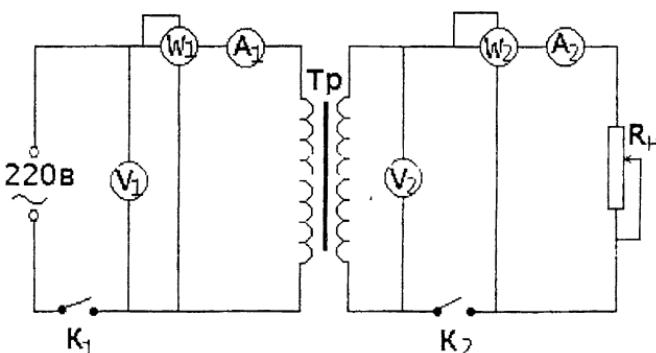


Рис. 4.2. Электрическая схема лабораторной установки

Питание лабораторной установки осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В.

Вольтметры V_1 и V_2 измеряют соответственно напряжения первичной и вторичной обмоток U_1 и U_2 . Амперметры A_1 и A_2 измеряют токи I_1 и I_2 . Ваттметр W_1 измеряет активную мощность, потребляемую трансформатором из сети P_1 . Ваттметр W_2 измеряет мощность нагрузки P_2 .

В режиме холостого хода, цепь вторичной обмотки размыкается ключом K_2 , а первичная обмотка подключается на напряжение сети 220 В. Вся мощность, потребляемая трансформатором $P_{1,xx}$ в этом режиме расходуется на магнитные потери в сердечнике. В нагруженном режиме мощность магнитных потерь будет иметь такое же значение.

В рабочем режиме вторичная обмотка трансформатора подключается к реостату R_H , с помощью которого можно изменять сопротивление нагрузки в широких пределах.

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с типами и пределами измерения измерительных приборов и порядком их включения в схему.
2. Включить установку в сеть. Для этого замкнуть ключ K_1 .
3. Исследовать работу трансформатора в режиме холостого хода. Для этого разомкнуть ключ K_2 . Результаты измерений занести в таблицу 4.1.
4. Исследовать работу трансформатора в рабочем режиме. Для этого замкнуть ключ K_2 . С помощью реостата R_H установить значение тока нагрузки от 0,5 до 2,5 А, с шагом 0,5 А. При каждом значении тока измерить величины U_1 , U_2 , I_1 , I_2 , W_1 , W_2 . Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.1

Режим холостого хода трансформатора

Измерить				Вычислить
$U_{1\text{хх}}, \text{В}$	$I_{1\text{хх}}, \text{А}$	$P_{1\text{хх}}, \text{Вт}$	$U_{2\text{хх}}, \text{В}$	K

Таблица 4.2

Рабочий режим трансформатора

Измерить						Вычислить			
$I_2, \text{А}$	$I_1, \text{А}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$W_1, \text{Вт}$	$W_2, \text{Вт}$	$\cos\phi$	$\eta, \%$	$\Delta P, \text{Вт}$	$P_{\text{пп}}, \text{Вт}$
0,5									
1									
1,5									
2									
2,5									

Обработка результатов измерений.

- По данным режима холостого хода определить коэффициент трансформации по формуле 4.1. Занести результат в таблицу.
- По данным рабочего режима рассчитать $\cos\phi$ и КПД (η) по формулам 4.2 и 4.3. Результаты занести в таблицу.
- Определить мощность потерь в трансформаторе $\Delta P = P_1 - P_2$. Результаты занести в таблицу.
- Определить мощность электрических потерь в проводах обмоток $P_{\text{пп}} = \Delta P - P_{1\text{хх}}$. Результаты занести в таблицу.
- Построить графики:
 - $U_2 = f(I_2)$,
 - $\cos\phi = f(I_2)$,
 - $\eta = f(I_2)$,
 - $P_{\text{пп}} = f(I_2)$.
- Сделайте выводы. Каким является трансформатор повышающим или понижающим? Как изменяются параметры работы трансформатора при изменении тока нагрузки? Как зависит мощность электрических потерь в проводах обмоток от тока нагрузки?

Контрольные вопросы.

- Какое устройство называется трансформатором?
- Чем отличается повышающий трансформатор от понижающего?
- Какова природа ЭДС, возникающих в обмотках трансформатора?
- Что такое коэффициент трансформации? Может ли он быть равен единице?
- Для каких целей служит сердечник трансформатора?
- Что произойдет, если трансформатор подключить к цепи постоянного тока?
- Какие потери существуют в трансформаторе?
- Как зависит КПД трансформатора от тока нагрузки?
- Как изменится выходное напряжение трансформатора, если частоту переменного тока в первичной цепи увеличить в два раза?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Цель работы.

1. Изучить устройство и принцип действия различных сглаживающих фильтров.

2. Установить области применения различных сглаживающих фильтров.

Оборудование.

1. Лабораторный стенд с выпрямителем и набором сглаживающих фильтров.

2. Стрелочный вольтметр.

3. Цифровой вольтметр.

4. Осциллограф.

Основные сведения.

Мостовой выпрямитель, является одной возможных схем двухполупериодного выпрямителя. Он преобразует переменное синусоидальное напряжение в пульсирующее напряжение одного знака (см. рисунки 5.1 и 5.2).

