

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Н.В. Гусев, Ю.Н. Дементьев, С.М. Семенов**

**ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2010

УДК 621.3.031(076.5)  
ББК 31.28я73  
Г96

**Гусев Н.В.**

Г96 Потребители электрической энергии. Лабораторный практикум: учебное пособие / Н.В. Гусев, Ю.Н. Дементьев, С.М. Семенов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 128 с.

В лабораторных работах вместе с обычным содержанием (поставленные цели и задачи, решаемые в описании; краткие теоретические сведения; программа работы; технические параметры установок; перечень вопросов для самопроверки; список литературы) широко представлено использование компьютерной техники для углубленного исследования электромеханических процессов в системах потребления электрической энергии.

Лабораторный практикум содержит описание шести лабораторных работ по курсу «Потребители электрической энергии» для студентов, обучающихся по специальности 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».

УДК 621.3.031(076.5)  
ББК 31.28я73

*Рецензенты*

Кандидат технических наук, доцент  
зав. каф. ЭПА СГТА  
*С.Н. Кладиев*

Кандидат технических наук  
специалист по силовой электронике  
отдела автоматического электропривода ООО «ЭлеТим»  
*В.Н. Черемисин*

© ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2010  
© Гусев Н.В., Дементьев Ю.Н.,  
Семенов С.М., 2010  
© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2010

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**  
**СИСТЕМА «ТИРИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ – АСИНХРОННЫЙ**  
**ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ» КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ**  
**СХЕМЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**1.1. Цель работы**

Исследование статических и динамических характеристик, режимов работы, параметров и показателей асинхронного электропривода изменением напряжения питания (система «Тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором») в схеме потребления электроэнергии.

**1.2. Оборудование стенда (перечень аппаратуры)**

Аппаратная часть комплекта выполнена по блочному (модульному) принципу и содержит:

- трехсоставной лабораторный стол со встроенным контейнером для хранения съемных функциональных блоков, проводников и методических материалов, рамами для установки необходимых в эксперименте функциональных блоков, выкатной полкой для клавиатуры компьютера и подставкой для системного блока последнего;
- источники питания;
- персональный IBM-совместимый компьютер со встроенной платой ввода/вывода данных фирмы National Instruments;
- измерительные преобразователи и приборы.

Питание комплекса осуществляется от трехфазной электрической сети напряжением 380 В с нейтральным и защитным проводниками.

- Потребляемая мощность Вт, не более..... 500.
- Габариты (длина / ширина / высота), мм.....2750×900×1600.
- Масса, кг, не более.....250.

Программная часть комплекта включает:

- программную среду персонального компьютера (Windows всех версий, начиная с Windows 98);
- разработанные регистраторы режимных параметров машин постоянного и переменного тока, пульта управления электроприводами, виртуальный осциллограф.

### 1.2.1. Назначение и описание функциональных блоков (рис. 1.1)

– Трехфазный источник питания.

Предназначен для питания комплекта трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.

– Тиристорный преобразователь / регулятор.

Предназначен для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока (режим преобразователя) и трехфазного асинхронного двигателя (режим регулятора). Преобразует трехфазное напряжение синусоидального тока в напряжение постоянного тока, а также в трехфазное напряжение переменной величины. Выходное напряжение регулируется вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ).

– Источник питания машины постоянного тока.

Предназначен для питания обмоток якоря и возбуждения постоянным током. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Якорное напряжение регулируется вручную или дистанционно. Напряжение возбуждения нерегулируемое.

– Трехполюсный выключатель.

Предназначен для ручного или дистанционного / автоматического (от ПЭВМ) включения / отключения электрических цепей.

– Трехфазная трансформаторная группа.

Предназначена для преобразования однофазного / трехфазного напряжения.

– Блок мультиметров.

Предназначен для измерения токов, напряжений, омических сопротивлений. Цифровой с жидкокристаллическим дисплеем.

– Указатель частоты вращения.

Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в электромашинном агрегате в аналоговой форме.

– Измеритель мощностей.

Предназначен для измерения активной и реактивной мощностей в однофазной электрической цепи и отображения их в аналоговой форме.

– Преобразователь угловых перемещений.

Предназначен для преобразования скорости вращения электрических машин в сигналы цифрового вида.

– Коннектор.

Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам платы сбора данных PCI 6024E персонального компьютера.

