

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ
ТЕХНИКА И МЕТРОЛОГИЯ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ЧАСТЬ 5 Лабораторные работы № 6, 7

Издание второе
переработанное и дополненное

Под редакцией проф. Г.Н.Солопченко

Санкт - Петербург

2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 6 Измерение частотно-временных параметров сигналов измерительной информации

1. Цели работы	3
2. Объекты исследования	3
3. Программа работы.....	3
4. Используемые приборы и оборудование	4
5. Методические указания по выполнению работы.....	9
6. Теоретическая часть	19
7. Требования по выполнению работы и по составлению отчета о лабораторной работе	24
Список литературы, рекомендуемой для подготовки к работе № 6	25

Лабораторная работа № 7 Измерение мощности постоянного и переменного тока

1. Цели работы	26
2. Объект исследования	26
3. Программа работы	26
4. Используемые приборы и оборудование	27
5. Методические указания по выполнению работы	36
6. Теоретическая часть	38
7. Требования по выполнению работы и по составлению отчета о лабораторной работе	45
Список литературы, рекомендуемой для подготовки к работе № 7	46
Общие требования к составлению отчета по лабораторным работам	46

РАБОТА № 6
ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ
СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

1. Цели работы

Приобретение умения и навыков пользования электронно-лучевым осциллографом в комбинации с частотомером с целью измерения частоты и интервалов времени, как параметров импульсных сигналов.

Практическое ознакомление с измерительным преобразователем "напряжение - частота" и с принципами его метрологических испытаний.

2. Объекты исследования

Объектами исследования являются:

- генераторы импульсных сигналов (мультивибратор, одновибратор),
- преобразователи импульсных сигналов (контактные и бесконтактные реле, операционные усилители, импульсные схемы),
- преобразователь "напряжение - частота".

Перечисленные объекты исследования расположены в лабораторном макете, схема которого представлена на рис. 4.1.

3. Программа работы

3.1. Измерение интервалов времени и частоты с помощью электронно-лучевого осциллографа.

3.1.1. Измерение длительности прямоугольных импульсов и периода сигналов генератора Г 1 прямоугольных импульсов.

3.1.2. Измерение времени срабатывания и времени отпускания электромеханического реле.

- 3.1.3. Измерение частоты генератора **Г 2** и времени нарастания выходного напряжения операционных усилителей.
- 3.1.4. Измерение длительности импульса, формируемого одновибратором и наблюдение искажений формы импульса усилителями.
- 3.2. Калибровка преобразователя “напряжение - частота”.

4. Используемые приборы и оборудование

Оборудование лабораторной работы состоит из следующих конструктивно обособленных устройств:

- лабораторный макет,
- электронно-лучевой осциллограф **MOS-620 СН**,
- цифровой частотомер **ЧЗ-32**,
- источник регулируемого стабильного напряжения **НУ-1500D**.

4.1. Лабораторный макет

Схема лабораторного макета представлена на рис. 4.1.

В состав лабораторного макета входят :

- генератор прямоугольных импульсов низкой частоты **Г1** со схемой управления электромеханическими реле,
- генератор прямоугольных импульсов высокой частоты **Г2** с набором операционных усилителей **ОУ1 – ОУ4** и интегрирующих цепочек с различными постоянными времени, включенных на входе этих генераторов,
- инвертирующие усилители **ИНВ4 – ИНВ9**, на входах которых включены интегрирующие цепочки с разными постоянными времени,
- одновибратор с переключаемыми постоянными времени, запускается импульсами генератора **Г2**;
- преобразователь "напряжение - частота" (**ПНЧ**);
- внутренний стабилизированный источник питания напряжением 5 В, это напряжение подается на выход через гнездо +5 В.

На передней панели макета предусмотрены отдельные выходы синхронизирующих импульсов низкой и высокой частоты. Эти выходы снабжены байонетными разъемами и имеют надписи “**синхр**”.

Оцифрованными кружками кроме выходов инвертирующих усилителей на схеме обозначены гнезда для подключения приборов: осциллографа и частотомера.

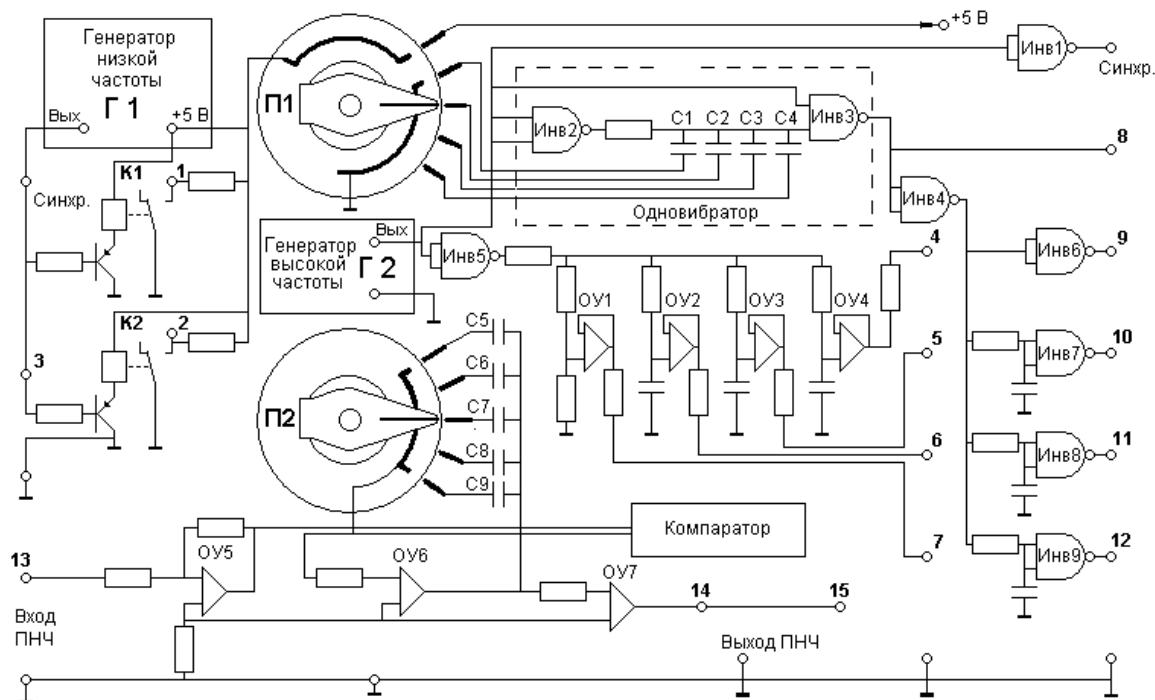


Рис. 4.1. Схема лабораторного макета

4.1.1. Описание низкочастотной части схемы макета

Низкочастотная часть макета работает только при подаче на нее питания 5 В при первом по часовой стрелке положении переключателя П1

Напряжение от генератора Г1 в виде прямоугольных импульсов частотой около 10 Гц поступает на усилители тока, необходимого для срабатывания реле и замыкания контактов К1, К2. При замыкании и размыкании этих контактов на гнездах 1 и 2 напряжение изменяется от 0 В до 5 В.

Вследствие значительной индуктивности обмоток реле и инерционности механической части замыкание и размыкание контактов реле будет отставать от скачков напряжения (и тока). Время, прошедшее от момента подачи напряжения на обмотку реле до момента соприкосновения его контактов, называется временем срабатывания реле и обозначается через $t_{ср}$.

Время, прошедшее от момента снятия напряжения с обмоток реле до момента размыкания его контактов, называется временем отпускания реле $t_{отп}$.

Для наблюдения и контроля управляющего напряжения служат гнездо 3 лабораторного макета. Для наблюдения за срабатыванием контактов реле – гнезда 1 и 2.

4.1.2. Описание высокочастотной части схемы макета

Напряжение от генератора **Г2** в виде периодических прямоугольных импульсов поступает на входы инвертирующих усилителей **ИНВ1** и **ИНВ5**. На выходе усилителя **ИНВ1** формируются синхронизирующие импульсы. С выхода усилителя **ИНВ5** прямоугольное напряжение подается на интегрирующие цепочки и на входы операционных усилителей **ОУ1** – **ОУ4**. На выходах этих усилителей (гнезда 4, 5, 6, 7) форма входного напряжения искажается из-за конечной скорости нарастания и спада напряжения, свойственной используемым в них микросхемам и подключенным на входе каждого из них конденсатором.

Кроме того напряжение со второго выхода генератора **Г2** подается на вход одновибратора, длительность импульса которого изменяется переключателем **П1**. Выходные сигналы с одновибратора выводятся в гнезде 9. Эти же сигналы преобразуются интегрирующими цепочками и усилителями **ИНВ6** – **ИНВ9**, в силу этого их амплитуда значительно уменьшается. Выходные сигналы инвертирующих усилителей можно наблюдать на гнездах 9, 10, 11, 12.

4.1.3. Описание схемы одновибратора

Одновибратор - это электронное устройство, которое может находиться в устойчивом и неустойчивом состоянии. В кратковременное неустойчивое состояние одновибратор переводится импульсами от генератора **Г2** и затем возвращается в устойчивое состояние. Во время неустойчивого состояния на выходе одновибратора в гнезде 8 формируется короткий импульс. Его длительность определяется емкостью конденсаторов **С1**, **С2**, **С3**, **С4**, переключаемых переключателем **П1**.

4.1.4. Описание схемы преобразователя "напряжение - частота"

Для реализации преобразования напряжения в частоту используются операционные усилители, к которым для получения необходимых характеристик присоединяются внешние элементы (резисторы и конденсаторы).

Преобразователи напряжения в частоту находят свое применение в таких средствах измерения и автоматизации, в которых требуется реализовать простое и точное интегрирование входного сигнала: в составе электронного оборудования хроматографов и при создании интегрирующих средств измерения напряжения. В хроматографии интегрирование необходимо для определения площади хроматографических пиков, которая пропорциональна концентрации того или иного компонента сложных веществ. При интегрировании измеряемого напряжения в течение времени, кратного периоду промышленной помехи действие этой помехи существенно уменьшается.

Коэффициент преобразования напряжения в частоту определяется внутренними параметрами используемых усилителей и значениями сопротивлений и емкости конденсаторов, которые к ним подключены. В лабораторном макете значение емкости конденсаторов может дискретно изменяться с помощью переключателя П 2.

Входное напряжение ПНЧ подключается к гнезду 13. Выходное напряжение, частота которого является функцией входного напряжения, подведено к гнездам 14, 15.

4.2. Электронно-лучевой осциллограф MOS-620 СН

Осциллограф однолучевой двухканальный. Он позволяет одновременно наблюдать два процесса, поданные на входы канала I и канала II, за счет коммутации каналов. Внешний вид осциллографа приведен на рис. 4.2.

Входные разъемы двух каналов расположены внизу панели и обозначены СН 1 и СН 2. Разъем для ввода синхронизирующих сигналов расположен в нижней части области панели **HORIZONTAL**, занимающей верхнюю область панели. В этой же области расположены: дискретный регулятор частоты развертки **TIME/DIV**, плавный регулятор частоты развертки **SWP/VAR**, при положении **CAL** которого цена деления оси времени в

точности совпадает со значениями на переключателе **TIME/DIV**, кнопка "**×10 MAG**", при нажатии которой изображение сигнала на экране



Рис. 4.2. Передняя панель двухлучевого осциллографа MOS 620 CH

осциллографа растягивается по горизонтали в 10 раз, регулятор позиционирования по горизонтали **POSITION**, регулятор уровня синхронизации **LEVEL**, переключатель **MODE**, позволяющий устанавливать внутреннюю синхронизацию (**AUTO**) или ждущую (**NORMAL**), переключатель **SOURCE**, который устанавливает источник синхронизирующего сигнала, переключатель знака синхронизирующего импульса **SLOPE**. Кнопка **TRIG.ALT** должна быть нажата.