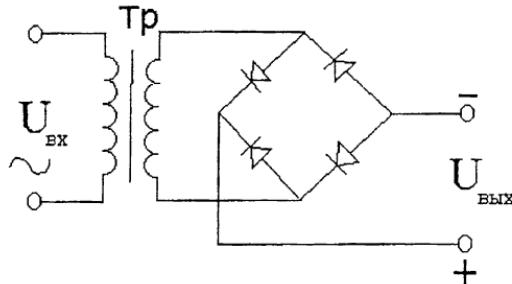


Рис. 5.1. Принципиальная схема мостового выпрямителя

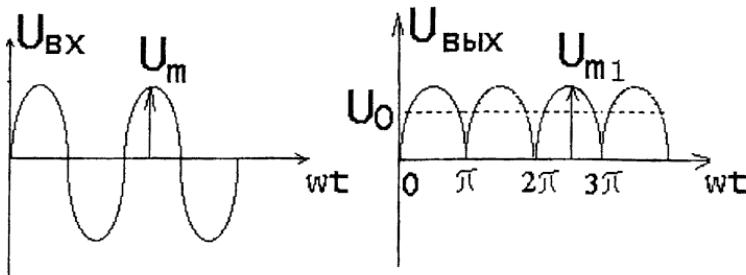


Рис. 5.2. Временные диаграммы напряжений на входе и выходе выпрямителя

Пульсирующее выходное напряжение характеризуется средним значением выпрямленного напряжения U_0 (постоянная составляющая выходного напряжения) которое равно:

$$U_0 = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{\tau} U_{\text{вых}}(t) \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \varphi \cdot d\varphi = \frac{2}{\pi} U_m = 0,9 U_D, \quad (5.1)$$

где U_m и U_D — соответственно амплитудное и действующие значения входного переменного напряжения.

Кроме того, используют амплитудное значение основной гармоники переменной составляющей выходного напряжения U_{m1} (переменная составляющая напряжения). Выпрямленное напряжение можно представить как сумму постоянной и переменной составляющей:

$$U_{\text{выпр}} = U_0 + U_{\approx} = U_0 + U_{m1} \sin \omega t.$$

Степень пульсации выходного напряжения характеризуется коэффициентом пульсации выходного напряжения K_Π :

$$K_\Pi = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{\sqrt{2} U_{m1,D}}{U_0}, \quad (5.2)$$

где $U_{m1,D}$ — действующее значение переменной составляющей выходного напряжения, измеряемое цифровым вольтметром;

U_0 — среднее значение напряжения, измеряемое стрелочным вольтметром.

Для питания большинства электронных устройств, коэффициент пульсации напряжения должен быть как можно меньше. Чтобы сгладить зависимость выходного напряжения от времени используют сглаживающие фильтры. Они пропускают постоянную составляющую пульсирующего напряжения и задерживают переменную составляющую.

Эффективность работы сглаживающего фильтра оценивается коэффициентом сглаживания q . Коэффициент сглаживания показывает, во сколько раз уменьшается коэффициент пульсации выходного напряжения при включении фильтра.

$$q = \frac{K_{\Pi,\text{безФ}}}{K_{\Pi,\text{сФ}}}. \quad (5.3)$$

У хороших фильтров коэффициент сглаживания может достигать нескольких тысяч.

В качестве сглаживающего фильтра может использоваться индуктивная катушка, включенная последовательно с нагрузкой (L -фильтр). См. рисунок 5.3.

Постоянная и переменная составляющие напряжения распределяются между фильтром и нагрузкой, пропорционально их сопротивлению. Для постоянной составляющей напряжения сопротивление L -фильтра равно актив-

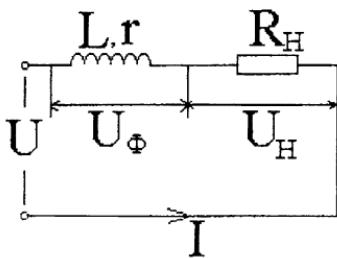


Рис. 5.3. Схема работы L -фильтра

ному сопротивлению катушки r , которое стараются сделать как можно меньше. Для переменной составляющей напряжения катушка будет обладать полным сопротивлением Z , которое примерно равно индуктивному сопротивлению $X_L = \omega L$, которое много больше активного. Активным сопротивлением катушки можно пренебречь. В этом случае:

$$U_{0H} = \frac{R_H}{R_H + r} U_0 \approx U_0;$$

$$U_{m1H} = \frac{R_H}{R_H + Z} U_{m1} \approx \frac{R_H}{R_H + \omega L} U_{m1}.$$

Коэффициент сглаживания L -фильтра будет равен:

$$q_L = \frac{K_{\Pi\phi}}{K_{\Pi\phi}} = \frac{U_{m1}}{U_0} \cdot \frac{U_{0H}}{U_{m1H}} = 1 + \frac{\omega L}{R_H}. \quad (5.4)$$

Видно, что коэффициент сглаживания L -фильтра зависит не только от характеристик самого фильтра (индуктивности L), но и от сопротивления нагрузки R_H . Если сопротивление нагрузки мало, по сравнению с индуктивным сопротивлением фильтра ($R_H \ll \omega L$), то коэффициент сглаживания может быть сколь угодно большим. Это означает, что L -фильтр будет работать эффективно. Если же сопротивление нагрузки велико ($R_H > \omega L$) по сравнению с индуктивным сопротивлением фильтра, то $q \rightarrow 1$. Это значит, что фильтр становится бесполезен и не способен уменьшить пульсацию напряжения на нагрузке.

Необходимо помнить, что для эффективной работы сглаживающего фильтра, его характеристики должны быть согласованы с нагрузкой. Малое сопротивление нагрузки соответствует большой передаваемой мощности. То есть индуктивный L -фильтр имеет смысл использовать в мощных выпрямителях. При больших сопротивлениях нагрузки и малых мощностях, для эффективной работы L -фильтра необходимо использовать катушку с большим индуктивным сопротивлением ωL . Это трудновыполнимо, так как катушка с индуктивностью в несколько Генри, представляет собой громоздкое устройство весом в несколько килограмм и обладающее большим активным сопротивлением.