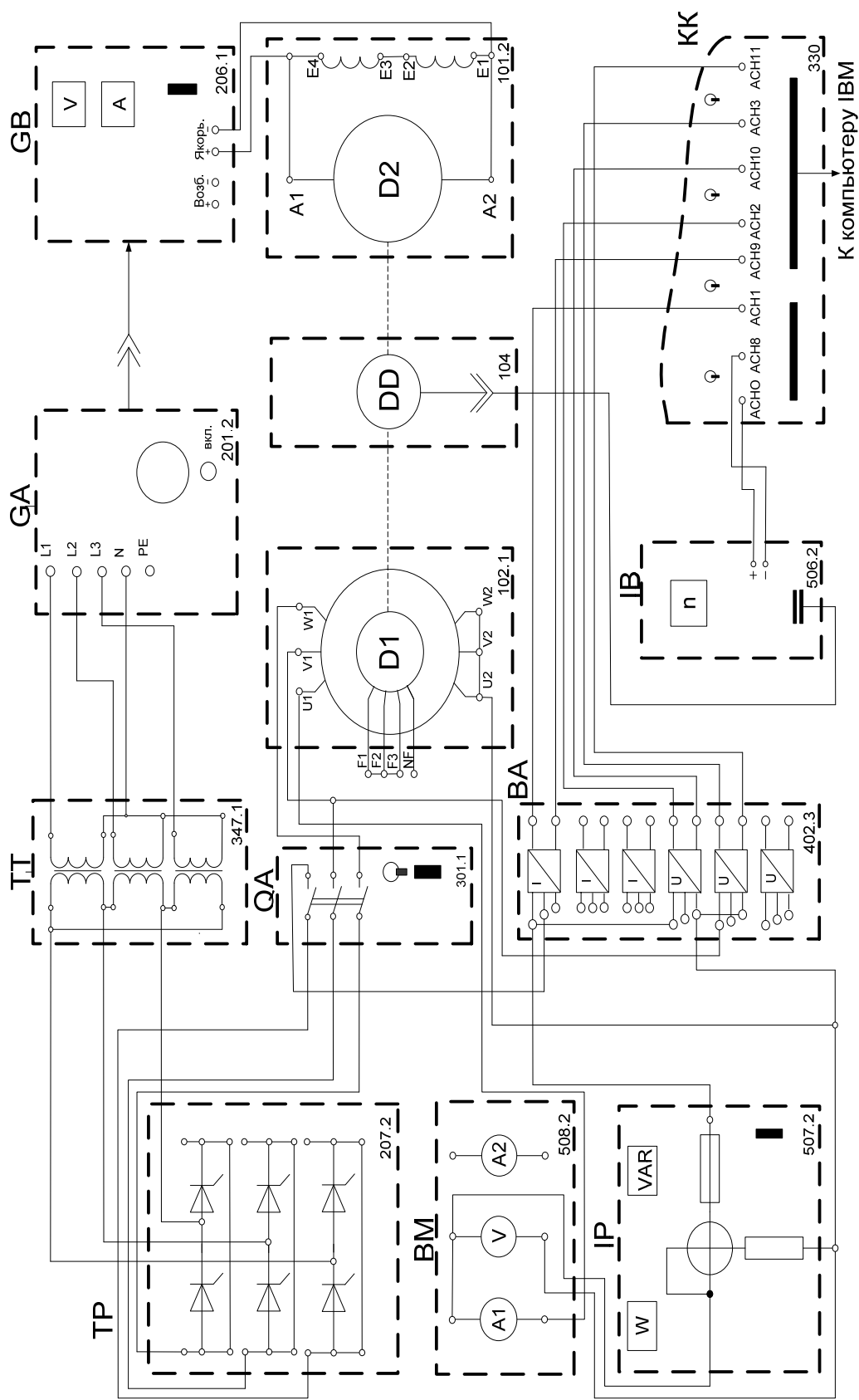


Рис. 1.1. Принципиальная электрическая схема асинхронного электропривода с тиристорным регулятором

– Персональный компьютер.

Предназначен для дистанционного / автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.

– Блок датчиков тока и напряжения.

Предназначен для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых цепях постоянного и переменного тока, и гальванически с последними не связанных.

Исследуемая машина переменного тока (асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$P_H = 30 \text{ Вт};$$

$$U_H = 127 \text{ В};$$

$$I_H = 0,35 \text{ А};$$

$$n_H = 1250 \text{ об/мин};$$

$$\eta_H = 36 \text{ \%};$$

$$\cos \varphi_H = 0,73;$$

$$R_1 = 0,18 \text{ о.е.};$$

$$x_1 = 0,087 \text{ о.е.};$$

$$R_2' = 0,150 \text{ о.е.};$$

$$x_2' = 0,15 \text{ о.е.}$$

Нагрузочная машина постоянного тока (двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением):

$$P_H = 90 \text{ Вт};$$

$$U_H = 220 \text{ В};$$

$$I_H = 0,56 \text{ А};$$

$$n_H = 1500 \text{ об/мин};$$

$$I_{BH} = 0,2 \text{ А};$$

$$\eta_H = 57,2 \text{ \%};$$

$$\cos \varphi_H = 0,73;$$

$$R_{я} = 86 \text{ Ом};$$

$$R_{o.б.} = 1,15 \text{ кОм.}$$

Исследуемая и нагрузочная машины жестко соединены между собой и представлены в виде электромашинного агрегата, дополненного маховиком и преобразователем угловых перемещений.

## 1.2.2. Обозначения и параметры используемой аппаратуры

Таблица 1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
ТТ	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3 x 80 В·А; 230 / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
QA	Трехполюсный выключатель	301.1	~400 В; 10 А
ВА	Блок датчиков тока и напряжения	402.3	3 измерительных преобразователя «ток-напряжение» 5А/0,5А/5 В; 3 измерительных преобразователя «напряжение-напряжение» 1000 В/100 В/3 В
GA	Трехфазный источник питания	201.2	~400 В; 16 А
GB	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	-0...250 В; 3 А (якорь); -200 В; 1 А (возб.).
D2	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; -220 В/0,76 А (якорь); -220 В (возбуждение)
DD	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
TP	Тиристорный преобразователь/регулятор	207.2	~3×400 В / 2 А 6 тиристоров
D1	Машина переменного тока	102.1	50 Вт; ~230 В; 1500 мин <sup>-1</sup>
IB	Указатель частоты вращения	506.3	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>
IP	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300;600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5А

Окончание табл. 1.1

ВМ	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра $\approx 0 \dots 1000 \text{ В}$ ; $\approx 0 \dots 10 \text{ А}$ ; $0 \dots 20 \text{ МОм}$
КК	Коннектор	330	8 аналог. дифф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
IBM	Персональный компьютер	550	IBM-совместимый плата сбора информации PCI 6024E

### 1.3. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

Блок – схема соединений тепловой защиты машины переменного тока изображена на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Схема тепловой защиты машины переменного тока

Перечень аппаратуры схемы тепловой защиты (рис. 1.2) приведен в табл. 1.2.



Таблица 1.2

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
D	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / $\sim 230$ В / 1500 мин <sup>-1</sup>
GA	Трехфазный источник питания	201.2	$\sim 400$ В / 16 А

#### 1.4. Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра

Для измерения трех базовых электрических величин (напряжения, тока и омического сопротивления) используется мультиметр. Схемы подключения мультиметра для измерения этих величин приведены на рис. 1.3, рис. 1.4, рис. 1.5. До его подключения к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- установить род тока (постоянный/переменный);
- выбрать диапазон измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильно подсоединить зажимы мультиметра к измеряемой цепи.

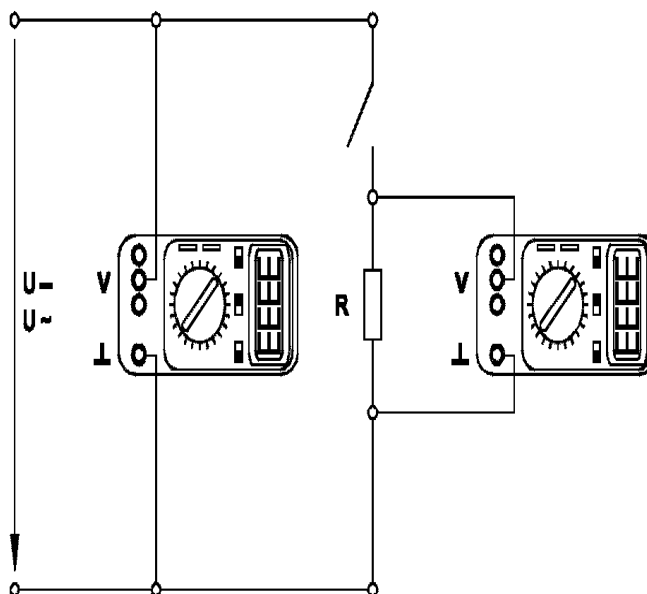
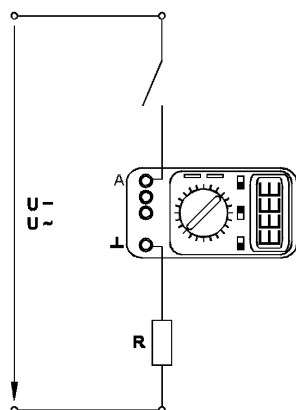
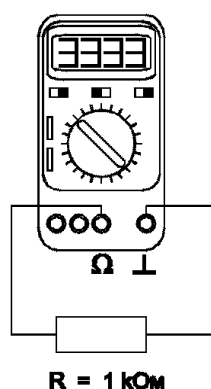


Рис. 1.3. Схема присоединения мультиметра (как вольтметра) для измерения напряжения



*Рис. 1.4. Схема присоединения мультиметра (как амперметра) для измерения тока*



*Рис. 1.5. Схема присоединения мультиметра (как омметра) для измерения омического сопротивления*

## **1.5. Порядок работы с оригинальными программными продуктами**

В программное обеспечение учебного лабораторного комплекса «Электрический привод» входят одиннадцать программных продуктов – «Многоканальный осциллограф», «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока», «Регистратор режимных параметров машины переменного тока», «Регистратор режимных параметров частотного привода» и семь узкоспециализированных программ для проведения экспериментов.