В нижней области передней панели отмеченной ее наименованием **VERTICAL** расположены: переключатели цены деления по вертикали **VOLTS/DIV**, совмещенные с соосными плавными регуляторами вертикального размера, при максимальном повороте которых по часовой стрелке цена деления совпадает со значениями на переключателе, регуляторы позиционирования **POSITION**, переключатель **MODE** с понятными позициями, переключатели "**AC, GND, DC**", позиции которых также понятны, кнопка "**ALT, CHOP**", которая должна быть нажата, кнопка "**CH 2, INV**" служит для инвертирования сигнала второго канала.

4.3. Источник напряжения АКИП-1105

Передняя панель источника регулируемого напряжения АКИП 1105 представлена на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Источник напряжения

После включения питания с помощью кнопки **POWER** и появления восьмерок на обоих цифровых индикаторах следует нажать кнопку **OUTPUT**, затем кнопку **VOLT**. Выбор диапазона выходного напряжения (0÷16) В выполняется одновременным нажатием кнопок **SHIFT** и **A**. Регулировка напряжения выполняется дискретно с помощью поворотного регулятора $\Delta V / \Delta t$ при одновременном нажатии и удерживании кнопки **PRESET**. В этом случае выходное напряжение будет регулироваться дискретно с шагом 0,1 В.

Абсолютная погрешность стабильности выходного напряжения не превышает по модулю 10 мВ.

Модуль допускаемой абсолютной погрешности встроенного вольтметра, индикатор которого расположен на передней панели, не превышает (0,005 U + 0,03) В.

5. Методические указания по выполнению работы

5.1 Подготовка аппаратуры к выполнению работы

Включить лабораторный макет в сеть.

Включить в сеть остальные средства: частотомер **ЧЗ-32**, источник напряжения **АКИП-1105**, осциллограф **MOS-620 СН**. Дать приборам про-

греться в течение 10 - 15 минут. Отрегулировать яркость и фокусировку осциллографа в соответствии с разд. 4.1, ознакомиться с расположением и назначением регулировочных ручек и кнопок на передней панели осциллографа и других применяемых приборов.

5.2. Выполнение п. 3.1.1. программы работы

Для выполнения этого пункта Программы, как и п. 3.1.2, необходимо подать напряжение питания на низкочастотную часть лабораторного макета. С этой целью переключатель **П 1** макета переводится в крайнее положение против часовой стрелки.

Подключить общие провода осциллографа к гнездам " \perp " лабораторного макета, информационный провод канала **СН 1** - к гнезду 3 макета. Нажать кнопки **TRIG.ALT** и **ALT.CHOP**, переключатель **MODE** установить в положение **DUAL**, переключатель **SOURCE** установить в положение **СН 1**. Установить регулятор **SWP/VAR** в крайнее положение по часовой стрелке до щелчка и с помощью рукояток управления горизонтальной разверткой добиться устойчивого изображения сигналов так, чтобы на экране оказалось хотя бы по 2 прямоугольных импульса одной полярности каждого сигнала, а сигналы располагались в середине экрана по вертикали. Сигналом синхронизации в этом случае будет сигнал на выходе гнезда 3 макета.

Подсчитать количество делений горизонтальной шкалы осциллографа между двумя ближайшими моментами перехода сигнала канала **СН 1** через ноль в одну сторону. Прочитать на лимбе переключателя развертки цену одного деления горизонтальной шкалы. Вычислить период сигнала генератора **Г1** по формуле :

$$T = C \cdot B,$$

где **B** - число делений, **C** - цена деления (читается по лимбу переключателя длительности развертки "**TIME /DIV** " только в крайнем правом положении ручки плавной регулировки "**SWP.VAR**"; фиксация этого положения сопровождается щелчком).

Вычислить частоту выходного напряжения генератора **Г1** по формуле

$$F = 1 / T.$$

Отключить информационный кабель осциллографа от гнезда 3 макета и подключить к этому гнезду информационный кабель частотомера. Измерить частоту и выходного напряжения этого же генератора цифровым частотомером.

Результаты измерений записать в протокол и предъявить преподавателю. Считая частотомер образцовым прибором, оценить погрешность измерений частоты и периода, выполненных с помощью осциллографа. Результаты привести в отчете в следующей форме:

Показания частотомера: $T = \dots$ с, $F = \dots$ Гц.

Генератор Г1: Период импульсов $T = \dots$ с, частота $F = 1/T = \dots$ Гц.

Погрешность : измерения периода $\Delta T = \dots$ с,
измерения частоты $\Delta F = \dots$ Гц.

5.3. Выполнение п. 3.1.2. программы работы

Для выполнения работы по данному пункту Программы необходимо подключить общие провода осциллографа к гнездам " \perp " лабораторного макета, информационный провод канала **СН 1** - к гнезду 3 макета, информационный провод канала **СН 2** - к гнезду 1. Переключатель **MODE**, находящийся на передней панели осциллографа, переключить в положение **DUAL**. На экране появятся два сигнала, которые необходимо совместить по вертикали с помощью регуляторов **POSITION**. Совместив по вертикали оба сигнала измерить по шкале осциллографа время срабатывания $t_{ср}$ и время отпускания $t_{отп}$ первого реле. Затем переключить информационный провод кабеля канала **СН 2** в гнездо 2 и выполнить те же операции. Результаты измерений занести в протокол и представить преподавателю.

Результаты привести в отчете в следующей форме:

Реле с ключем К1: время срабатывания $t_{ср} = \dots$ с,

время отпускания $t_{отп} = \dots$ с.

Реле с ключем К2: время срабатывания $t_{ср} = \dots$ с.

время отпускания $t_{отп} = \dots$ с.

5.4. Выполнение п. 3.1.3. программы работы

Последовательность измерения времени нарастания t_H выходного напряжения операционных усилителей следующая.

1. Информационный провод кабеля **СН 1** включить в гнездо **СИНХР** макета. Информационный провод кабеля **СН 2** включить в гнездо 7 макета. Отрегулировать размер сигналов по вертикали с помощью регуляторов **TIME/DIV**. Определить период и частоту прямоугольного сигнала, поступающего по каналу **СН 1** таким же способом, как это было выполнено в разд. 5.2. Затем вместо кабеля канала **СН 2** подключить к этому же гнезду информационный провод кабеля частотомера **ЧЗ-32** и измерить период и частоту. Считая частотомер образцовым прибором, оценить погрешность измерений, выполненных с помощью осциллографа. Результаты измерений занести в протокол и представить преподавателю.

Форма представления этих результатов в отчете такая же, как в п. 5.2.

2. Подключая последовательно информационный провод кабеля **СН 2** к гнездам 7, 6, 5, 4 измерить по шкале экрана осциллографа времена нарастания сигнала на выходах операционных усилителей. При каждом подключении с помощью регуляторов чувствительности канала **СН 2** добиться, чтобы по вертикали измеряемый импульс занимал большую часть экрана. Установить такую длительность развертки, чтобы на экране были видны один-два импульса. Плавной регулировкой уровня синхронизирующего сигнала с помощью регулятора **LEVEL** добиться устойчивой синхронизации.

3. При каждом подключении установить такую длительность развертки, чтобы высвечивалась полностью интересующая часть сигнала.

4. Измерение длительности t_H производится непосредственно по шкале экрана осциллографа, цена деления которой считывается с указателя дискретного переключателя **TIME/DIV**.

В протоколе эксперимента и в отчете результаты измерений зафиксировать в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Номер ОУ	ОУ1	ОУ2	ОУ3	ОУ4
Время Нарастания				

5.5. Выполнение п. 3.1.4. программы работы

Перед выполнением измерений убедиться в работоспособности одновибратора при всех положениях переключателя **П 1** лабораторного макета, кроме первого.

Информационный провод кабеля канала **СН 2** осциллографа подключается к гнезду 8 макета. Регулировкой усиления по вертикали с помощью регулятора **VOLTS/DIV** и регулировкой уровня синхронизации **LEVEL** добиваются устойчивого изображения одного импульса одновибратора так, чтобы он занял по высоте **LEVEL** значительную часть экрана осциллографа. При измерении осциллографом длительности очень коротких импульсов воспользоваться переключателем **×10 MAG**. При этом дискретный регулятор частоты развертки **TIME/DIV**, плавный регулятор частоты развертки **SWP/VAR** поставить в положение **CAL**.

Измерение длительности импульса выполняется в соответствии с методикой, описанной выше в разд. 5.2, при положениях переключателя **П 1** лабораторного макета, задаваемых преподавателем.

Эти же измерения выполнить с помощью частотомера в режиме измерения интервала времени. Абсолютную и относительную погрешности результатов измерений оценить, считая частотомер образцовым средством измерений.

Таблица 5.2

Положение переключателя П 1		С1	С2	С3	С4
Длит-сть импуль- сов	Измерено осциллографом мкс				
	Измерено частотомером мкс				
Абсолютная погрешность мкс					
Относительная погрешность %					

Последовательно подключая информационный провод кабеля канала СН 2 к гнездам 9, 10, 11, 12, наблюдать искажения импульса одновибратора и, по возможности, выполнять измерения его длительности.

Результаты выполненных измерений зафиксировать в таблице 5.2.

Имея в виду, что относительная погрешность частотомера нормируется величиной

$$|\gamma_{\text{част}}| < \left(10^{-6} + \frac{1}{f_0 \cdot T_x} \right) \cdot 100\%,$$

где T_x - измеряемый промежуток времени, $f_0 = 1 \text{ МГц}$ - тактовая частота генератора частотомера, оценить погрешность измерения длительности импульса одновибратора частотомером. Результаты измерений зафиксировать в протоколе и предъявить преподавателю.

В отчете приводится таблица 5.2 с результатами измерений и объяснения причин возникновения погрешностей и отмеченных искажений формы импульса

5.6. Выполнение п. 3.2. программы работы

Получить от преподавателя задание на установку переключателя **П2**, а также указания в отношении диапазона изменения входного напряжения в котором должны выполняться измерения.

Подключить кабель калибратора к входным гнездам ПНЧ (гнездо 13 и общий провод). Входной кабель осциллографа присоединить к выходному гнезду ПНЧ.

Добившись устойчивого изображения выходного напряжения ПНЧ на экране осциллографа, убедиться в работоспособности ПНЧ при всех положениях переключателя **П2** лабораторного макета и всех заданных значениях входного напряжения ПНЧ. Отметить факты изменения частоты выходного напряжения ПНЧ при изменении емкости и напряжения.

Установить переключатель **П2** в положение, заданное преподавателем.

Отключить входной кабель осциллографа от гнезда 15 и подключить к этому зажиму входной кабель частотомера. Измерить частоту выходного напряжения ПНЧ при двух крайних значениях входного напряжения ПНЧ. Результат предъявить преподавателю и получить после этого зада-

ние от него на установку значений напряжений U_1, U_2, \dots, U_n , при которых необходимо выполнить калибровку ПНЧ.

С помощью калибратора устанавливать заданные преподавателем значения напряжения. Эти значения напряжения устанавливать вначале в направлении их увеличения, затем - в направлении уменьшения. При каждом значении U_i входного напряжения измерять частоту f_{ij} , где $j = 1, 2, \dots, n$ - номер эксперимента, и фиксировать результаты в таблице 5.3. При достижении максимального значения U_n и измерения выходной частоты увеличить входное напряжение на $(10 \div 15) \%$, после чего вновь установить напряжение U_n и вновь измерить частоту на выходе ПНЧ. Выполнить аналогичную процедуру при достижении минимального значения напряжения U_1 . После измерения частоты при этом значении напряжения уменьшить напряжение, затем вновь установить напряжение U_1 и снова измерить частоту на выходе ПНЧ. Количество таких циклов экспериментов - не менее 6. Результаты заносить в таблицу 5.3. Перед таблицей записывается значение емкости конденсатора, на который указывает переключатель П2.