Другой распространенный тип сглаживающего фильтра: C -фильтр. Он представляет собой конденсатор, включенный параллельно с нагрузкой. См. рисунок 5.4.

Временные диаграммы напряжения в цепи с C -фильтром приведены на рисунке 5.5. Пока мгновенные значения напряжения в цепи возрастают, конденсатор заряжается (накапливает энергию). На диаграмме этот процесс соответствует участкам $0A$, BC и DE . Когда мгновенные значения напряжения в цепи начинают уменьшаться, конденсатор начинает разряжаться через сопротивление нагрузки (отдает накопленную энергию). Напряжение на нагрузке по мере разряда конденсатора уменьшается по экспоненциальному закону (участки AB и CD).

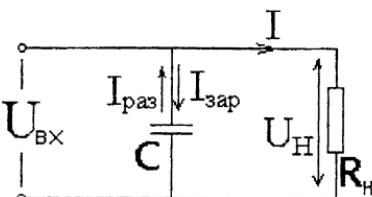


Рис. 5.4. Схема работы C -фильтра
разряда конденсатора (заряд конденсатора уменьшается в e раз) зависит от емкости конденсатора и величины подключенного сопротивления:

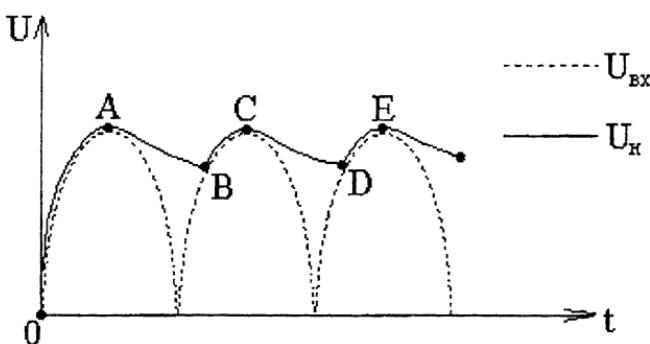


Рис. 5.5. Временные диаграммы напряжения в цепи с C -фильтром

Характерное время разряда конденсатора (время, за которое заряд на обкладках конденсатора уменьшается в e раз) зависит от емкости конденсатора и величины подключенного сопротивления:

$$\tau = R_H C.$$

Для того, чтобы C — фильтр обеспечивал эффективное слаживание выпрямленного напряжения, необходимо, чтобы характерное время разряда конденсатора τ было больше периода колебаний напряжения T .

$$\tau \geq T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Коэффициент слаживания C -фильтра приблизительно можно определить по формуле:

$$q_C \approx \left(1 + \frac{R_H C}{T} \right). \quad (5.5)$$

Видно, что коэффициент слаживания C -фильтра зависит не только от емкости конденсатора C , но и от сопротивления нагрузки R_H . При больших

сопротивлениях нагрузки ($R_H > T/C$) коэффициент сглаживания может быть сколь угодно большим. Это означает, что С-фильтр будет работать эффективно. Если же сопротивление нагрузки мало ($R_H < T/C$), то $q \rightarrow 1$. Это значит, что фильтр становится бесполезен и не способен уменьшить пульсацию напряжения на нагрузке.

Использование С-фильтров является оправданным в выпрямителях малой мощности.

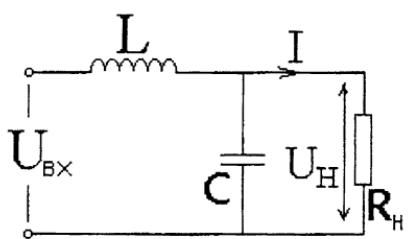


Рис. 5.6. Схема LC-фильтра
гружи $q = f(R_H)$. Схема лабораторной установки приведена на рисунке 5.7.

Для того, чтобы совместить достоинства L - и C -фильтров используют комбинированные LC -фильтры. Схема представлена на рисунке 5.6.

В работе требуется исследовать эффективность работы сглаживающих фильтров различной конструкции в разных условиях. То есть снять зависимость коэффициента сглаживания от величины сопротивления на-

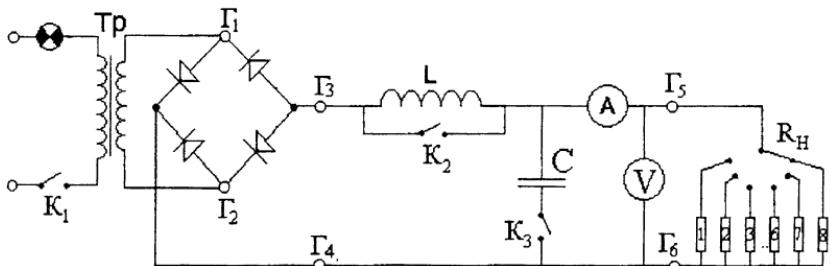


Рис. 5.7. Электрическая схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы.

1. Включить лабораторную установку выключателем K_1 . Лампочка на передней панели стенда должна загореться.
2. Переключите выключатель K_2 в положение « L -фильтр выкл.», переключатель K_3 в положение « C -фильтр выкл.», а переключатель R_H в положение 3.
3. Подключите осциллограф к гнездам Γ_1 и Γ_2 и зарисуйте осцилограмму входного напряжения выпрямителя.
4. Подключите осциллограф к гнездам Γ_3 и Γ_4 и зарисуйте осцилограмму выходного напряжения выпрямителя.
5. Подключите осциллограф и цифровой вольтметр к гнездам Γ_5 и Γ_6 .

6. Переведите переключатель R_H в положение 1, соответствующее минимальному сопротивлению нагрузки.

7. Измерьте среднее значение напряжения U_0 при помощи стрелочного вольтметра и действующее значение переменной составляющей напряжения $U_{\text{нд}}$ при помощи цифрового вольтметра.