### **1.5.1. Описание работы с программой «Многоканальный осциллограф»**

Программа «Многоканальный осциллограф» является виртуальным аналогом реальных приборов и обладает широкими функциональными возможностями. Она предназначена для регистрации и отображения различных аналоговых сигналов в удобной для пользователя форме.

«Осциллограф» имеет четыре одинаковых канала, каждый из которых может быть сопоставлен с любым физическим каналом аналогового ввода платы. Каналы платы должны быть настроены на дифференциальный режим работы.

Каждый из каналов осциллографа может быть включен или выключен, иметь свой собственный коэффициент деления, быть «прямым» или «инверсным», иметь «открытый» или «закрытый» вход (т. е. сохранять или отрезать постоянную составляющую сигнала). Кроме того, сигнал любого канала можно «сгладить» (применяется для наблюдения зашумленных сигналов), отобразить определенным цветом, сдвинуть по вертикали.

Имеется два способа синхронизации картинки на экране осциллографа. Первый из них, «50 Гц» применяется для наблюдения сигналов, частота которых кратна 50 Гц. В этом режиме частоту синхронизации можно менять в небольших пределах, нажимая на кнопки с красными стрелками. Нажатием на правую стрелку можно заставить «бежать» картинку вправо, нажатием на левую – влево.

Второй способ синхронизации – классическая синхронизация по какому-либо каналу. Здесь можно выбрать номер канала, по которому будет производиться синхронизация, а также уровень синхронизирующего напряжения.

По оси времени картинку на экране осциллографа можно растянуть или сжать, задавая тот или иной масштаб по горизонтали, а также сдвинуть вправо или влево соответствующим движком.

Осциллограф:

– Работает в режиме XY. В этом случае можно задать номера каналов, сопоставленных с осями X и Y, а также цвет отображаемой линии. В любой момент сканирование аналоговых каналов можно остановить. При этом картинка на экране осциллографа «заморозится». Полученные осциллограммы можно теперь так же, как и до «замораживания» масштабировать, менять цвета линий и пр.

– Можно использовать в режиме запоминания, для чего в окне «Параметры» должна быть поставлена соответствующая галочка. В этом случае программа во время сканирования будет непрерывно сохранять данные в циклический буфер. Его содержимое можно отобразить *после остановки сканирования*. Существует возможность изменять порядок отображения запомненных кривых.

– Может вычислять интегральные значения принимаемых сигналов. Для включения этого режима нужно нажать соответствующую кнопку.

Программа позволяет сохранять осциллограммы в файлы. Сохранение производится двумя способами – в текстовый файл или в файл собственного формата \*.osc. В первом случае в созданном файле будет находиться таблица значений точек каналов, которую можно затем экспортировать в Excel. Во втором случае в сохраненном файле будет содержаться информация об осциллограммах, о положениях органов управления и пр. Сохраненный файл можно снова загрузить в «Осциллограф» и выполнять все те же действия, что и с «замороженной» осциллограммой.

Расширение \*.osc регистрируется в Windows при установке программы либо путем вызова соответствующего пункта меню.

«Многоканальный осциллограф» может гибко настраиваться на определенную скорость сканирования и нужное быстродействие. При установке параметров сканирования можно исходить из следующих соображений.

*Частота сканирования* должна находиться в пределах 1000 – 50000 герц. Если необходимо рассмотреть мелкие (по частоте) подробности сигнала (например, интервалы коммутации тиристоров в схемах силовой электроники), то частоту сканирования целесообразно задавать относительно высокую, если же форма сигнала не слишком интересна (например, заведомо известно, что сигналы – синусоиды), то частоту сканирования можно задать относительно низкую. Необходимо иметь в виду, что при установке высокой частоты сканирования быстродействие программы снижается, поэтому иногда целесообразно оставлять включенным лишь один канал.

*Частоту обновления осциллограмм* следует устанавливать в пределах 5...50 Гц. При этом необходимо иметь в виду, что если частота сканирования, деленная на частоту обновления осциллограмм, не кратна 50 Гц, то режим синхронизации «50 Гц» работать не будет. Также нужно учитывать, что чем выше частота обновления осциллограмм, тем быстрее реагирует осциллограф на изменение режима схемы; тем меньший по длине отрезок времени отображается на экране; тем сильнее нагружается система. Верно и обратное утверждение.

На графиках осциллографа отображается каждая N-ная точка. Число N задается в пределах от 1 до 10. Чем выше N, тем менее подробно строятся графики и тем меньше нагружается система. Верно и обратное утверждение.

Опцию «*Запоминать последние N секунд процесса*» следует устанавливать в диапазоне 1...20 с. Опцию «*Отображать каждую N-ную точку*» (на вкладке «Запоминание») – в диапазоне 1...10 с. Чем больше время запоминания, тем больше используется оперативная память ком-

пьютера и тем дольше отображается записанный в память процесс. Чем больше число N, тем менее подробно и более быстро происходит отображение. Верны и обратные утверждения.

Для некоторого увеличения общего быстродействия программы рекомендуется отключать режим запоминания.

Ниже перечислены неочевидные возможности интерфейса программы, а также некоторые замечания.

– Двойным щелчком мыши можно устанавливать в ноль регуляторы смещения картинки по горизонтали и по вертикали.

– Щелчок мыши на осях графика вызывает окно настройки соответствующей оси.

– В этом окне, помимо всего прочего, можно включить или отключить отображение нулевых линий.

– Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

– Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

– Для удобства определения значений величин на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.

– Регулятор уровня синхронизации проградуирован *в единицах графика*.

– Делители напряжения каналов и временной делитель проградуированы по отношению *к одной единице* графика (например, положение 500 мВ означает, что одна единица (не клетка!) графика соответствует 500 мВ).

– Параметры сканирования по умолчанию можно установить, выбрав соответствующий пункт меню «Настройка».

– Аналогичным образом можно зарегистрировать расширение «\*.osc».

– Таким же образом можно вернуть все органы управления в исходное положение.

– Цвет того или иного графика можно выбрать, щелкнув «мышкой» по соответствующей кнопке выбора цвета.

– Отображение интегральных (средних, действующих, средневыпрямленных, максимальных, минимальных, амплитудных) значений сигналов можно включить, нажав на соответствующую кнопку.

– В режиме запоминания осциллограммы можно сглаживать, причем существуют два режима сглаживания – обычное, предназначенное для сглаживания случайных помех, и сильное (x10), предназначенное для сглаживания частот, сравнимых с 50 Гц. Следует, однако, всегда понимать, что *любое сглаживание в общем случае искажает форму снятых зависимостей.*

– В режиме запоминания можно также менять порядок отображения графиков (т. е. вывести какую-либо кривую поверх остальных).