Таблица 5.3

Переключателем П2 установлен конденсатор

U_i	В	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
$j = 1$	f_{i1} Гц						
$j = 2$	f_{i2} Гц						
$j = 3$	f_{i3} Гц						
.	.						
.	.						
.	.						
$j = k$	f_{ik} Гц						
\bar{f}_i	Гц						
S_i	Гц						

В лаборатории в ходе работы по каждому столбцу таблицы 5.3 вычисляются средние арифметические значения

$$\bar{f}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k f_{ij}$$

и на миллиметровке строится черновик графика в координатах (U - абсциссы, f - ординаты), на который наносятся все экспериментальные точки и средние арифметические значения \bar{f}_i . Вид графика представлен на рис. 5.1. Этот график и таблица предъявляются преподавателю для проверки и используются при подготовке отчета следующим образом.

Для каждого значения U_i вычислить среднеквадратическое отклонение S_i по формуле

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x})^2}$$

и записать полученные значения в последнюю строку каждого соответствующего столбца таблицы 5.3.

После этого по результатам выполненного эксперимента следует выполнить аппроксимацию характеристики преобразования ПНЧ полиномами последовательно нарастающей степени с проверкой гипотезы о степени полинома p по критерию Фишера, как указано в разд. 3.5.3, 3.5.4 части 1 [1], до тех пор, пока гипотеза о степени полинома не окажется отвергнутой.

В качестве первого аппроксимирующего полинома следует выбрать полином первой степени $f(U) = a_0 + a_1 U$. Оценки коэффициентов объединяются в вектор \bar{a} , и этот вектор вычисляется методом наименьших квадратов (см. также разд. 3.5 части 1 [1]):

$$\bar{a} = (U^T \Sigma^{-1} U)^{-1} U^T \Sigma^{-1} \bar{f},$$

где

$$\bar{a} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_0 \\ \tilde{a}_1 \end{pmatrix}, \quad \bar{f} = \begin{pmatrix} \bar{f}_1 \\ \bar{f}_2 \\ \cdot \\ \bar{f}_k \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} 1 & U_1 \\ 1 & U_2 \\ \cdot & \cdot \\ 1 & U_k \end{pmatrix}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & S_2 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & S_k \end{pmatrix},$$

а Σ^{-1} – матрица, обратная ковариационной матрице Σ .

С полученными значениями коэффициентов $\tilde{\mathbf{a}}_0$ и $\tilde{\mathbf{a}}_1$ строится линейный полином и на рис. 5.1 наносится прямая линия, соответствующая этому полиному. С помощью критерия Фишера проверяется гипотеза о соответствии этого полинома полученным результатам. Для этого вычисляется статистика критерия

$$\mathbf{R}^2 = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{U} \cdot \tilde{\mathbf{a}} - \bar{\mathbf{f}})^T \Sigma^{-1} (\mathbf{U} \cdot \tilde{\mathbf{a}} - \bar{\mathbf{f}}),$$

и проверяется выполнение неравенства

$$\mathbf{R}^2 < (\mathbf{k} - \mathbf{p} - 1) \cdot \mathbf{F}_{1-\alpha}(\mathbf{k} - \mathbf{p} - 1, \mathbf{n} - 1),$$

где α - уровень значимости, выбираемый из интервала (0.05, 0.15), а критические значения Фишера $\mathbf{F}_{1-\alpha}(\mathbf{k} - \mathbf{p} - 1, \mathbf{n} - 1)$ приведены в таблицах 3.6, 3.7 части 1 [1] для уровней значимости 0.05 и 0.1, \mathbf{p} – степень полинома, которая в этом случае равна 1.

Если неравенство выполняется, это значит, что мы имеем достаточные основания считать характеристику преобразования ПНЧ линейной. В противном случае степень аппроксимирующего полинома увеличивается на единицу, то есть принимается, что $\mathbf{p} = 2$, и все вычисления повторяются при новых размерах вектора $\tilde{\mathbf{a}}$ и матрицы \mathbf{U} :

$$\tilde{\mathbf{a}} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{a}}_0 \\ \tilde{\mathbf{a}}_1 \\ \tilde{\mathbf{a}}_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_1^2 \\ 1 & \mathbf{U}_2 & \mathbf{U}_2^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \mathbf{U}_k & \mathbf{U}_k^2 \end{pmatrix}.$$

И вот, когда, наконец, проверочное неравенство будет выполнено, необходимо вычислить в точках $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \dots, \mathbf{U}_k$ отличия $\Delta \mathbf{f}_{ij}$, ($\mathbf{j} = 1, 2, \dots, \mathbf{k}$) результатов эксперимента от последнего полинома и привести полученные результаты в таблице 5.4.

Затем в каждой точке, то есть при каждом значении \mathbf{U}_i вычислить оценки систематических погрешностей и среднеквадратические значения случайных погрешностей. Затем с помощью толерантных множителей $\kappa(\mathbf{n}, 0.95, \mathbf{Q})$, значения которых приведены в таблице 3.3. первой части [1] определить в этих же точках значения полуширины толерантных пределов

случайных погрешностей по формуле

$$\tilde{g}_i = S_i \cdot \kappa(n, P, Q)$$

и также занести их в таблицу 5.4.

На рис. 5.2 нанести в каждой точке значения $\overline{\Delta f}_i$ а также

$$\Delta_{iH} = \overline{\Delta f}_i - S_i \cdot \kappa(n, P, Q) \quad \text{и} \quad \Delta_{iB} = \overline{\Delta f}_i + S_i \cdot \kappa(n, P, Q).$$

Таблица 5.4

	U_i	B	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	...
$j = 1$	Δf_{i1}	ГЦ						
$j = 2$	Δf_{i2}	ГЦ						
$j = 3$	Δf_{i3}	ГЦ						
.	.							
.	.							
.	.							
$j = k$	Δf_{ik}	ГЦ						
	$\overline{\Delta f}_i$	ГЦ						
	S_i	ГЦ						
	\tilde{g}_i	ГЦ						

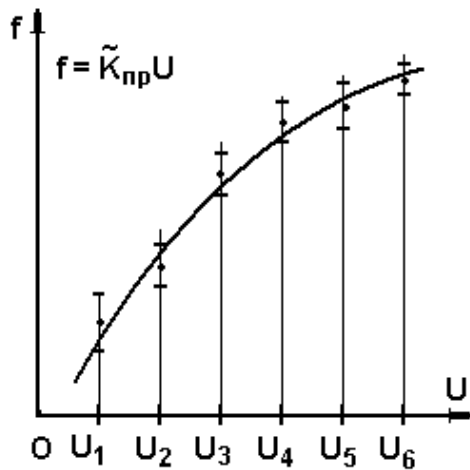


Рис. 5.1. Пример графика характеристики преобразования с представлением границ разброса экспериментальных данных

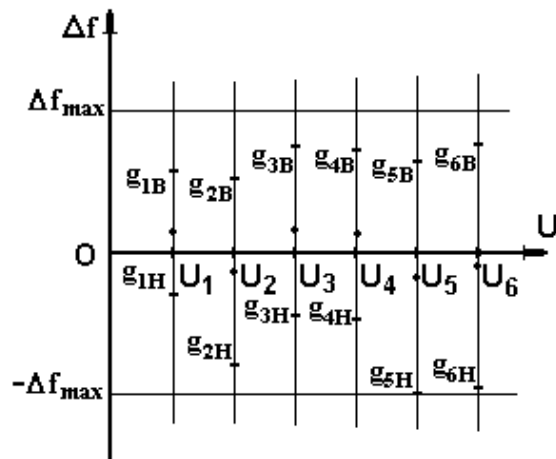


Рис. 5.2. Пример графического представления погрешностей ПНЧ

В качестве нормы абсолютной погрешности ПНЧ выбрать наибольшее возможное значение комбинации случайной и систематической абсолютной погрешности.

$$\Delta f_{\max} = \max\left[|\overline{\Delta f}_i - S_i \cdot \kappa(n, P, Q)|, |\overline{\Delta f}_i + S_i \cdot \kappa(n, P, Q)|\right]$$

Полученное значение, округленное до двух значащих цифр в сторону увеличения, привести в отчете.

Нормой приведенной погрешности будет округленный до двух значащих цифр результат деления Δf_{\max} на ширину диапазона частот, наблюдавшихся в эксперименте.

По этому разделу программы в отчете представляются:

- таблица 5.4. с результатами измерений и вычислений,
- график рис.5.1, содержащий все аппроксимирующие кривые, полученные при последовательной аппроксимации вместе с экспериментальными данными, как это представлено на рис.5,1.
- график рис. 5.2,
- нормы на абсолютную и приведенную погрешности ПНЧ.

6. Теоретическая часть

6.1. Принцип действия цифрового частотомера в режиме измерения частоты

Упрощенная структурная схема цифрового частотомера приведена на рис. 6.1. В основе его действия лежит простой счет количества периодов напряжения измеряемой частоты за точно известное время. Этот принцип действия соответствует определению частоты периодического процесса как количества периодов процесса в единицу времени.

Периодическое гармоническое или импульсное напряжение частоты f_x поступает на вход усилителя - формирователя, который преобразует входное напряжение в поток импульсов. Каждый из этих импульсов формируется в момент изменения полярности входного напряжения то

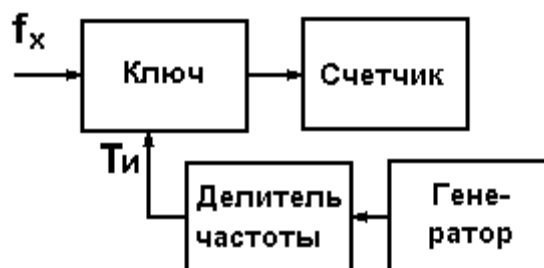


Рис. 6.1. Принцип измерения частоты

есть при его переходе через нуль. Полярность сформированных импульсов зависит от направления перехода через нуль. Таким образом за один период входного напряжения усилитель - формирователь вырабатывает два импульса противоположной полярности : один положительный, а второй отрицательный.

Далее можно отсечь импульсы одной полярности с помощью, например, диода. Тогда частота и период оставшихся импульсов будут равны частоте и периоду входного периодического напряжения независимо от его формы.

Если эти импульсы не отсекаются а инвертируются, то частота полученной импульсной последовательности будет равна $2 \cdot f_x$.