8. Переключателем R_H изменяйте сопротивление нагрузки, каждый раз измеряя U_0 и U_{mid} . Результаты занесите в таблицу 5.1. Переключите выключатель K_2 в положение «*L-фильтр вкл.*». Повторите пункты 6—8. Результаты занесите в таблицу 5.2. Зарисуйте осциллограмму выходного напряжения при положении переключателя $R_H = 1$.

9. Переключите выключатель K_2 в положение « L -фильтр выкл.», переключатель K_3 в положение « C -фильтр вкл.». Повторите пункты 6—8. Результаты занесите в таблицу 5.3. Зарисуйте осциллограмму выходного напряжения при положении переключателя $R_u = 8$.

10. Переключите выключатель K_2 в положение «L-фильтр вкл.», переключатель K_3 в положение «C-фильтр вкл.». Повторите пункты 6—8. Результаты занесите в таблицу 5.4. Зарисуйте осциллограмму выходного напряжения при положении переключателя $R_u = 4$.

11. Выключите вольтметр, осциллограф и лабораторный стенд.

Таблица 5.1

Результаты измерения параметров выходного напряжения выпрямителя без фильтра

Таблица 5.2

Результаты измерения параметров выходного напряжения выпрямителя с L -фильтром

Таблица 5.3

Результаты измерения параметров выходного напряжения
выпрямителя с С-фильтром

№	1	2	3	4	5	6	7	8
R_H , Ом								
U_0 , В								
U_{m1D} , В								
LgR_H								
K_{Pcf}								
q_C								

Таблица 5.4

Результаты измерения параметров выходного напряжения
выпрямителя с LC-фильтром

№	1	2	3	4	5	6	7	8
R_H , Ом								
U_0 , В								
U_{m1D} , В								
LgR_H								
K_{Pcf}								
q_L								

Обработка результатов измерений.

- Вычислите коэффициенты пульсации выпрямленного напряжения K_{Pcf} при различных значениях сопротивления нагрузки по формуле 5.2. Результаты занесите в таблицы 5.1, 5.2, 5.3 и 5.4.
- Вычислите коэффициенты сглаживания L, C и LC фильтров при различных значениях сопротивления нагрузки по формуле 5.3. Результаты занесите в таблицы 5.2, 5.3 и 5.4.
- Постройте графики зависимости коэффициентов сглаживания фильтров от десятичного логарифма сопротивления нагрузки $q_L = f(LgR_H)$, $q_C = f(LgR_H)$ и $q_{LC} = f(LgR_H)$.
- Сделайте выводы как изменяется коэффициент сглаживания фильтров различной конструкции при изменении сопротивления нагрузки. Когда применение каждого из фильтров является целесообразным?

Контрольные вопросы.

- Что такое выпрямитель?
- Для чего используется сглаживающий фильтр?
- Что называется переменной составляющей выпрямленного напряжения?

4. От чего зависит коэффициент пульсации выпрямленного напряжения?
5. Почему используются разные типы сглаживающих фильтров?
6. Что называется реактивным сопротивлением емкости и индуктивности?
7. При каком условии сглаживающий L-фильтр не будет выполнять своей задачи?
8. В качестве сглаживающих C-фильтров используют конденсаторы емкостью 1 мкФ и 10 мкФ. В каком случае будет больше коэффициент сглаживания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы.

1. Изучить конструкцию и основные особенности измерительных приборов.
2. Проверить точность показаний амперметра и вольтметра.
3. Определить их основную погрешность и класс точности.

Оборудование.

1. Вольтметр рабочий.
2. Вольтметр образцовый.
3. Амперметр рабочий.
4. Амперметр образцовый.
5. Реостат.
6. Источник питания переменного тока.

Основные сведения.

Измерением называется процесс сравнения измеряемой величины с образцовой величиной того же рода, принятой за единицу измерения.

Устройство, предназначенное для сравнения измеряемой величины с единицей измерения, называется измерительным прибором.

Измерительные приборы делятся на образцовые и рабочие. Рабочие приборы используются для практических измерений. Образцовые приборы предназначены для проверки и градуировки рабочих приборов. Значение измеряемой величины, найденное при помощи образцового прибора, принимается за действительное. Результаты измерения, при помощи рабочего прибора всегда отличаются от действительных значений.

Разница между измеренным $A_{изм}$ и действительным значением величины A составляет абсолютную погрешность прибора DA (часто ее называют поправкой).

$$\Delta A = A_{изм} - A. \quad (6.1)$$

Из этого следует, что для получения действительного значения измеряемой величины, необходимо из показаний рабочего прибора вычесть абсолютную погрешность.

Точность измерений при разных значениях измеряемой величины, характеризуется относительной погрешностью, которая равна отношению аб-

абсолютной погрешности прибора к значению измеренной величины и выражается в процентах.

$$\delta = \pm \frac{\Delta A}{A_{\text{изм}}} \cdot 100 \%. \quad (6.2)$$

Для оценки точности рабочих приборов служит приведенная погрешность. Эта погрешность равна отношению абсолютной погрешности к верхнему пределу измерения прибора (нормирующее значение шкалы) A_H выраженному в процентах.

$$\gamma_{np} = \pm \frac{\Delta A}{A_H} \cdot 100 \%. \quad (6.3)$$

Приведенная погрешность — это основная погрешность прибора. Она зависит от качества изготовления прибора и стабильности характеристик его элементов (растяжки, магнита, резисторов и т.д.).