### **1.5.2. Описание работы с программой «Регистратор режимных параметров машины переменного тока»**

Программы-регистраторы предназначены для регистрации и отображения специфических параметров электрических машин в удобной для пользователя форме. Программы не имеют практически никаких настроек и обладают простым, удобным и интуитивно понятным интерфейсом.

Необходимым условием работы программ является правильное подключение к коннектору (код 330) аналоговых сигналов. Для удобства пользования, кроме схем данного руководства краткая информация по подключению сигналов имеется в самих программах.

Регистратор режимных параметров машины переменного тока в реальном времени отображает зависимости от времени тока статорной обмотки, частоты вращения и электромагнитного момента машины, а также – ее механическую характеристику (зависимость частоты вращения от электромагнитного момента).

## **1.6. Общие сведения**

### **1.6.1. Обобщенная структура и режимы работы системы асинхронного электропривода с тиристорным регулятором**

Тиристорный регулятор напряжения с асинхронным двигателем (ТРН – АД) предназначен для изменения амплитуды напряжения, подводимого к статору без изменения частоты, и используется главным образом для управления пуском (мягкие пускатели) и осуществления ряда других полезных функций.

ТРН находит широкое применение в электроприводах переменного тока, где за счет изменения напряжения на статоре асинхронных двигателей обеспечиваются регулирование токов и моментов двигателей в переходных режимах, симметрирование токов в фазах, ряд защит двигателя. Одна из них связана с повышением энергетических показателей работы асинхронных электроприводов при малых нагрузках. Тиристор-

ные регуляторы напряжения, выполняющие эту функцию, получили название регуляторов экономичности, или экономайзеров. Возможность энергосбережения этим способом иллюстрируют зависимости тока статора  $I_1$  от прикладываемого к двигателю напряжения  $U_1$  (рис. 1.6) при разных моментах нагрузки  $M_{c1} < M_{c2} < M_{c3} < M_{c4}$ . Эти зависимости иногда называют U-образными характеристиками двигателя.

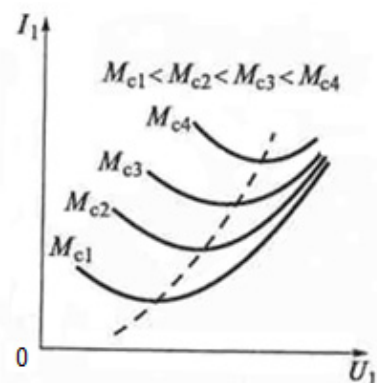


Рис. 1.6. U-образные характеристики асинхронного двигателя

Как видно из графиков, при каждой нагрузке двигателя имеется такое напряжение, при котором потребляемый ток минимален. Снижение тока происходит за счет уменьшения его реактивной составляющей. За счет этого обеспечиваются снижение потерь энергии в двигателе, повышение его КПД и коэффициента мощности  $\cos\varphi$ .

На рис. 1.7 показаны построенные для двигателя мощностью 30 кВт зависимости КПД,  $\cos\varphi$ , относительных тока статора  $I_1^*$  и потерь мощности  $\Delta P^*$  в двигателе от относительного напряжения  $U^*$  при моменте нагрузки  $M_c$ , равном 20 % от номинального. Из кривых видно, что наилучших значений эти показатели достигают при напряжениях, равных 0,6...0,8 номинального значения.

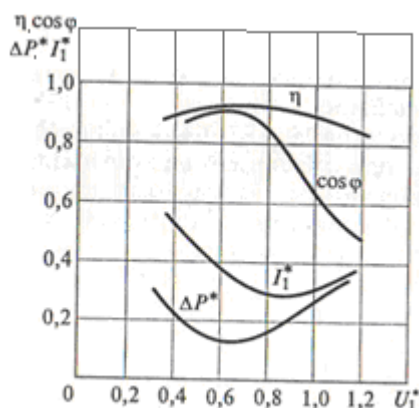


Рис. 1.7. Зависимости тока статора, потерь мощности, КПД и коэффициента мощности от напряжения

Требуемый уровень оптимального скольжения может быть реализован в замкнутой по скорости системе ТРН – АД, схема которой приведена на рис. 1.8. На схеме обозначено: ТГ – тахогенератор, ЗП – потенциометр задания требуемой скорости (скольжения) двигателя.

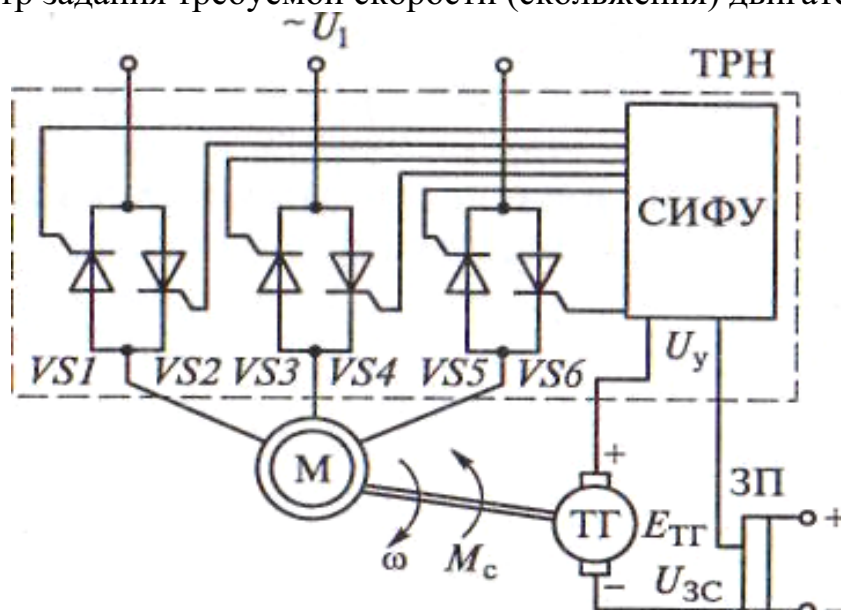


Рис. 1.8. Схема замкнутой системы ТРН – АД с обратной связью по скорости

Схема обеспечивает поддержание скорости и тем самым скольжения с определенной точностью при изменениях момента нагрузки  $M_c$ . За счет регулирования напряжения возможно в 2,5 – 3 раза уменьшить потери мощности и повысить  $\cos\varphi$ .

До появления доступных преобразователей частоты в нашей стране предпринимались попытки использовать ТРН для регулирования скорости асинхронных двигателей насосов, работающих в продолжительном режиме.

Системы электропривода, построенные с использованием ТРН при небольшом диапазоне изменения скорости и момента, обеспечивают хорошую управляемость двигателя (режим пуска, торможения, реверса при использовании исходной структуры преобразователя или части ее силовых элементов). Имеется оптимальное быстродействие при обработке изменяющихся входных сигналов; энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности); амплитуда и частота пульсаций момента при вентильном управлении электроприводом; равномерность загрузки отдельных фаз двигателя и др.