Рассмотрим первую ситуацию, когда импульсы одной полярности отсекаются, и частота оставшихся импульсов равна f_x . Эти импульсы поступают на вход ключа **K**, который открывается на время, задаваемое напряжением опорной частоты f_0 . В современных частотомерах значение опорной частоты составляет десятки мегагерц, а ее стабильность достигает $10^{-6} \div 10^{-8}$. Опорная частота делится с помощью цепочки триггеров до тех пор, пока ее период не окажется равным требуемому времени измерения $T_{\text{И}} = M \cdot T_0$, где $T_0 = 1 / f_0$ - период опорной частоты, **M** - коэффициент деления. Полученные импульсы подаются на вход триггера так, что каждый из этих импульсов изменяет состояние триггера, выходной сигнал которого управляет ключом **K**, отпирая его на время $T_{\text{И}}$. За это время ключ пропускает на счетчик **N** импульсов измеряемой частоты : $N = T_{\text{И}} \cdot f_x$. Понятно, что время измерения никогда не будет в точности равно целому числу периодов $T_x = 1 / f_x$. Из-за этого возникает погрешность дискретности, абсолютное значение которой может достигать в худшем случае

$$\Delta_{\text{дискр}} f \leq (N + 1) / T_{\text{И}} - N / T_{\text{И}} = 1 / T_{\text{И}}. \quad (1)$$

Относительная погрешность дискретности при цифровом измерении частоты равна:

$$\gamma_{\text{дискр}} f \leq \frac{\Delta_{\text{дискр}} f}{f_x} \cdot 100\% = \frac{1}{f_x \cdot T_{\text{И}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Очевидно, что свой вклад в погрешность цифрового измерения частоты вносит нестабильность опорной частоты, так что предел допускаемой основной относительной погрешности частотомера нормируется формулой

$$\gamma_f \leq \left(\gamma_0 + \frac{1}{f_x \cdot T_{\text{и}}} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где γ_0 - относительная нестабильность опорной частоты.

Из этих выражений видно, что погрешность измерения частоты может быть уменьшена за счет увеличения времени измерения $T_{\text{и}}$.

При необходимости измерения частоты в многоканальных измерительных информационных системах, когда количество измерительных каналов достигает нескольких сотен и для оперативного обновления информации предъявляются высокие требования к скорости опроса измерительных каналов (например, при испытаниях сложного оборудования или при контроле сложных аварийноопасных технологических процессов),

длительность измерения частоты описанным способом оказывается недопустимо большой. Тогда прибегают к измерению частоты посредством измерения длительности периода T_x с последующим вычислением $f_x = 1/T_x$. Структурная схема, поясняющая этот способ, показана на рис. 6.2. Она похожа на предыдущую схему и содержит те же элементы. Только здесь ключ **К** открывается сигналом от усилителя-формирователя на время, равное периоду T_x измеряемой частоты, и за это время он пропускает на счетчик импульсы опорной частоты, так что счетчик фиксирует число импульсов

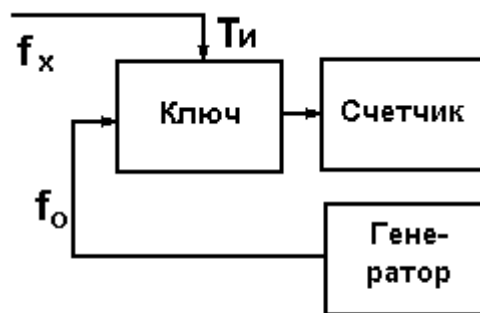


Рис. 6.2. Принцип измерения периода

$$N_T = f_0 \cdot T_x, \quad (4)$$

и здесь опорную частоту делить не нужно. Напротив, нужно стремиться сделать ее больше, чтобы погрешность в один импульс, вызванная дис-

кратностью их следования, была незначительной по отношению к измеряемому периоду:

$$\gamma_{\text{дискр}} T \leq \frac{1}{N_T} \cdot 100\% = \frac{1}{f_0 \cdot T_x} \cdot 100\% = \frac{T_0}{T_x} \cdot 100\% . \quad (5)$$

Как и раньше, к этому добавляется относительная нестабильность опорной частоты. Поэтому предел допускаемой основной относительной погрешности частотомера, применяемого в режиме измерения интервала времени, нормируется формулой

$$\gamma_T \leq \left(\gamma_0 + \frac{T_0}{T_x} \right) \cdot 100\% . \quad (6)$$

После окончания подсчета числа импульсов, пропущенных ключом K , выполняют вычисление $f_x = 1/T_x$. Относительная погрешность измерения частоты таким способом оценивается сверху значением :

$$\gamma_f \leq \left(\gamma_0 + \frac{f_x}{f_0} \right) \cdot 100\% . \quad (7)$$

В этом случае время измерения не является постоянным, оно обратно пропорционально измеряемой частоте и значительно меньше, чем T_{II} в первом варианте.

6.2 Принцип действия цифрового частотомера в режиме измерения интервала времени

Принцип измерения интервала времени с помощью цифрового частотомера (который допускает переключение на этот режим) тот же самый, что и описанный выше принцип измерения периода. Разница лишь в том, что на этот раз усилитель-формирователь вырабатывает импульсы, открывающие и закрывающие ключ K , в моменты времени, интервал между которыми нужно измерить.

Эти моменты времени определяются сигналами релейного типа (то есть скачкообразными) которые могут поступать от различных источников, и поэтому для реализации такого режима усилитель-формирователь должен иметь два отдельных входа. Относительная погрешность измерения интервала времени T_x в нормальных условиях эксплуатации (основ-

ная погрешность) нормируется формулами, аналогичной формулам (5) и (6) :

$$\gamma_{\text{дискр}} T \leq \frac{1}{f_0 \cdot T_x} \cdot 100\%, \quad (8)$$

$$\gamma_T \leq \left(\gamma_0 + \frac{1}{f_0 \cdot T_x} \right) \cdot 100\%, \quad (9)$$

6.3. Преобразование напряжения в частоту и в цифру

Один из способов преобразования напряжения в частоту иллюстрируется графиком рис. 6.3. Горизонтальные линии представляют постоянные напряжения: одно из них U_0 стабилизировано, другое U_{x1} (или U_{x2}) напряжение, преобразуемое в частоту. Всегда $U_x \leq U_0$. пилообразное напряжение между горизонтальными линиями - напряжение на конденсаторе C , который заряжается и разряжается стабильным током. От значения емкости C конденсатора зависит наклон пилообразного напряжения. Переключение конденсатора на заряд или на разряд выполняется быстродействующим электронным ключом в моменты, когда напряжение на конденсаторе сравнивается с напряжением U_0 или U_{x1} (U_{x2}). Ясно, что чем больше U_x , тем чаще происходят эти переключения и тем больше частота на выходе преобразователя.

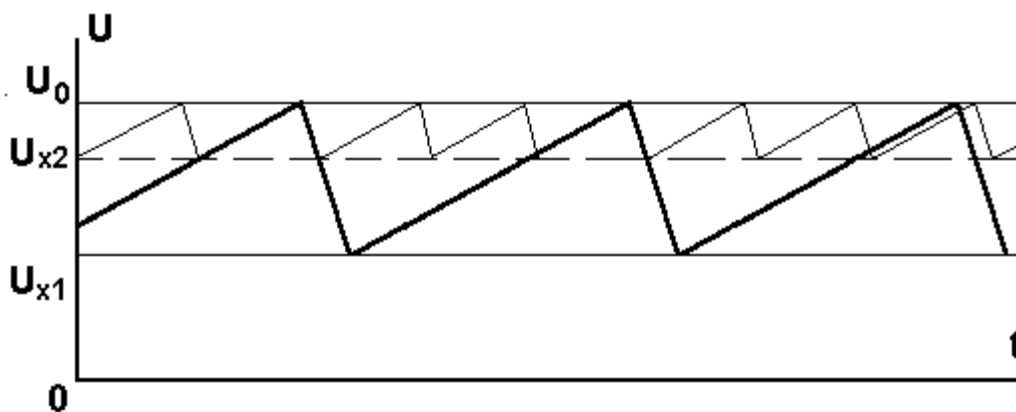


Рис. 6.3. К принципу действия преобразователя "напряжение-частота"

Частота пилообразного напряжения зависит также и от наклона, то есть от скорости заряда и разряда конденсатора. В итоге идеальная характеристика преобразования ПНЧ должна быть линейной:

$$f = U_x \cdot K_M \cdot \frac{1}{R \cdot C}, \quad (10)$$

где K_M - коэффициент пропорциональности, который определяется параметрами микросхемы ПНЧ и сопутствующих электронных элементов.

Характеристики преобразования реальных ПНЧ, реализованных в лабораторном макете, в разной степени отличаются от линейности.

В настоящее время выпускаются специальные микросхемы ПНЧ (преобразователи напряжения в частоту), которые дают пользователю возможность создать на их основе ПНЧ с нужными характеристиками путем подсоединения к этим микросхемам подходящих резисторов и конденсаторов. Одна из таких микросхем использована в лабораторном макете. Современные микросхемы позволяют создавать конструктивно законченные преобразователи "напряжение – частота" со следующими возможностями :

- выходная частота до 10 МГц,
- предел допускаемой основной относительной погрешности. 0.01%,
- диапазон входных напряжений от долей вольта до 10 В.

Расширение диапазона преобразуемых напряжений достигается обычными средствами: усилителями – в сторону снижения входного напряжения и делителями напряжения – в сторону повышения.

7. Требования по выполнению работы и по составлению отчета о лабораторной работе

Задания преподавателя и результаты, получаемые в ходе выполнения работы, должны фиксироваться в черновом протоколе с применением таблиц, форма которых установлена в разделах 5.4 – 5.6, 5.9 настоящих методических указаний. В этом черновом протоколе должен быть приведен перечень использованных приборов в соответствии с требованиями, приведенными в Приложении 2 части 1 Лабораторного практикума [1].

При успешном завершении работы преподаватель подписывает черновой протокол выполненных экспериментов, который должен быть приложен к окончательному отчету.

Общие требования к содержанию и оформлению отчета о работе приводятся ниже на стр. 47, а также в приложениях 1 и 2 к части 1 лабораторного практикума [1].

Список литературы, рекомендуемой для подготовки к работе № 6

1. Измерительная информационная техника и метрология / Лабораторный практикум, часть 1 “Используемые приборы, сведения из теоретической метрологии, статистическая обработка результатов измерений” // Под ред. Г.Н.Солопченко. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. – 91 С.

2. Атамаян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. – М.: Высшая школа, 1989. – 383 С.

3. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 С., с.74-79.

РАБОТА № 7

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цели работы.

Овладение практическими навыками :
измерения мощности в цепях переменного и постоянного тока на примере исследования энергетических характеристик электромашинного агрегата,
выполнения метрологической процедуры определения характеристик погрешности результатов прямых и косвенных измерений.

2. Объект исследования

Объектом исследования является электромашинный агрегат “мотор - генератор” с тиристорным управлением, нагруженный на активное сопротивление.

3. Программа работы.

3.1. Определение и исследование зависимости коэффициента полезного действия (**кпд**) и коэффициента мощности электромашинного агрегата от сопротивления нагрузки. Работа выполняется при постоянном значении угла регулирования тиристорного выпрямителя. Значение угла регулирования задается преподавателем.

3.2. Определение и исследование зависимости **кпд** и коэффициента мощности электромашинного агрегата от угла регулирования тиристорного выпрямителя. Работа выполняется при постоянном значении сопротивления нагрузки, которое задается преподавателем.

3.3. Определение характеристик погрешности результатов измерений.

4. Используемые приборы и оборудование

Оборудование лабораторной работы состоит из следующих конструктивно обособленных частей:

- электромашинный агрегат;
- управляемый тиристорный выпрямитель;
- комплект измерительный **К 505**;
- внешние приборы: стрелочные ваттметр **Д 539**, магнитоэлектрический вольтметр **М 243**, магнитоэлектрический амперметр **М 204** и электронно-лучевой осциллограф;
- нагрузочный реостат (его сопротивление есть сопротивление нагрузки R_H).

Структурная схема соединений оборудования показана на рис. 4.1. Внешние приборы присоединяются к управляемому тиристорному выпрямителю и к нагрузочному реостату специальными проводниками в соответствии с программой выполнения работы.