В зависимости от пределов допускаемой приведенной погрешности, приборам присваивают классы точности К (ГОСТ 13600-68): 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Класс точности (цифра, указанная рядом с гостом на шкале прибора) показывает максимальное допустимое значение приведенной погрешности для данного прибора.

$$K = \gamma_{max}.$$

Зная класс точности прибора, легко определить относительную и абсолютную погрешности:

$$\delta = K \frac{A_H}{A_{\text{изм}}}; \Delta A = \frac{K \cdot A_H}{100 \%}.$$

Деления на шкалах прибора должны обеспечивать возможность отсчета измеряемой величины с точностью не ниже определяемой классом точности.

Полученная формула для относительной погрешности позволяет оценить точность произведенного измерения. Видно, что для повышения точности необходимо следить за тем, чтобы измеренное значение величины находилось как можно ближе к пределу измерения прибора.

Электрическая схема лабораторной установки приведена на рисунке 6.1

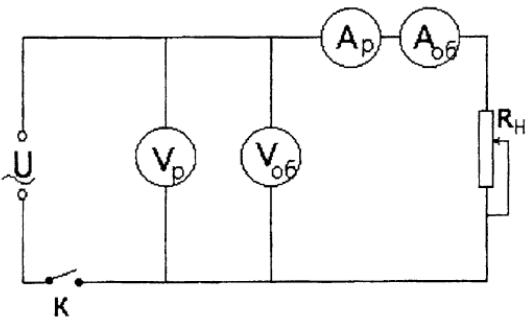


Рис. 6.1. Схема лабораторной установки

Кроме класса точности измерительные приборы отличаются системой. Система прибора говорит о механизме работы прибора.

В приборах электромагнитной системы отклонение измерительной стрелки происходит за счет взаимодействия неподвижной катушки с током и подвижного ферромагнитного сердечника.

Такие приборы обозначаются значком



на шкале.

В приборах магнитоэлектрической системы подвижная катушка с током взаимодействует с неподвижным постоянным магнитом.

Обозначение:



В приборах электродинамической системы взаимодействуют две катушки с током — подвижная и неподвижная.

Обозначение:



Существуют и другие системы измерительных приборов.

Порядок выполнения работы.

1. Запишите основные характеристики рабочих и образцовых приборов в таблицу 6.1.

2. Корректором установите стрелки приборов на нуль.

3. Включите схему ключом К.

4. Плавно изменяйте напряжение от минимального до максимального значения допустимого проверяемым вольтметром (рабочим прибором).

5. Стрелку проверяемого прибора последовательно устанавливайте на всех делениях шкалы. Для всех этих точек запишите показания проверяемого и образцового прибора в таблицу 6.2.

6. Проведите измерения сначала при возрастающих значениях, а затем при убывающих. Во время опыта следите, чтобы стрелка подходила к очередной отметке плавно и только с одной стороны.

7. Повторите пункты 4—6 для проверяемого и образцового амперметров.

Таблица 6.1

Технические характеристики приборов

№ п/п	Наименование прибора	Тип прибора	Система прибора	Предел измерения	Цена деления	Класс точности	Заводской номер	Год выпуска
1.								
2.								
3.								
4.								

Таблица 6.2

Результаты проверки приборов

		Показания вольтметра						Значение приведенной погрешности		
Проверяемого		Показания образцового прибора при восходящих отсчетах		Поправка при восходящих отсчетах		Показания образцового прибора при нисходящих отсчетах				
	V	деления	V		V	деления	V		V	%
1										
2										
3										
...										

		Показания амперметра						Значение приведенной погрешности		
Проверяемого		Показания образцового прибора при восходящих отсчетах		Поправка при восходящих отсчетах		Показания образцового прибора при нисходящих отсчетах				
	A	деления	A		A	деления	A		A	%
1										
2										
3										
...										

Обработка результатов измерений.

1. По полученным данным определить поправки для восходящих и нисходящих отсчетов.
2. Для каждого из значений измеренной величины определить приведенную погрешность по большему из двух значений поправки.
3. По наибольшему из получившихся значений приведенной погрешности определить класс точности проверяемого прибора.
4. Построить графики поправок $\Delta A = f(A)$ для каждого из приборов при восходящих и нисходящих отсчетах.

Контрольные вопросы.

1. По какой из погрешностей определяют класс точности измерительного прибора: абсолютной, относительной или приведенной?
2. Амперметр имеет предел измерения 5 А и класс точности 0,2. Чему равно максимальное значение абсолютной погрешности прибора?
3. К какому классу точности можно отнести прибор, если при проверке получены следующие значения приведенной погрешности: +0,2; -0,9; +0,7; -0,3?

4. Вольтметр имеет предел измерения 250 В и класс точности 1,5. С его помощью измерено напряжение 125 В. Определите относительную погрешность измерения.

5. Может ли ваттметр с пределом измерения 100 Вт и классом точности 0,5 давать абсолютную погрешность 0,2 Вт?

6. Какие системы электроизмерительных приборов вам известны?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НА ТИРИСТОРАХ

Цель работы.

1. Изучить принцип действия полупроводникового тиристора.
2. Исследовать работу управляемого выпрямителя.

Оборудование.

1. Лабораторный стенд с управляемым выпрямителем.
2. Осциллограф.
3. Цифровой вольтметр.

Основные сведения.

Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования переменного синусоидального напряжения в напряжение одного знака. Основным элементом любого выпрямителя является вентиль. Вентиль представляет собой устройство, через которое электрический ток может протекать только в одном направлении. В настоящее время в качестве вентилей, как правило, применяют полупроводниковые диоды.

Полупроводниковый диод состоит из двух полупроводников с различными типами проводимости. В полупроводнике *n*-типа (*n* от «негатив») основными подвижными носителями электрического заряда являются электроны, а в полупроводнике *p*-типа (*p* от «позитив») положительно заряженные «дырки» — вакансии в кристаллической решетке.

Область контакта двух полупроводников различного типа называется электронно-дырочным или *p-n* переходом. См. рисунок 7.1.