Вместе с тем тиристорный регулятор напряжения, используемый по основному назначению – плавный пускатель, энергосберегающее устройство при малых нагрузках – очень полезное средство, широко используемое за рубежом, но мало применяемое в России.



### 1.6.2. Принцип работы ТРН – АД

Одним из возможных способов регулирования координат (скорости) асинхронных двигателей является изменение напряжения на статоре при постоянной частоте питающей сети.

На рис. 1.9 приведена силовая часть схемы электропривода при реализации этого способа с использованием тиристорного регулятора напряжения.

Тиристорный регулятор состоит из трех пар встречно-параллельно соединенных тиристоров  $VS1 \div VS6$ , включенных между фазой сети и фазой статора.

Регулирование напряжения на АД осуществляется изменением угла управления  $\alpha$ , т. е. сдвигом во времени управляющих импульсов, подаваемых на управляющие электроды тиристоров. Импульсы подаются на все тиристоры не одновременно, а со сдвигом во времени на третью часть периода частоты сети. Это определяется тем, что управляющий импульс каждого тиристора должен быть сдвинут относительно напряжения той фазы сети, к которой подключен тиристор, на один и тот же угол управления  $\alpha$ , а фазные напряжения сети сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ .

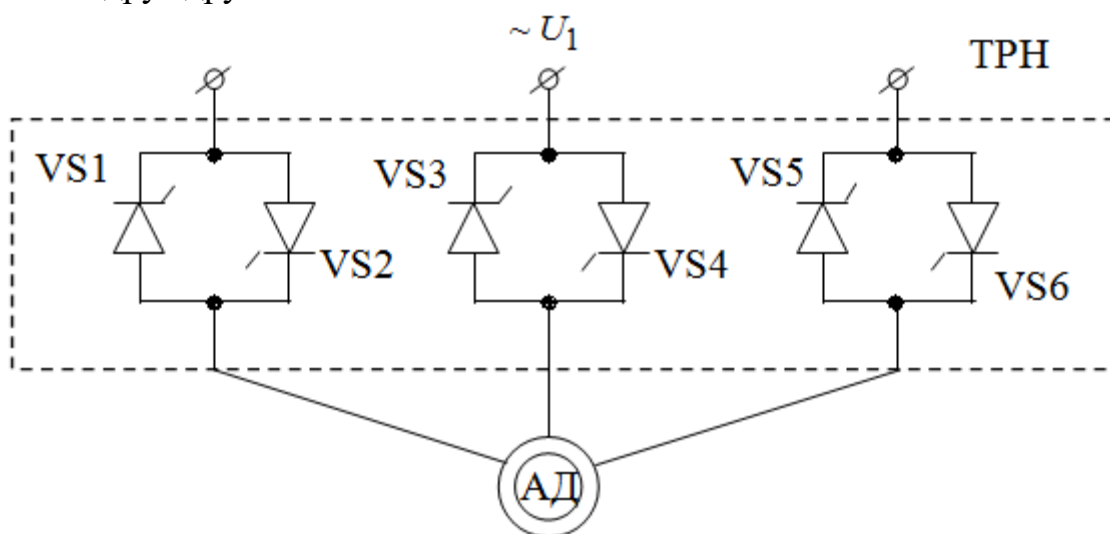


Рис.1.9. Силовая часть схемы трехфазного ТРН

Изменяя  $\alpha$  от нуля до  $\pi$  можно регулировать напряжение на двигателе от полного напряжения сети до нуля.

На рис. 1.10 приведены механические характеристики АД, построенные при напряжениях  $1; 0,8; 0,6$  и  $0,4U_1$ .

Из рис. 1.10 видно, что скорость х.х. ( $n_0$ ) и критическое скольжение  $S_k$  при регулировании не изменяются, но резко снижается величина критического момента  $M_{кр}$  при уменьшении питающего напряжения.

Такой способ оказывается малоприменимым для целей регулирования, т. к. по мере уменьшения напряжения снижается перегрузочная способность и мал диапазон изменения скорости.

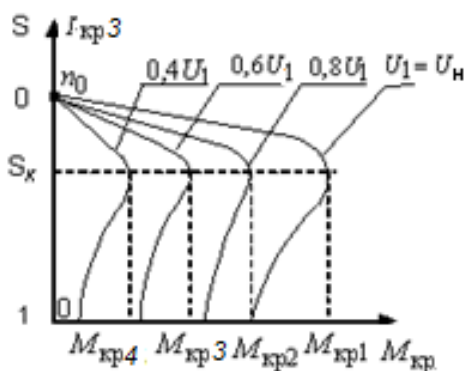


Рис.1.10. Механические характеристики при изменении напряжения двигателя

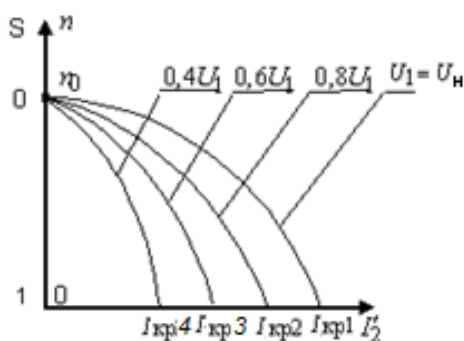


Рис.1.11. Электромеханические характеристики при изменении напряжения

Известно, что работе АД в двигательном режиме соответствует скольжение  $S$  в пределах от 1 до 0 (рис. 1.10), причем рабочим режимом является диапазон скоростей, при котором скольжение не превышает  $S_k$ . В диапазоне скольжений от  $S_k$  до 1 потери в роторе двигателя существенно возрастают, поэтому этот участок механической характеристики двигатель проходит только во время пуска.

Для электропривода с асинхронным короткозамкнутым двигателем во всех режимах работы характеристики могут быть рассчитаны приближенно, при известных технических данных электрической машины.

Электромеханическая характеристика  $n = f(I_2')$  (рис. 1.11) описывается выражением, полученным из  $\Gamma$ -образной схемы замещения АД:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right) + x_k^2}}, \quad (1.1)$$

где  $I'_2$  – приведенный ток фазы ротора;  $U_1$  – напряжение фазы статора;  $R'_1$  – активное сопротивление фазы статора;  $R'_2$  – приведенное активное сопротивление фазы ротора;  $x_k = x_1 + x'_2$  – индуктивное сопротивление к.з. фазы двигателя ( $x_1, x'_2$  – индуктивные сопротивления фазы статора и приведенное фазы ротора);  $S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}$  – скольжение двигателя;  $\omega_0(n_0)$  – синхронная скорость вращения.

Выражение для механической характеристики получают из баланса мощности в цепи ротора.