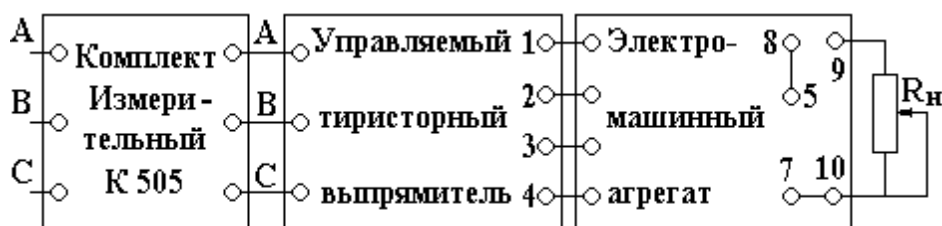


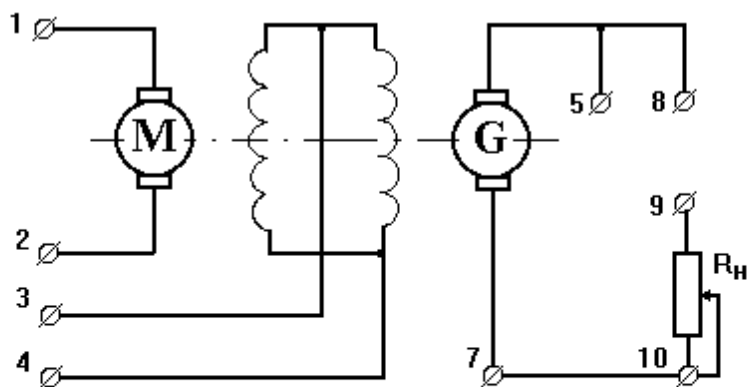
Рис.4.1. Схема соединений оборудования

4.1. Электромашинный агрегат

Представляет собой две однотипные электрические машины постоянного тока, роторы которых соосны и соединены муфтой. Одна из этих машин работает в режиме двигателя и вращает ротор другой машины, работающей в режиме генератора. Электрическая схема электромашинного агрегата представлена на рис. 4.2.

Ток в ротор двигателя поступает от управляемого тиристорного выпрямителя через присоединительные контакты 1, 2. Обмотки возбуждения двигателя и генератора питаются от нерегулируемого выпрямителя (контакты 3, 4). Присоединительные контакты 1, 2, 3, 4 расположены на задней

стенке управляемого тиристорного выпрямителя.



- 1,2 - контакты для подачи напряжения от регулируемого тиристорного выпрямителя
 3,4 - контакты для подачи напряжения в обмотки возбуждения
 5,7,8,9,10 - контакты для подключения внешних приборов [вольтметра, ваттметра]

Рис. 4.2. Электрическая схема электромашинного агрегата

Генератор нагружен на нагрузочный реостат, сопротивление которого обозначено через R_H . Этот реостат подключается к генератору с помощью присоединительных контактов 9, 10, расположенных на лицевой панели управляемого тиристорного выпрямителя. Здесь же расположены присоединительные контакты 5, 8. Между одним из них и контактом 9 включается амперметр или токовая обмотка ваттметра, необходимые для измерения тока и мощности соответственно.

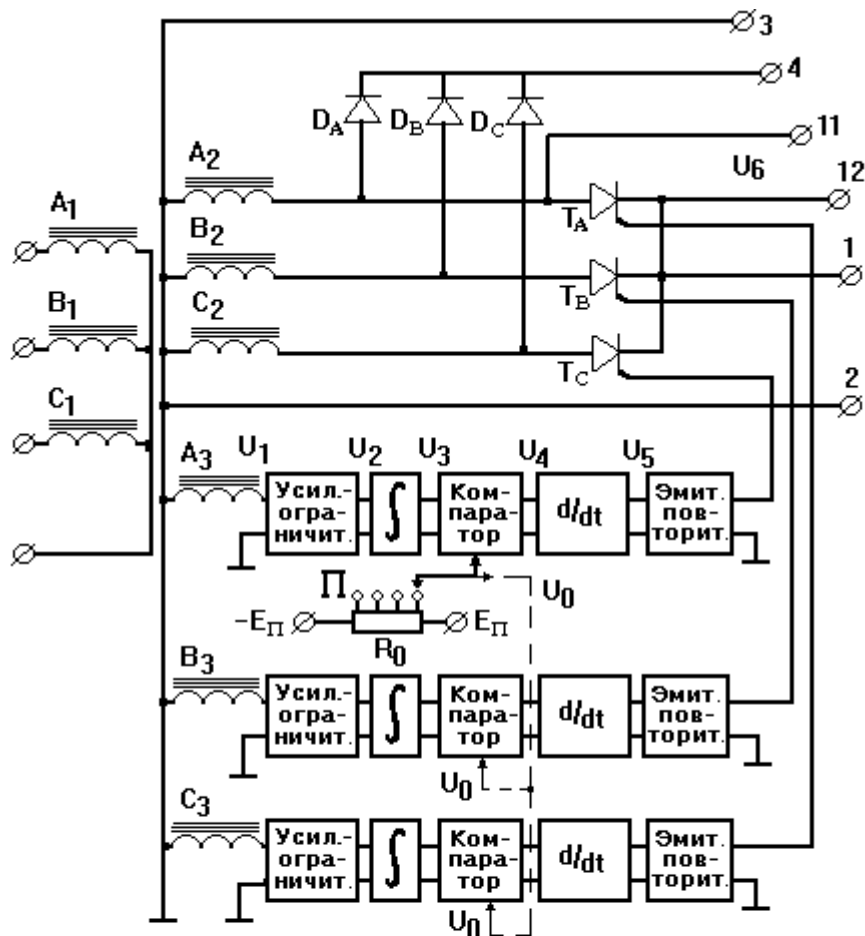
Максимально допустимый ток, потребляемый от генератора, равен 4 А. Сопротивление обмоток роторов двигателя и генератора - по 8 Ом каждое. Сопротивление обмоток возбуждения - по 28 Ом каждое.

4.2. Управляемый тиристорный выпрямитель

Электрическая схема выпрямителя представлена на рис. 4.3. На рис. 4.4 показана передняя панель выпрямителя, а на рис. 4.5 – графики напряжений в точках схемы управления.

Сетевое напряжение питания подается через трехфазный трансформатор **Тр.1**. Первичные и вторичные обмотки трансформатора **Тр.1** соединены звездой. Вторичные обмотки A_2, B_2, C_2 нагружены на два однополупериодных трехфазных выпрямителя. Один из них не регулируется (диоды

D_A, D_B, D_C) и предназначен для питания обмоток возбуждения двигателя и генератора электромашинного агрегата (присоединительные контакты 3, 4). Второй трехфазный выпрямитель регулируется с помощью тиристоров T_A, T_B, T_C путем подачи на их управляющие электроды импульсов, формируемых в каналах установки угла регулирования. Здесь используется свойство тиристора пропускать ток, если напряжение на его аноде больше, чем на катоде, и на его управляющий электрод подан запускающий импульс.



- 1,2 - зажимы для подключения к ротору двигателя электромашинного агрегата
 3,4 - зажимы для подключения к обмоткам возбуждения электромашинного агрегата
 11, 12 - зажимы для подключения осциллографа
 D_A, D_B, D_C - диоды T_A, T_B, T_C - тиристоры
 П - переключатель установки угла регулирования

Рис. 4.3. Схема управляемого тиристорного выпрямителя

Поэтому выпрямленное напряжение может изменяться от нуля до своего максимального значения за счет перемещения запускающего импульса внутри положительного полупериода входного переменного напряжения, что соответствует изменению фазового угла импульса относительно входного напряжения в пределах ($0^\circ, 180^\circ$). В трехфазных выпрямителях эти пределы сужаются до значений ($30^\circ, 150^\circ$), потому что в трехфазном выпрямителе именно при таких значениях фазового угла напряжение на аноде превышает напряжение на катоде.

Для формирования управляющих импульсов используется напряжение, синфазное с напряжением, подлежащим выпрямлению. В нашем выпрямителе это напряжение поступает в каждый канал от обмоток A_3, B_3, C_3 трансформатора Тр.1.

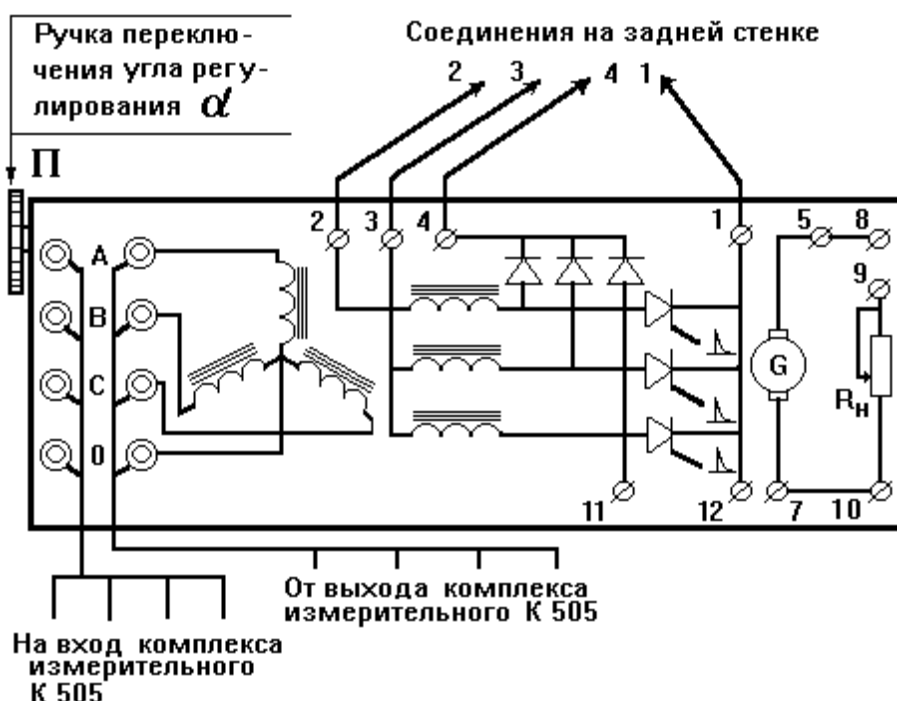


Рис.4.4. Передняя панель тиристорного выпрямителя

Это напряжение преобразуется с помощью усилителя-ограничителя в напряжение прямоугольного вида U_2 , которое интегрируется интегратором. В результате интегрирования получается напряжение треугольного вида U_3 , и оно подается на один из входов компаратора. На другой вход компаратора подается регулируемое постоянное напряжение U_0 . Это на-

пряжение изменяется дискретно с помощью переключателя **П**, расположенного на левой боковой стенке корпуса тиристорного выпрямителя.

Напряжение U_4 на выходе компаратора изменяется скачкообразно в моменты, когда напряжение U_3 оказывается равным U_0 .