Если к полупроводнику *p*-типа приложить положительный потенциал, а к полупроводнику *n* — отрицательный, то через диод потечет большой ток. Сопротивление *p-n* перехода при таком «прямом» подключении составляет несколько Ом. Такие ток и напряжение называются прямыми и соответствуют открытому состоянию диода.

При противоположной полярности внешнего напряжения, сопротивление *p-n* перехода достигает нескольких миллионов Ом. Ток протекающий че-

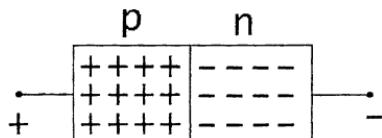


Рис. 7.1. Схема
полупроводникового диода

рез диод уменьшается практически до нуля. Такое напряжение и ток называются обратными и соответствуют закрытому состоянию диода.

Электрод, подведенный к полупроводнику р-типа называется анодом, а к полупроводнику п-типа — катодом. Условное обозначение полупроводникового диода приведено на рисунке 7.2.

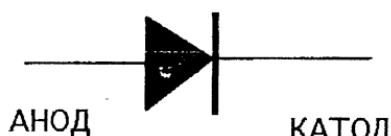


Рис. 7.1. Условное обозначение полупроводниковых диодов

В течении первого полупериода, входное напряжение положительно, диод D_1 открыт, диод D_2 закрыт. Через нагрузку течет ток, совпадающий с входным.

Наибольшее распространение имеют двухполупериодные выпрямители (рис. 7.3). На вход подается переменное синусоидальное напряжение $U_{\text{вх}}$ с периодом T . В течении первого полупериода, входное напряжение положительно, диод D_1 открыт, диод D_2 закрыт. Через нагрузку течет ток, совпадающий с входным.

В течении второго полупериода, входное напряжение отрицательно, диод D_1 закрыт, а диод D_2 открыт. Через нагрузку течет ток, равный входному, но противоположный по направлению. В результате напряжение на нагрузке имеет один знак, хотя и изменяется со временем от 0 до U_m . См. рисунок 7.4.

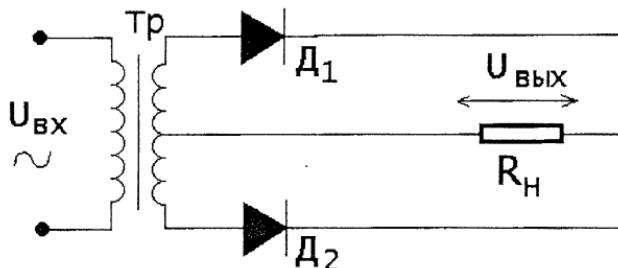


Рис. 7.3. Электрическая схема двухполупериодного выпрямителя

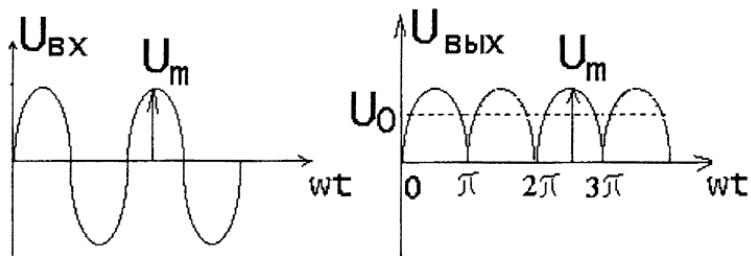


Рис. 7.4. Временные диаграммы напряжения на входе и выходе выпрямителя

Среднее значение выпрямленного напряжения двухполупериодного выпрямителя равно:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{вых}}(t) \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \varphi \cdot d\varphi = \frac{2}{\pi} U_m = 0,9 U_D, \quad (7.1)$$

где U_m и U_d — соответственно амплитудное и действующие значения входного переменного напряжения.

В тех случаях, когда необходимо регулировать величину выпрямленного тока и напряжения, применяют управляемые выпрямители.

Основу управляемых выпрямителей составляют управляемые вентили, которые называют тиристорами.

Тиристор представляет собой полупроводниковый прибор, имеющий три $p-n$ перехода. См. рисунок 7.5 и 7.6.

Тиристор имеет три вывода: анод, катод и управляющий электрод.

При прямом приложенном напряжении (плюс на аноде, минус на катоде) $p-n$ переходы Π_1 и Π_3 открыты, а переход Π_2 закрыт. Сопротивление закрытого перехода составляет миллионы Ом. Ток I_a , проходящий через тиристор крайне мал (практически ноль), тиристор находится в закрытом состоянии вплоть до очень больших значений приложенного напряжения $U_{вкл}$ (несколько десятков вольт).

При достижении напряжения $U_{вкл}$, наступает электрический пробой в переходе Π_2 и его сопротивление падает до нескольких Ом. В результате ток I_a резко возрастает, а падение напряжения на тиристоре уменьшается. Тиристор переходит в открытое состояние и остается в нем до тех пор, пока ток I_a не упадет практически до нуля.

Если на управляющий электрод подать небольшой ток управления (несколько микроампер), то значение $U_{вкл}$ уменьшится. При токе управления порядка нескольких сот мА тиристор будет переходить в открытое состояние практически при любом приложенном напряжении отличном от нуля. На рисунке 7.7 приведены вольт-амперные характеристики типичного тиристора.