Потери мощности в цепи ротора  $\Delta P_2$ , выраженные через механические координаты АД, представляют собой разность электромагнитной мощности  $P_{эм} = M \cdot \omega_0$  и полезной мощности  $P_2 = M \cdot \omega$ , т.е.

$$\Delta P_2 = P_{эм} - P_2 = M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot \omega_0 \cdot S. \quad (1.2)$$

Потери, выраженные через электрические величины, определяются как

$$\Delta P_2 = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R'_2. \quad (1.3)$$

Приравняв потери по 1.2 и 1.3, приходим к выражению:

$$M = \frac{3 \cdot I_2'^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S}. \quad (1.4)$$

Замена в (1.4) тока  $I'_2$  его выражением по (1.1) приводит к следующей формуле:

$$M = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[ \left( \frac{R_1 + R'_2}{S} \right)^2 + x_k^2 \right]}.$$

### 1.7. Принципиальная электрическая схема стенда (рис. 1.1)

Источник GA – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока GB используется для питания регулируемым напряжением обмоток машины постоянного тока D2 с параллельным возбуждением, работающей в режиме тормоза.

Преобразователь угловых перемещений DD генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения IB электромашинного агрегата.

Тиристорный преобразователь/регулятор ТР служит для получения регулируемого трехфазного напряжения для питания двигателя D1.

Машина (асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором) получает питание от тиристорного преобразователя/регулятора ТР через трехполосный выключатель QA.

Измеритель мощностей IP используется для измерения активной мощности в фазе «А» исследуемого двигателя D1.

С помощью мультиметра блока IB контролируется ток фазы «А» двигателя D1.

Датчики тока и напряжения блока BA гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормируют сигналы о токе фазы «А», напряжении фазы «А» и напряжении фазы «В» исследуемого двигателя D1.

Коннектор КК выполняет функцию связующего звена между компьютером IBM и блоком измерительных трансформаторов BA.

Компьютер IBM используется в режиме информационно-измерительной системы.

### **1.8. Программа экспериментов**

Порядок экспериментального исследования электропривода:

- проверка работоспособности стенда;
- снятие характеристик  $\omega = f(I)$ ,  $\omega = f(M)$  при минимальном угле управления тиристорами  $\alpha$  ;
- снятие характеристик  $\omega = f(I)$ ,  $\omega = f(M)$  изменением напряжения статора;
- снятие зависимости  $\omega = f(U_1)$ ;
- определение координат и параметров электропривода в переходных режимах (пуск, торможение при работе на холостом ходу и под нагрузкой, сброс – наброс нагрузки).

### **1.9. Проверка работоспособности стенда (рис 1.1)**

Для этого необходимо проделать следующее:

- Убедиться, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (рис. 1.2).
- Соединить гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника GA.
- Подключить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 1.1).

- Переключатели режима работы источника GB и выключателя QA установить в положение «РУЧН.».
- Регулировочные рукоятки источника GB и преобразователя/регулятора TP повернуть в левое крайнее положение.
- Установить переключателем в блоке ТТ номинальное вторичное фазное напряжение трансформаторов 133 В.
- Установить мультиметры на соответствующие пределы измерений токов и напряжений.
- Включить источник GA. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- Включить выключатели «СЕТЬ» блоков, используемых в эксперименте.
- Нажать кнопку «РЕГУЛЯТОР 3Ф НАПРЯЖЕНИЯ» на лицевой панели преобразователя TP и удерживать ее до тех пор, пока не загорится расположенный рядом с ней светодиод.
- Вращая регулировочную рукоятку преобразователя TP, установить его угол управления равным 0 град.
- Осуществить пуск двигателя D1 нажатием соответствующей кнопки выключателя QA.

## **1.10. Исследование статических характеристик асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения**

### **1.10.1. Снятие характеристик $\omega = f(I)$ и $\omega = f(M)$ при минимальном угле управления тиристорами $\alpha$**

Характеристики  $\omega = f(I)$  и  $\omega = f(M)$  снимать при номинальных параметрах системы электропривода.

Подготовить стенд к работе по пункту 1.9.

- Частоту вращения  $n$  [мин<sup>-1</sup>] двигателя D1 измерять с помощью указателя IV.
- Активную  $P$  [Вт] и реактивную  $Q$  [Вар] мощности, потребляемые двигателем D1, определять с помощью измерителя IP.
- Ток статора ( $I_1$ ) двигателя D1 измерять мультиметром блока BM.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» источника GB.
- Вращая регулировочную рукоятку источника GB, изменять момент на валу исследуемого двигателя D1 и заносить значения тока  $I_1$  его статорной обмотки, активной мощности  $P$  и частоты вращения  $n$  в табл. 1.3.

Таблица 1.3

$I_1, \text{А}$									
$P, \text{Вт}$									
$n, \text{мин}^{-1}$									

– По завершении эксперимента сначала у источника GB, а затем у преобразователя TP повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение и нажать кнопки «ОТКЛ.». Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков. Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя.

– Используя данные табл. 1.3, вычислить значения угловой скорости  $\omega$  по выражению:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (1.5)$$

и электромагнитного момента  $M_1$  двигателя по формуле:

$$M_1 = \frac{3P - 3I_1^2 \cdot R_1}{\omega_0}, \quad (1.6)$$

где  $P$  – активная мощность, потребляемая фазой двигателя, Вт;  $R_1$  – активное сопротивление фазы статорной обмотки двигателя, Ом ( $R_1 = 21$  Ом);  $I_1$  – фазный ток двигателя, А;  $\omega_0$  – угловая частота вращения магнитного поля двигателя ( $\omega_0 = 157 \text{ с}^{-1}$ ).

Полученные результаты занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

$M_1, \text{Н} \cdot \text{м}$									
$\omega, \text{с}^{-1}$									

Привести пример расчета.

– По данным табл. 1.3 и 1.4 построить электромеханическую  $\omega = f(I_1)$  и механическую  $\omega = f(M_1)$  характеристики двигателя D1.

### 1.10.2. Снятие характеристик при пониженном напряжении питания $U_1$ якоря двигателя D1

Характеристики  $\omega = f(I)$  и  $\omega = f(M)$  снимать при различном напряжении питания  $U_1$  двигателя D1, устанавливаемого вращением регулировочной рукоятки преобразователя TP, т. е. изменением угла регулирования  $\alpha$ .

Подготовить стенд к работе по пункту 1.9.

– Частоту вращения  $n$  [ $\text{мин}^{-1}$ ] двигателя D1 измерять с помощью указателя IB.

– Активную  $P$  [Вт] и реактивную  $Q$  [Вар] мощности, потребляемые двигателем D1, определять с помощью измерителя IP.

- Ток статора ( $I_1$ ) двигателя D1 измерять мультиметром блока ВМ.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» источника GB.
- Задаваясь углом регулирования  $\alpha$  преобразователя TP в диапазоне 0 ... 100 град., снять три-четыре искусственные характеристики  $\omega = f(I_1)$  и  $\omega = f(M_1)$  системы.

– Вращая регулировочную рукоятку источника GB, изменять момент на валу исследуемого двигателя D1 и заносить значения тока  $I_1$  его статорной обмотки, активной мощности  $P$  и частоты вращения  $n$  в таблицу, аналогичную табл. 1.3.