Стоящая после компаратора дифференцирующая **RC** - цепочка формирует импульсы: положительный при положительном приращении напряжения U_4 и отрицательный в противном случае. Эти импульсы поступают затем на вход эмиттерного повторителя, рабочий режим которого установлен так, чтобы на его выход были пропущены только положительные импульсы, отпирающие тиристор. Если в момент прихода отпирающего импульса напряжение на аноде тиристора оказалось больше, чем на катоде, то тиристор отпирается и остается

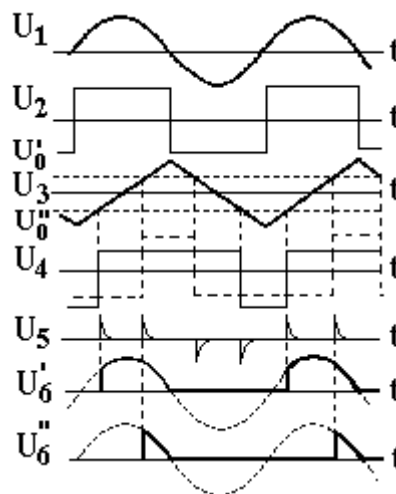


Рис. 4.5. Графики напряжений в характерных точках схемы управления тиристорным выпрямителем

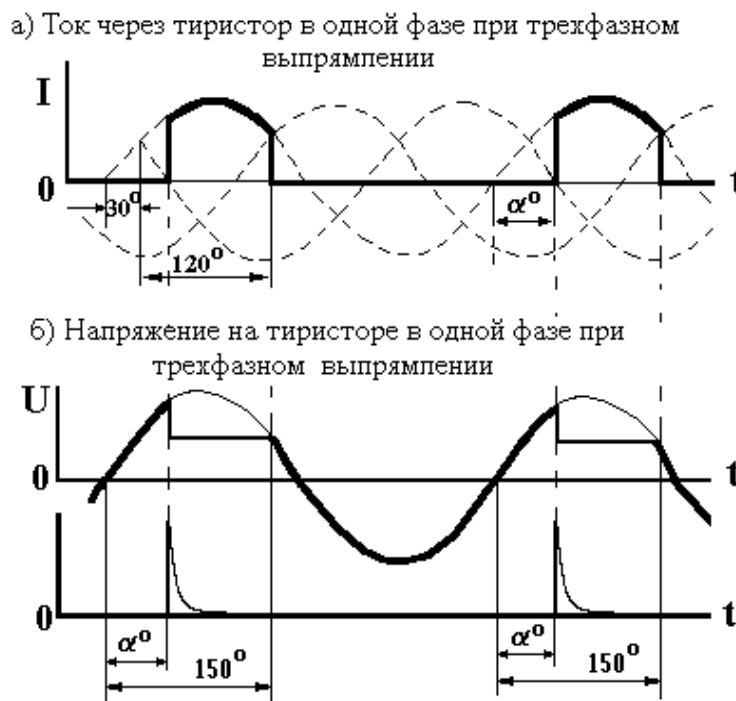


Рис. 4.6. К определению угла регулирования

открытым до ближайшей смены полярности напряжения на нем. В связи с этим форма кривой напряжения и, следовательно, тока в его цепи, будет иметь вид, представленный на двух последних графиках рис. 4.5. Эти два последние графика показывают примеры изменения тока через тиристор при двух значениях напряжения на компараторе: U'_0 и U''_0 (показано пунктиром на рис. 4.5). Понятно, что при совместной работе таких выпрямителей во всех трех фазах кривые напряжений будут иными.

Как видно из рис. 4.3, каждый из трех тиристоров находится под положительным анодным напряжением и может быть открыт управляющим импульсом в пределах изменения угла регулирования ($30^\circ, 150^\circ$). Поэтому кривая тока, проходящего через каждый тиристор в каждой фазе, будет иметь вид, показанный на рис. 4.6 а) жирной линией. Напряжение на тиристоре будет иметь вид, показанный на рис. 4.6 б).

В трехфазном выпрямителе регулирование выпрямленного напряжения выполняется по всем трем фазам за счет того, что напряжение U_0 подается на все три компаратора. Ручка переключателя для установки напряжения U_0 расположена на левой стенке управляемого тиристорного выпрямителя. Предусмотрено три положения переключателя, которым соответствуют значения углов регулирования приблизительно 30, 60, 120 градусов. При выполнении работы истинные значения углов регулирования уточняются с помощью электронно-лучевого осциллографа.

4.3.Комплект аналоговых приборов измерительный К 505

Комплект К505 предназначен для измерения действующих значений силы тока, напряжения и мощности в однофазных и трехфазных цепях. Внешний вид лицевой панели комплекта представлен на рис. 4.7.

В состав комплекта входят следующие измерительные приборы:

- амперметр действующего значения переменного тока электромагнитной системы с переключаемыми пределами измерения; в работе используется диапазон $(0 \div 0,5)$ А, цена деления 0,005 А/дел;
- вольтметр действующего значения переменного тока электромагнитной системы с переключаемыми пределами измерения;
- ваттметр ферродинамической системы.

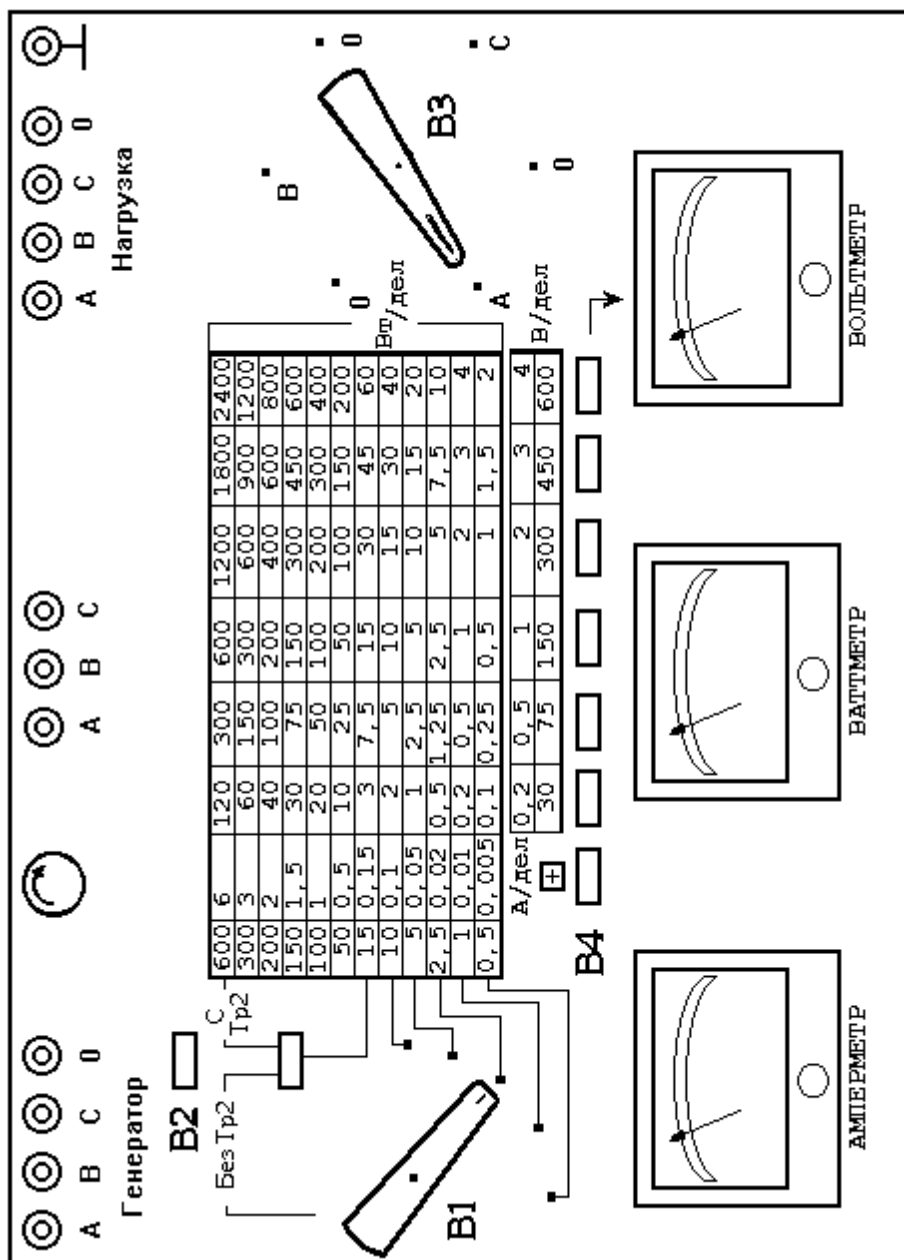


Рис. 4.7. Внешний вид комплекта измерительного К 505

Характеристики комплекта К505:

- пределы допускаемой основной приведенной погрешности
 - амперметра $\gamma_A = 0,5;$
 - вольтметра $\gamma_B = 0,5 ;$
 - ваттметра $\gamma_{Вт} = 0,5;$
- сопротивление токовой цепи (амперметра и ваттметра) $R = 1.0 \text{ Ом};$
- сопротивление параллельной цепи установки (цепи вольтметра и

параллельной цепи ваттметра) и цена одного деления ваттметра и вольтметра приведены в таблице 1.

Нормирующим значением измеряемой величины для обозначения класса точности всех трех приборов комплекта является наибольшее значение в диапазоне измерения.

Таблица 1

Характеристики комплекта измерительного К 505

Предел измерения напряжения	0 ÷ 300 В	0 ÷ 600 В
Сопротивление параллельной цепи ваттметра и вольтметра	30000 Ом	60000 Ом
Цена деления ваттметра	1,0 Вт/дел	2,0 Вт/дел
Цена деления вольтметра	2,0 В / дел	4,0 В / дел

В составе комплекта К505 имеется указатель последовательности фаз – фазоуказатель. Он включается кратковременным нажатием кнопки **В 2**.

С помощью комплекта К505 выполняются измерения тока, напряжения и мощности в каждой фазе последовательно. Для подключения всех трех приборов к той или иной фазе используется ручной переключатель **В3**.

Пределы измерения встроенных амперметра, вольтметра устанавливаются рычажным переключателем **В 1** и кнопочным переключателем **В 4**, находящимся под таблицей, нанесенной на верхней панели. Пределы измерения действующего значения силы тока устанавливается переключателем **В 1** и указаны в первом столбце таблицы. Во втором столбце таблицы приведены значения цены деления амперметра.

В нижней строке таблицы приведены пределы измерения действующего значения напряжения. Над ней – цена деления вольтметра на каждом из пределов. В перекрестии выбранных переключателями **В 1** и **В 4** строки и столбца из таблицы находится значение цены деления ваттметра.

Обычно работа выполняется при положении переключателя **В 4** на пределе 300 В, переключатель **В 1** почти всегда устанавливается на пределе 0,5 А.

4.4. Внешние приборы

Ваттметр Д 539 ферродинамической системы для измерения мощности, выделяемой в нагрузочном реостате R_H и в дополнительной нагрузке, если она имеется, пределы допускаемой силы тока в последовательной обмотке 2,5 и 5,0 А, диапазоны изменения напряжения 30, 75, 150, 300 В, приведенная погрешность не превышает 0,5 %.

Амперметр магнитоэлектрической системы для измерения постоянного тока.

Вольтметр М 243 магнитоэлектрической системы для измерения постоянного напряжения, приведенная погрешность не превышает 0,2 %.

Схема включения этих приборов для измерения напряжения, силы тока и мощности в нагрузке показана на рис. 4.8. На рисунке показаны также собственные сопротивления этих приборов, которые могут оказывать влияние на погрешности результатов измерений.

Электроннолучевой осциллограф служит для наблюдения кривой напряжения на тиристоре (жирная кривая на рис. 4.6) с целью контроля установки заданных значений угла регулирования и для определения значения этого угла по характерным участкам кривой.