При обратной полярности приложенного напряжения (минус на аноде, плюс на катоде) переходы Π_1 и Π_3

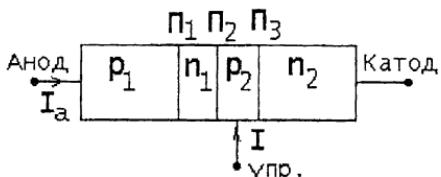


Рис. 7.5. Схема полупроводникового тиристора

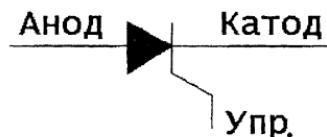


Рис. 7.6. Условное обозначение тиристора

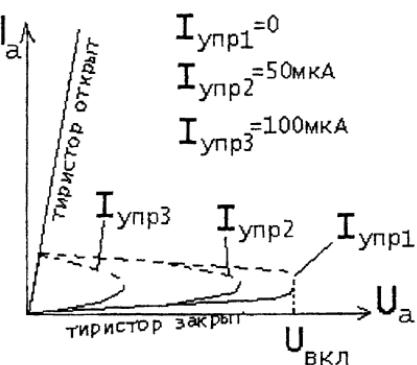


Рис. 7.7. Вольт-амперные характеристики тиристора

будут закрыты. Ток через тиристор будет практически равен нулю, независимо от величины приложенного напряжения и управляющего тока.

То есть тиристор в закрытом состоянии не пропускает электрический ток ни в одном направлении, а в открытом состоянии работает как диод, то есть пропускает ток в одном направлении: от анода к катоду.

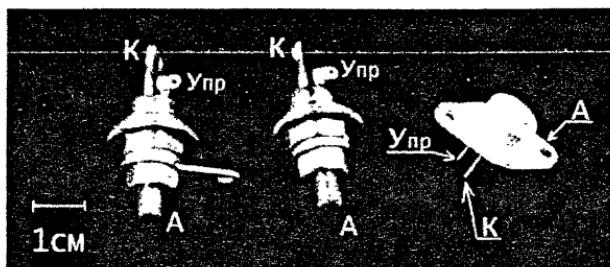


Рис. 7.8. Внешний вид некоторых мощных тиристоров

Если в схему двухполупериодного выпрямителя включить вместо диодов тиристоры (см. рисунок 7.9), то управление выпрямленным напряжением будет сводиться к управлению моментом отпирания тиристора.

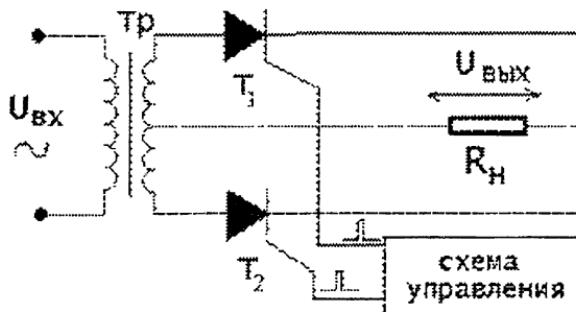


Рис. 7.9. Электрическая схема управляемого тиристорного выпрямителя

Наиболее распространенный способ управления тиристорами — импульсно-фазовый. Он заключается в том, что на управляющий электрод тиристора периодически подаются импульсы управляющего тока $I_{\text{упр}}$, которые могут сдвигаться во времени относительно начала каждого полупериода синусоидального входного напряжения $U_{\text{вх}}$. В результате меняется момент отпирания тиристора, начиная с которого и до конца полупериода тиристор находится в открытом состоянии. См. рисунок 7.10. Этот сдвиг характеризуется углом управления α , который равен:

$$\alpha = 2\pi \frac{t_{\text{откр}}}{T} = \omega \cdot t_{\text{откр}}. \quad (7.2)$$

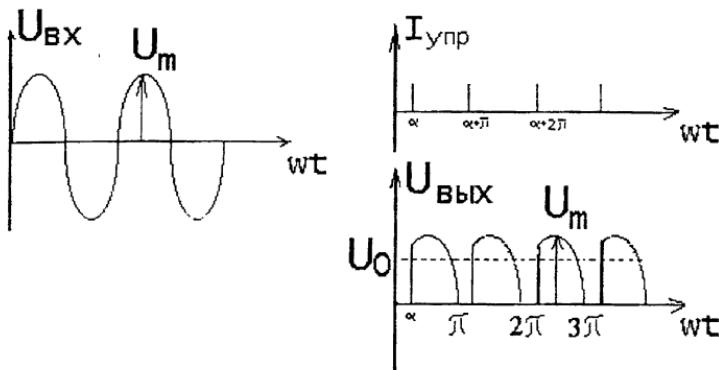


Рис. 7.10. Временные диаграммы напряжений управляемого тиристорного выпрямителя

В том случае, если угол управления $\alpha = 0$, тиристор все время открыт и работает как диод. Напряжение на нагрузке будет максимально и равно напряжению двухполупериодного выпрямителя на диодах. При увеличении угла α , значение выпрямленного напряжения (среднее) будет уменьшаться как:

$$U_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \varphi \cdot d\varphi = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) = 0,45 U_{\text{д}} (1 + \cos \alpha), \quad (7.3)$$

где U_m и $U_{\text{д}}$ — соответственно амплитудное и действующие значения входного переменного напряжения.

Зависимость величины выпрямленного напряжения от угла управления $U_0 = f(\alpha)$ называется регулировочной характеристикой выпрямителя.

Как видно из рисунка 7.10, выпрямленное напряжение имеет пульсирующий характер. Для характеристики такого напряжения, кроме среднего или постоянного значения U_0 , используют амплитудное значение основной гармоники переменной составляющей выходного напряжения U_m (переменная составляющая напряжения). Степень пульсации выходного напряжения характеризуется коэффициентом пульсации выходного напряжения K_{Π} .

$$K_{\Pi} = \frac{U_m}{U_0} = \frac{\sqrt{2} U_{m,\text{д}}}{U_0}, \quad (7.4)$$

где $U_{m,\text{д}}$ — действующее значение переменной составляющей выходного напряжения, измеряемое цифровым вольтметром.