– По завершении эксперимента у источника GB, а затем у преобразователя TP повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение и нажать кнопки «ОТКЛ.». Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков. Отключить источник GA нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя.

– Используя данные полученных таблиц, вычислить значение угловой скорости  $\omega$  по выражению (1.5) и электромагнитного момента  $M_1$  двигателя по формуле (1.6). Полученные результаты занести в таблицы, аналогичные табл. 1.4.

Привести пример расчета.

– По данным таблиц, аналогичных табл. 1.4, построить электромеханическую  $\omega = f(I_1)$  и механическую  $\omega = f(M_1)$  характеристики двигателя D1.

### 1.10.3. Снятие регулировочной характеристики

Снятие регулировочной характеристики  $\omega = f(U_1)$  осуществлять в нижеприведенной последовательности.

Подготовить стенд к работе по пункту 1.9.

- Нажать кнопку «ВКЛ.» источника GB.
- Вращением регулировочной рукоятки источника GB установить ток на его выходе «ЯКОРЬ» равным 0,5 А.

– Вращая регулировочную рукоятку, изменять угол регулирования  $\alpha$  преобразователя TP в диапазоне 0..100 град. и заносить показания вольтметра V блока ВМ и указателя IB в табл. 1.5.

Таблица 1.5

$U_1, В$									
$n, \text{мин}^{-1}$									

– По завершении эксперимента повернуть регулировочные рукоятки источника GB, преобразователя TP в крайнее левое положение и

нажать кнопки «ОТКЛ.». Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» задействованных в эксперименте блоков. Отключить выключатель QA нажатием на кнопку «ОТКЛ.» и источник СА нажатием на кнопку – гриб и последующим поворотом в крайнее левое положение ключа выключателя.

– Используя данные табл. 1.5, вычислить значения скорости  $\omega$  двигателя по выражению (1.5) и занести полученные результаты в табл. 1.6.

Таблица 1.6

$U_1, \text{В}$									
$\omega, \text{с}^{-1}$									

Привести пример расчета.

– По данным таблицы 1.6 построить зависимость  $\omega = f(U_1)$ .


### 1.11. Определение координат и параметров электропривода в переходных режимах (пуск, торможение, сброс–наброс нагрузки)

#### 1.11.1. Рекомендации по использованию программы «Регистратор режимных параметров машины переменного тока»

– Для определения координат точек на графиках использовать отображаемые на экране текущие координаты указателя мыши.

– Масштабирование производить путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещением манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществлять обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

– Графики относительно осей координат двигать путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

– Очищать область построения механической характеристики нажатием на соответствующую виртуальную кнопку  или клавишу «Пробел».

#### 1.11.2. Исследование характеристик $\omega = f(t)$ , $I_1 = f(t)$ , $U_1 = f(t)$ переходных процессов системы

Снятие переходных процессов пуска, торможения при работе на холостом ходу и под нагрузкой, сброса-наброса нагрузки проводить по заданию преподавателя.

– Привести в рабочее состояние персональный компьютер IBM. Запустить программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».



– Включить выключатели «СЕТЬ» у всех используемых в эксперименте блоков.

– Включить источник GA. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.

– Нажать кнопку «РЕГУЛЯТОР 3Ф НАПРЯЖЕНИЯ» на лицевой панели преобразователя TP и удерживать ее до тех пор, пока не загорится расположенный рядом с ней светодиод.

– Вращая регулировочную рукоятку преобразователя TP, установить его угол управления равным 0 град.

– Осуществить пуск двигателя D1 включением выключателя QA.


– Нажать кнопку «ВКЛ.» источника GB.

– Вращением регулировочной рукоятки источника GB установить его выходной ток равным 0,5 А.

– Начать сбор данных, нажав на виртуальную кнопку «Запустить» .

– Организовать интересующий переходный процесс, например, сброс-наброс нагрузки двигателя D1. Для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» и спустя 5 с – кнопку «ВКЛ.» источника GB.

– Наблюдать изменение координат  $\omega = f(t), I_1 = f(t), U_1 = f(t)$  электропривода в реальном времени. При получении характеристик плохо приемлемых для анализа, повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».

– Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить»  и анализировать запомненные зависимости координат и параметров электропривода от времени. Результаты анализа занести в табл. 1.7.

– Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V)). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.

– По завершении эксперимента повернуть регулировочные рукоятки источника GB, преобразователя TP в крайне левое положение и нажать кнопки «ОТКЛ.». Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» задействованных в эксперименте блоков. Отключить выключатель QA нажатием на кнопку «ОТКЛ.» и источник SA нажатием на кнопку – гриб и последующим поворотом в крайнее левое положение ключа выключателя.

Таблица 1.7

№ п.п.	Параметр переходного процесса								Название переходного процесса (пуск, торможение и т. д.)
	$t_{\text{пп}},$ мс	$\omega_{\text{уст}},$ с <sup>-1</sup>	$\omega_{\text{нач}},$ с <sup>-1</sup>	$I_{\text{нач}},$ мА	$I_{\text{уст}},$ мА	$\delta I_{\text{уст}},$ %%	$\delta I_{\text{макс}},$ %%	$I_{\text{макс}},$ мА	
1									
...									
6									

### 1.12. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Электрическая схема соединений стенда с краткими пояснениями.
3. Таблицы опытных данных и характеристики  $\omega = f(I_1)$  для всех опытов на одном графике;  $\omega = f(M_1)$  для всех опытов на другом графике.
4. Показатели регулирования скорости вращения двигателя D1 (диапазон, точность, плавность).
5. Таблица опытных данных и характеристика  $\omega = f(U_1)$ .
6. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I_1 = f(t)$  и напряжения  $U_1 = f(t)$  при пуске, останове и сбросе – набросе нагрузки на соответствующих (естественной и искусственных) характеристиках двигателя D1.
7. Краткие выводы.

### 1.13. Контрольные вопросы

- 1.13.1. Изобразить силовую часть схемы асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения и пояснить работу системы.
- 1.13.2. В каких энергетических режимах может работать система ТРН-АД?
- 1.13.3. Преимущества и недостатки изучаемой системы.
- 1.13.4. В чем состоит принцип экономичности асинхронного электропривода в системе с тиристорным регулятором?
- 1.13.5. Изобразить зависимости  $\omega = f(I_1)$  и  $\omega = f(M_1)$  в системе ТРН-АД и пояснить их.

1.13.6. Способы повышения показателей регулирования параметров изучаемой системы.

1.13.7. Области применения системы ТРН-АД.

1.13.8. Изобразить зависимости переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I_1 = f(t)$  при пуске, остановки, сбросе и набросе нагрузки.

### Список литературы

1. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андриющенко, В.И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

2. Ильинский Н.Ф. Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.

4. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.

5. Москаленко В.В. Электрический привод: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.

6. Электротехника: учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова. – Челябинск: Изд-во Ю-УрГУ, 2005. – 639 с.

## 7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ШАГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### 2.1. Цель работы

Исследование статических и динамических характеристик, режимов работы и показателей шагового двигателя в системе потребления электроэнергии.