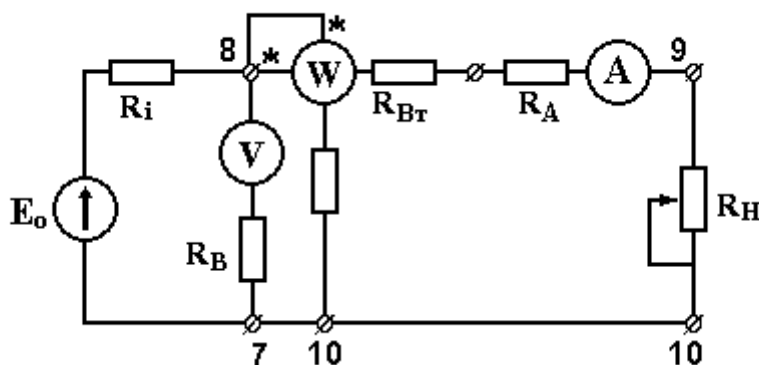


Рис. 4.8. Схема включения вольтметра, амперметра и ваттметра для измерения напряжения, силы тока и мощности в сопротивлении нагрузки

Пусть, например, требуется установить угол регулирования, примерно равный 30° . Переключатель П ставится в положение ' 30° ', при этом на экране осциллографа должна наблюдаться усеченная 120-градусная часть положительной полуволны напряжения U_0 . Путем манипуляции ручками

управления разверткой и синхронизации развертки луча осциллографа добиваются остановки изображения и определяют цену деления горизонтальной шкалы экрана в угловых градусах, исходя из того, что период наблюдаемого на экране напряжения соответствует 360° .

Зная цену деления этой шкалы, нетрудно оценить угол, соответствующий горизонтальному участку кривой напряжения. Из рис. 4.6 следует, что искомый угол регулирования определяется путем вычитания из 150° угла, соответствующего горизонтальному участку. Таким способом необходимо измерять угол регулирования при любом положении переключателя **П**.

5. Методические указания по выполнению работы

5.1. Предварительная подготовка и включение оборудования

5.1.1. Подготовка к работе комплекта измерительного К505

Переключатель **В1** пределов измерения тока установить в положение 0.5 А.

Переключатель **В2** установить в положение "без **Тр.2**".

Переключатель фаз **В3** установить в положение "0".

Переключатель **В4** установить в положение "300" и "+".

Питание от сети подведено к группе контактов с надписью "Генератор". К группе контактов "нагрузка" подключен управляемый тиристорный выпрямитель.

Для проверки последовательности включения фаз используется фазоуказатель, который включается кратковременным нажатием кнопки.

5.1.2. Подготовка к работе управляемого тиристорного выпрямителя и электроннолучевого осциллографа.

К присоединительным контактам 5, 7, 8, 9, 10, находящимся на передней панели тиристорного выпрямителя подключить амперметр, ваттметр и вольтметр, как показано на рис 4.8.

Электронно-лучевой осциллограф включить в сеть и присоединить его входной кабель к контактам 11, 12 тиристорного выпрямителя.

5.2. Порядок выполнения п. 3.1. программы работы.

5.2.1. Устанавливается максимальное значение сопротивления нагрузки R_H .

5.2.2. Устанавливается заданное преподавателем значение угла регулирования. Угол регулирования измеряется в соответствии с указаниями разд. 4.4. Полученное уточненное значение угла регулирования записывается в протокол эксперимента и остается неизменным.

5.2.3. С помощью приборов, входящих в состав измерительного комплекта **K505**, выполняются измерения активной мощности, действующих значений тока и напряжения в каждой фазе. Последовательное переключение приборов от фазы к фазе осуществляется ручным переключателем **B3**. Полученные значения $I_A, I_B, I_C, U_A, U_B, U_C, P_A, P_B, P_C$ записываются в таблицу 5.2.

5.2.4. Вычисляются значения полной мощности P_H для каждой фазы по формуле (1), а также суммарные значения активной мощности P (формула (2)) и суммарной полной мощности (формула (3)). Вычисляется K_M (формула (4)).

5.2.5. Измеряется мощность P_H , выделяемая в сопротивлении нагрузки R_H , сила тока и напряжение U_H на нагрузке.

Внимание! Разрыв цепи между контактами 8, 9 при работающем электромашинном агрегате недопустим!

5.2.6. По показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра в соответствии с формулами (6) вычисляется значение сопротивления нагрузки R_H .

5.2.7. Значение мощности P_H , выделяемой в нагрузке, делится на значение суммарной активной мощности P , полученной при выполнении разд. 5.2.4. В результате будет получено значение η (формула (16)).

5.2.8. Сопротивление нагрузки уменьшается, и операции по разд. 5.2.3 – 5.2.7. продолжают, пока не будет достигнуто максимальное значение выходной мощности. Этот факт устанавливается по показаниям ваттметра.

Количество таких циклов экспериментов устанавливается преподавателем.

5.2.9. По достижении максимального значения мощности, выделяе-

мой в нагрузке, сопротивление нагрузки R_H уменьшается так, чтобы мощность уменьшилась примерно на 0,1 от своего максимального значения, и операции по разд. 5.2.3 - 5.2.7 повторяются.

Сразу же после выполнения разд. 5.2.9 в целях безопасности и обеспечения сохранности лабораторного макета сопротивление R_H следует увеличить.

По мере получения экспериментальных данных и результатов промежуточных вычислений они поочередно заносятся в последние столбцы таблицы 5.2, заголовки которых обозначены, как 1, 2, ..., к.

Таблица предъявляется преподавателю, который подписывает ее при успешном завершении эксперимента.

5.3. Порядок выполнения п. 3.2. программы работы

5.3.1. Не изменяя режима работы электромашинного агрегата, устанавливается значение сопротивления нагрузки R_H , равное тому значению, при котором при выполнении работы по разд. 5.2. был получен максимум выходной мощности. Это сопротивление устанавливается по значению силы тока в нагрузке, которое было получено при выполнении работы в соответствии с разд. 5.2.3 - 5.2.8 и достижении максимальной мощности на выходе.

5.3.2. С помощью переключателя Π (рис. 4.3, 4.4) устанавливается угол регулирования, равный 30° .

5.3.3. Выполняются действия, описанные в разд. 5.2.3.

5.3.4. Выполняются действия, описанные в разд. 5.2.4.

5.3.5. Выполняются действия, описанные в разд. 5.2.5.

5.3.6. По полученным значениям P_H и P в соответствии с формулой (17) вычисляются значения к.п.д.

5.3.7. С помощью переключателя Π (рис. 4.3, 4.4) изменяется угол регулирования тиристорного выпрямителя на величину, заданную преподавателем.

Значение установленного угла регулирования следует измерять с помощью осциллографа, руководствуясь рис. 4.6 и указаниями разд. 4.4.

5.3.8. Операции по разделам 5.3.3 - 5.3.7 повторяются и прекращаются

Таблица 5.2.

$$\alpha = \dots\dots$$

№ эксперимента	1, 2, ..., К	
U_D в фазе А		
I_D в фазе А		
$P_{пА}$	(1)	
P в фазе А		
U_D в фазе В		
I_D в фазе В		
$P_{пВ}$	(1)	
P в фазе В		
U_D в фазе С		
I_D в фазе С		
$P_{пС}$	(1)	
P в фазе С		
$P_{п}$ общая	(3)	
P общая	(2)	
K_M	(4)	
P_H		
U_H		
I_H		
R_H по показ. амперметра и вольтметра	(6)	
R_H по показ. амперметра и ваттметра	(6)	
R_H по показ. вольтметра и ваттметра	(6)	
\bar{R}_H		

Таблица 5.3.

$$\bar{R}_H = \dots\dots$$

№ эксперимента	1, 2, ... , К	
U_D в фазе А		
I_D в фазе А		
$P_{пА}$	(1)	
P в фазе А		
U_D в фазе В		
I_D в фазе В		
$P_{пВ}$	(1)	
P в фазе В		
U_D в фазе С		
I_D в фазе С		
$P_{пС}$	(1)	
P в фазе С		
$P_{п}$ общая	(3)	
P общая	(2)	
K_M	(4)	
P_H		
U_H		
I_H		
α		

по достижении углом регулирования значения 120° . В этом случае электромашинный агрегат останавливается.

Всего количество дискретных значений угла регулирования должно быть равно 4 в диапазоне (30° , 120°).

По мере получения экспериментальных данных их поочередно заносят в последние столбцы таблицы 5.3, заголовки которых обозначены, как 1, 2, ..., к. Вид этой таблицы показан выше в разд. 5.2.

Таблица предъявляется преподавателю, и при успешном завершении экспериментов по разд. 3.2. преподаватель ее подписывает.

5.4. Порядок выполнения п. 3.3. программы работы

Выполняется при подготовке и оформлении отчета в соответствии с указаниями разд. 6.2.

Результаты вычислений и необходимые для этого исходные данные приводятся в таблицах по форме таблиц 5.4, 5.5.

6. Теоретическая часть

6.1. Методы измерений

Как известно, **кпд** агрегата есть отношение мощности, выделяемой им на сопротивлении нагрузки, к мощности, потребляемой им от источника.

Таким образом при выполнении работы необходимо измерять, с одной стороны, активную мощность, потребляемую исследуемым агрегатом из трехфазной сети, а с другой стороны - мощность, выделяемую на выходе электромашинного агрегата в нагрузочном реостате R_H и в дополнительной нагрузке, если она имеется.

Как видно из рис. 4.3, первичные обмотки трансформатора **Тр.1**, питающего электромашинный агрегат, соединены звездой с доступным нулевым проводом.

Таблица 5.4.

$$\alpha = \dots\dots\dots$$

№ эксперимента	1, 2, ..., к
γ_{U_D} в фазе A	(8)
γ_{I_D} в фазе A	(8)
$\gamma_{P_{II}}$ в фазе A	(9)
ΔP_{II} в фазе A	(14)
ΔP в фазе A	(7)
γ_{U_D} в фазе B	(8)
γ_{I_D} в фазе B	(8)
$\gamma_{P_{II}}$ в фазе B	(9)
ΔP_{II} в фазе B	(14)
ΔP в фазе B	(7)
γ_{U_D} в фазе C	(8)
γ_{I_D} в фазе C	(8)
$\gamma_{P_{II}}$ в фазе C	(9)
ΔP_{II} в фазе C	(14)
ΔP в фазе C	(7)
ΔP_{II} суммарная	(12)
$\gamma_{P_{II}}$ суммарная	(13)
ΔP суммарная	(10)
γ_P суммарная	(11)
γ_K	(15)
γ_{P_H}	(16)
γ_{U_H}	(8)
γ_{I_H}	(8)
γ_{R_H} по показаниям амперметра и вольтметра	(20)
\bar{R}_H	

Таблица 5.5.

$$R_H = \dots\dots\dots$$

№ эксперимента	1, 2, ..., к
γ_{U_D} в фазе A	(8)
γ_{I_D} в фазе A	(8)
$\gamma_{P_{II}}$ в фазе A	(9)
ΔP_{II} в фазе A	(14)
ΔP в фазе A	(7)
γ_{U_D} в фазе B	(8)
γ_{I_D} в фазе B	(8)
$\gamma_{P_{II}}$ в фазе B	(9)
ΔP_{II} в фазе B	(14)
ΔP в фазе B	(7)
γ_{U_D} в фазе C	(8)
γ_{I_D} в фазе C	(8)
$\gamma_{P_{II}}$ в фазе C	(9)
ΔP_{II} в фазе C	(14)
ΔP в фазе C	(7)
ΔP_{II} суммарная	(12)
$\gamma_{P_{II}}$ суммарная	(13)
ΔP суммарная	(10)
γ_P суммарная	(11)
γ_K	(15)
γ_{P_H}	(19)
$\Delta\alpha$	
α	

Активная мощность, потребляемая каждой фазой электромашинного агрегата, измеряется ваттметром и равна

$$P = U_{\text{д}} I_{\text{д}} \cos \varphi$$

где $U_{\text{д}}$, $I_{\text{д}}$ - действующие значения напряжения и тока, φ - угол сдвига фазы, $\cos \varphi$ - коэффициент мощности.