Для питания большинства электронных устройств, коэффициент пульсации напряжения должен быть как можно меньше. Чтобы сгладить зависимость выходного напряжения от времени используют сглаживающие фильтры. Они пропускают постоянную составляющую пульсирующего напряжения и задерживают переменную составляющую.

В данной работе в качестве сглаживающего фильтра используется катушка индуктивности, включенная последовательно с нагрузкой. Сопротивление индуктивной катушки постоянному току мало, а реактивное сопротивление переменному току, растет пропорционально частоте. В результате падение переменной составляющей напряжения на нагрузке уменьшается в разы.

Лабораторная установка включает в себя стенд типа ЭС-3, с управляемым выпрямителем на тиристорах. См. рисунок 7.11. Угол управления тиристорным выпрямителем регулируется при помощи фазовращателя, переключатель которого К расположен на передней панели лабораторного стенда. Переключатель имеет 8 положений ($0, 1, \dots, 7$). В нулевом положении $\alpha = 0$, в седьмом $\alpha = 140^\circ$. Сглаживающий индуктивный фильтр включается переключателем B_2 , расположенным на передней панели стенда. В положении R индуктивный фильтр выключен, в положении RL — включен. Постоянная составляющая выходного напряжения измеряется при помощи стрелочного вольтметра, на передней панели стенда. Действующее значение переменной составляющей выходного напряжения измеряется при помощи цифрового вольтметра.

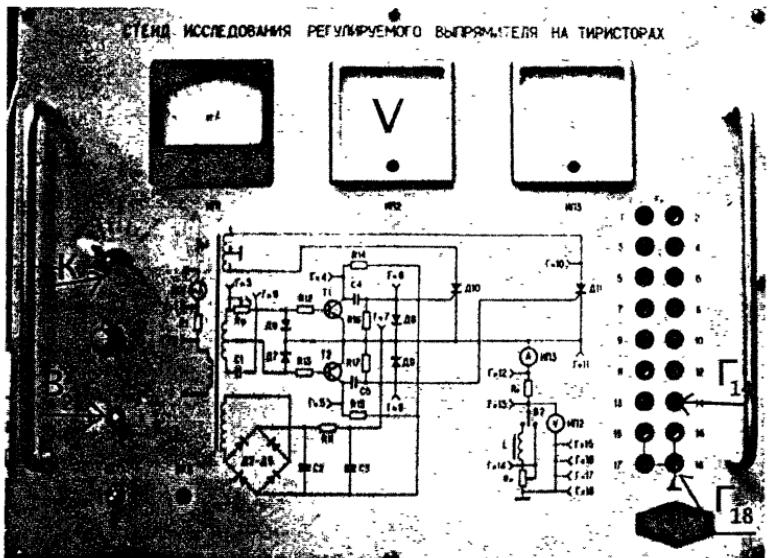


Рис. 7.11. Лабораторная установка

Порядок выполнения работы.

1. Включите питание лабораторного стенда, осциллографа и цифрового вольтметра. Тумблеры «Сеть» поставить в положение «Вкл.».
2. Подсоедините выводы цифрового вольтметра и осциллографа к гнездам Γ_{14} и Γ_{18} .

3. Поставьте переключатель B_2 в положение R , а переключатель фазовращателя в положение 0.

4. Снимите регулировочную характеристику управляемого выпрямителя при выключенном фильтре. Для этого переключатель фазовращателя последовательно ставится в положения 0—7. При каждом положении измеряется постоянная и переменная составляющие выходного напряжения. Результаты измерений занесите в таблицу 7.1.

5. Зарисуйте осциллографмы выходного напряжения при $\alpha = 0$, $\alpha = 80^\circ$ и $\alpha = 140^\circ$ при выключенном фильтре.

6. Поставьте переключатель B_2 в положение RL .

7. Снимите регулировочную характеристику управляемого выпрямителя при включенном фильтре. Результаты занесите в таблицу 7.2.

8. Зарисуйте осциллографмы выходного напряжения при $\alpha = 0$, $\alpha = 80^\circ$ и $\alpha = 140^\circ$ при включенном фильтре.

Таблица 7.1

Параметры выходного напряжения выпрямителя с выключенным фильтром

α°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
U_0								
$U_{m\Delta}$								
K_Π								

Таблица 7.2

Параметры выходного напряжения выпрямителя с включенным фильтром

α°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
U_0								
$U_{m\Delta}$								
K_Π								

Обработка результатов измерений.

1. Вычислите коэффициенты пульсации выходного напряжения по формуле 7.4. Результаты занесите в таблицы 7.1 и 7.2.

2. По данным таблиц 7.1 и 7.2 постройте на одном графике регулировочные характеристики $U_0 = f(\alpha)$ при включенном и выключенном фильтре.

3. По данным таблиц 7.1 и 7.2 постройте на одном графике зависимости коэффициента пульсации выходного напряжения от угла управления $K_\Pi = f(\alpha)$ при включенном и выключенном фильтре.

4. Сделайте выводы по полученным зависимостям.

Контрольные вопросы.

1. Что такое выпрямитель? Для чего он используется?
2. Что называется вентилем в электротехнике?
3. Нарисуйте осциллографмы выходного напряжения для одно- и двухполупериодного выпрямителя.
4. Какие преимущества имеет выпрямитель на тиристорах перед выпрямителем на диодах?
5. Что такое тиристор? Чем он отличается от полупроводникового диода?
6. Что называется углом управления в управляемом выпрямителе?
7. Что называют коэффициентом пульсации?
8. Чему равен коэффициент пульсации постоянного напряжения ($U = \text{const}$)?
9. Для чего используется сглаживающий фильтр?

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.	
ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.	
ИССЛЕДОВАНИЕ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ТОЧНОСТИ	
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.	
ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ	
НА ТИРИСТОРАХ	47