Полная мощность в каждой фазе вычисляется по показаниям амперметра и вольтметра и является результатом косвенного измерения:

$$P_{\text{п}} = U_{\text{д}} I_{\text{д}} . \quad (1)$$

Активная суммарная мощность, потребляемая из сети, равна сумме мощностей, потребляемых в каждой фазе:

$$P = P_{\text{А}} + P_{\text{В}} + P_{\text{С}} . \quad (2)$$

Полная суммарная мощность равна сумме полных мощностей в фазах:

$$P_{\text{п}} = P_{\text{пА}} + P_{\text{пВ}} + P_{\text{пС}} . \quad (3)$$

Коэффициент мощности (**кпд**) трехфазной цепи вычисляется по формуле:

$$K_{\text{М}} = \frac{P}{P_{\text{п}}} , \quad (4)$$

где P - есть сумма активных мощностей, измеренных ваттметром в фазах **А, В, С** (2), $P_{\text{п}}$ - сумма полных мощностей, вычисленных для каждой фазы по показаниям амперметра и вольтметра (3).

На выходе электромашинного агрегата вырабатывается постоянный ток, который замыкается на сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}}$ и выделяет на нем мощность $P_{\text{Н}}$. Измерение этой мощности выполняется с помощью внешнего ваттметра. Сила тока нагрузки измеряется прямым методом с помощью амперметра или косвенно, как отношение мощности, рассеиваемой в сопротивлении нагрузки, к напряжению на нем:

$$I_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{Н}}}{U_{\text{Н}}} , \quad (5)$$

где $U_{\text{Н}}$ - показание внешнего вольтметра, $P_{\text{Н}}$ - показание внешнего ваттметра.

Сопротивление нагрузки определяется также с помощью косвенных измерений путем вычислений по одной из формул:

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} = \frac{P_H}{I_H^2} = \frac{U_H^2}{P_H}. \quad (6)$$

Инструментальная погрешность измерений силы тока и сопротивления нагрузки может быть уменьшена за счет избыточности, которая возникает из-за того, что эти величины измеряются разными методами. Простейший способ использования этой избыточности - усреднение результатов измерений, полученных разными методами.

6.2. Характеристики погрешности результатов измерений

6.2.1. Характеристики инструментальной погрешности результатов прямых измерений

В настоящей лабораторной работе прямым измерениям подвергаются:

- активная электрическая мощность, потребляемая каждой фазой электромашинного агрегата из трехфазной сети;
- действующие значения переменного напряжения и тока в каждой фазе электромашинного агрегата.
- постоянный ток, отдаваемый электромашинным агрегатом в нагрузку
- постоянное напряжение на сопротивлении нагрузки;
- мощность, потребляемая нагрузкой.

Поскольку условия, в которых выполняется работа, незначительно отличаются от нормальных условий, регламентированных для применяемых приборов, мы будем считать, что погрешность, возникающая от действия внешних влияющих величин, несущественна, и не будем принимать ее во внимание.

Исходными данными для расчета характеристики погрешности (неопределенности) результатов прямых измерений являются:

- класс точности измерительного прибора и характер его обозначения на шкале;
- результаты прямых измерений.

В силу того, что характеристики погрешности измерительных приборов нормируются без разделения на систематическую и случайную составляющие, и с целью обеспечения гарантий в определении погрешности результатов, будем рассчитывать погрешности, исходя из наихудшего из

всех возможных соотношений систематической и случайной составляющих (см. также п.2.7 части 1 Лабораторного практикума [1]).

Начнем с простейшего случая прямых измерений тока, напряжения и мощности.

Пусть γ – числовое обозначение класса точности амперметра, вольтметра или ваттметра. Для применяемых в работе приборов число γ равно пределу допускаемой основной погрешности, приведенной к максимальному значению измеряемой величины из диапазона измерения, и выражается в процентах. Обозначим это значение измеряемой величины через x_{\max} . Учитывая, что основная приведенная погрешность нормируется в процентах, получим, что предельное значение абсолютной инструментальной погрешности каждого единичного результата прямого измерения

$$\Delta_{\text{ин}} = \frac{\gamma \cdot x_{\max}}{100}. \quad (7)$$

а предельное значение относительной инструментальной погрешности

$$\gamma_{\text{ин}} = \frac{\gamma \cdot x_{\max}}{x} \%, \quad (8)$$

где x – результат измерения, отчитываемый по шкале прибора.

Замечания.

1. При измерении силы тока в качестве γ , x_{\max} и x подставляются γ_A , I_{\max} и I соответственно. При измерении напряжения – γ_V , U_{\max} и U соответственно. При измерении мощности – $\gamma_{Вт}$, P_{\max} и P .

2. При измерениях придется пользоваться различными диапазонами, поэтому в качестве I_{\max} , U_{\max} и P_{\max} следует использовать верхние значения тех диапазонов, на которые включен прибор при выполнении каждого измерения.

6.2.2. Характеристики инструментальной погрешности результатов косвенных измерений

В настоящей работе косвенные измерения выполняются в следующих случаях:

- при определении по формуле (1) полной мощности в каждой фазе;

- при определении суммарных мощностей по формулам (2),(3);
- при определении коэффициента мощности по формуле (4);
- при определении по формуле (5) тока, протекающего по сопротивлению нагрузки R_H ;
- при определении сопротивления нагрузки по формулам (6);
- при определении **кпд**.

При вычислении результата косвенных измерений путем перемножения или деления результатов прямых измерений предельная относительная погрешность конечного результата есть сумма относительных погрешностей прямых измерений. например, если $P_H = U_D I_D$ (формула (1)), то $\ln P_H = \ln U_D + \ln I_D$. Полный дифференциал этого выражения выражается через производные (выраженные в конечных разностях):

$$\frac{\Delta P_H}{P_H} = \frac{\Delta U_D}{U_D} + \frac{\Delta I_D}{I_D}.$$

Все элементы этого выражения являются относительными погрешностями, поэтому

$$\gamma_{P_H} = \gamma_{U_D} + \gamma_{I_D}, \quad (9)$$

где $\gamma_{U_D}, \gamma_{I_D}$ суть оцениваются по формуле (8).

Если результат косвенного измерения равен сумме результатов прямых измерений (см. формулу (2)), то в этом случае может быть оценена предельная абсолютная погрешность конечного результата, как сумма абсолютных погрешностей результатов прямых измерений:

$$\Delta P = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C, \quad (10)$$

после чего может быть вычислено предельное значение относительной погрешности в процентах:

$$\gamma_P = \frac{\Delta P}{P_A + P_B + P_C} 100\%, \quad (11)$$

где $\Delta P_A, \Delta P_B, \Delta P_C$ вычисляются по характеристикам погрешности ваттметра, встроенного в комплекс **К 505** (формула (7)).

Точно такие же выражения справедливы для оценки предельных значений инструментальных погрешностей определения суммарной полной мощности :

$$\Delta P_{\Pi} = \Delta P_{\Pi A} + \Delta P_{\Pi B} + \Delta P_{\Pi C}, \quad (12)$$

$$\gamma_{P_{\Pi}} = \frac{\Delta P_{\Pi}}{P_{\Pi A} + P_{\Pi B} + P_{\Pi C}} 100\%, \quad (13)$$

$\Delta P_{\Pi A}$, $\Delta P_{\Pi B}$, $\Delta P_{\Pi C}$ вычисляются через значения характеристик относительных инструментальных погрешностей, например, предельная абсолютная погрешность измерения мощности в фазе А

$$\Delta P_{\Pi A} = \gamma_{\Pi A} \cdot P_A / 100, \quad (14)$$

где $\gamma_{\Pi A} = \gamma_{U_d} + \gamma_{I_d}$.

В соответствии с вышесказанным и разд. 2.7 части 1 Лабораторного практикума [1] предельное значение относительной инструментальной погрешности определения коэффициента мощности K_M по формуле (4) ограничено значением :

$$\gamma_K = \gamma_P + \gamma_{P_{\Pi}}. \quad (15)$$

Предельное значение погрешности измерения активной мощности, выделяемой в нагрузке, вычисляется по характеристике погрешности $\gamma_{Вт}$, нормированной для внешнего ваттметра, по аналогии с (8):

$$\Delta P_H = \gamma_{Вт} \cdot P_H / 100. \quad (16)$$

Коэффициент полезного действия K_M (кпд) электромашинного агрегата, вычисляется по формуле:

$$K_M = \frac{P_H}{P}, \quad (17)$$

где P - суммарная активная мощность, потребляемая агрегатом (2).

В соответствии с разд. 2.7 части 1 Лабораторного практикума [1] предельное значение относительной погрешности результата косвенного измерения КПД электромашинного агрегата по аналогии с (15) равно:

$$\gamma_K = \gamma_P + \gamma_{P_H}, \quad (18)$$

где γ_P – характеристика относительной погрешности косвенного измерения активной мощности (11),

$$\gamma_{P_H} = \frac{\Delta P_H}{P} 100\% \quad (19)$$

характеристика относительной погрешности измерения мощности, выделяемой в нагрузке, с помощью внешнего ваттметра.

Предельное значение относительной погрешности определения сопротивления нагрузки по формулам (6) вычисляется по аналогии с (9), (15), (18):

$$\gamma_{R_H} = \gamma_{U_H} + \gamma_{I_H},$$

если R_H вычисляется по показаниям амперметра и вольтметра, и

$$\gamma_{R_H} = \gamma_{P_H} + 2\gamma_{I_H}, \quad (20)$$

если R_H вычисляется по показаниям амперметра и ваттметра,

$$\gamma_{R_H} = 2\gamma_{U_H} + \gamma_{P_H},$$

если R_H вычисляется по показаниям вольтметра и ваттметра.

В настоящем разделе были рассмотрены инструментальные погрешности измерений. Эти погрешности квалифицируются, как инструментальные, поскольку они порождены собственными погрешностями применяемых приборов (см. также п.п. 2.1, 2.6. части 1 Лабораторного практикума [1]).

7. Требования по выполнению работы и по составлению отчета о лабораторной работе

Задания преподавателя и результаты, получаемые в ходе выполнения работы, должны фиксироваться в черновом протоколе с применением таблиц, форма которых установлена в разд. 5.2, 5.3 настоящих методических указаний. В этом черновом протоколе должен быть приведен перечень использованных приборов в соответствии с требованиями, приведенными в Приложении 2 части 1 Лабораторного практикума [1].

При успешном завершении работы преподаватель подписывает черновой протокол выполненных экспериментов, который должен быть приложен к окончательному отчету.

Общие требования к содержанию и оформлению отчета о работе приводятся здесь, а также в приложениях 1 и 2 к части 1 лабораторного практикума [1].

Список литературы, рекомендуемой для подготовки к работе № 7

1. Измерительная информационная техника и метрология / Лабораторный практикум, часть 1 “Используемые приборы, сведения из теоретической метрологии, статистическая обработка результатов измерений” // Под ред. Г.Н.Солопченко. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. – 91 С.
2. Основы метрологии и электрические измерения / Б.Я.Авдеев, Е.М.Антонюк, Е.М.Душин и др.; под ред. Е.М.Душина.-Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 С.
3. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 С.
4. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. – М.: Высшая школа, 1989. – 383 С.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Форма титульного листа и указания по составлению отчета приведены в приложениях 1 и 2 к части 1 лабораторного практикума [1].

Отчет о лабораторной работе должен содержать :

1. Перечень использованных средств измерений с указанием метрологических характеристик, на основании которых были определены погрешности результатов измерений.
2. Задания преподавателя - по всем пунктам программы.
3. Черновые протоколы измерений с экспериментальными данными, подписанные преподавателем.
4. Схемы соединений.
5. Таблицы и графики, **в обязательном порядке в отчете должны быть представлены формулы с подстановкой в них исходных данных и результаты вычислений по каждой из формул.**
6. Комментарии и выводы.
7. Замечания и предложения по настоящим методическим указаниям.