### 2.2. Оборудование стенда

Лабораторный стенд состоит из приборного блока, электромеханического агрегата, включающего шаговый двигатель с нагрузочным устройством.

Приборный блок соединяется с электромеханическим агрегатом кабелем. Блок подключается к сети 380 В, 50 Гц трехполюсным автоматическим выключателем, установленным на левой боковой панели.

Дополнительные приборы, необходимые для проведения экспериментов: осциллограф.

Технические данные исследуемого шагового двигателя (ШД), (рис. 2.1):

тип	ШД – 5Д1М;
максимальная скорость	$n_m = 4 \text{ об/с}$ ;
основной шаг	$\alpha_{ш} = 1,5^\circ$ ;
номинальная мощность	$P_H = 36 \text{ Вт}$ ;
номинальное напряжение	$U_H = 48 \text{ В}$ ;
максимальный синхронизирующий момент	
при 100 Гц	0,3 Н·м;
при $n_m$	0,2 Н·м;
момент инерции	$J = 10^{-5} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;
номинальный ток фазы	$I_H = 3,0 \text{ А}$ ;
сопротивление фазы	$R_l = 3,0 \text{ Ом}$ ;
число фаз	$m = 6$ ;
индуктивность фазы	$L_l = 2,1 \text{ мГн}$ ;
число зубцов ротора	$Z_p = 20$ .

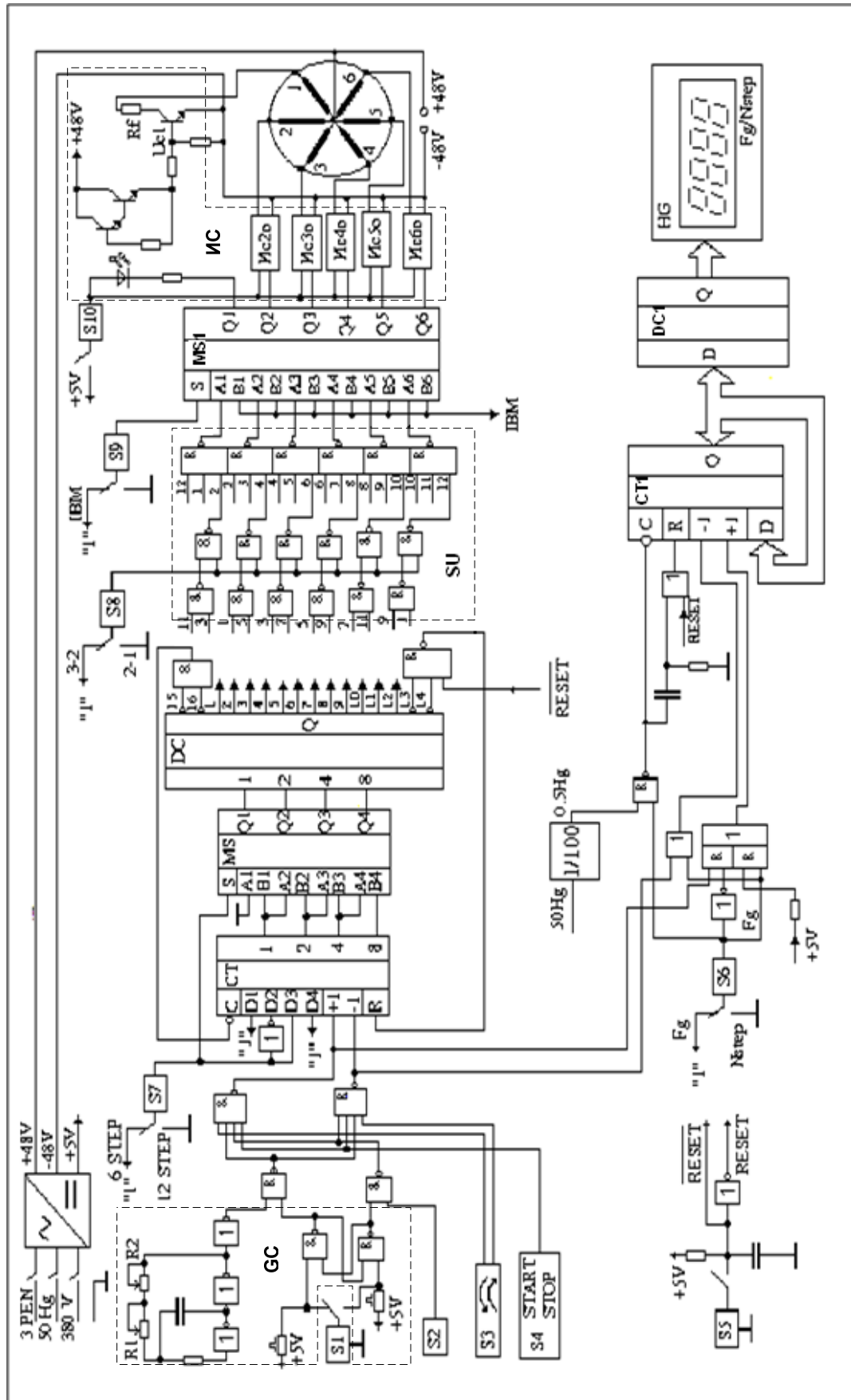


Рис. 2.1. Принципиальная электрическая схема управления шагового электропривода

### **Нагрузочное устройство:**

Выполняет функцию нагрузки и измеряет вращающий момент на валу ШД. Состоит из фрикционного тормоза с грузом, шкива и 2-х динамометров.

Если измерение производят по шкале одного динамометра, то вращающий момент

$$M = 9,81(G - F) \cdot R \text{ [Нм]},$$

где  $G$  – вес груза, кгс;

$F$  – показания динамометра, кгс;

$R$  – радиус шкива, м.

При измерении по шкале двух динамометров

$$M = 9,81(F_1 - F_2) \cdot R \text{ [Нм]},$$

где  $F_1, F_2$  – показания динамометров, кгс.

### **2.3. Перевод обозначений элементов оборудования и принципиальной электрической схемы на панели приборного блока (рис. 2.1)**

FREQUENCY	Частота
STEP	Шаг
APPROXIMATELY	Приблизленно
PRECISELY	Точно
START	Пуск
STOP	Останов
RESET	Сброс
HG	Индикатор частоты или числа импульсов

### **2.4. Общие сведения**

#### **2.4.1. История создания и развития шагового электропривода**

Первые упоминания о ШД можно найти в научно-технической литературе, опубликованной в Великобритании сразу после I мировой войны. Там же в 1919 году была запатентована его конструкция. Важно отметить, что существующие ныне шаговые двигатели конструктивно мало отличаются от их предшественников.

Одними из первых электрических машин, предложенных в XIX в., были шаговые двигатели, однако до 40—50 гг. XX в. их применяли лишь в некоторых системах синхронной связи. Подлинную революцию в создании управляемых приводов, сконструированных на базе ШД, вызвала эра цифрового управления, начавшаяся с 1957 года, когда в американ-

ском журнале был опубликован отчет о применении шаговых двигателей в трех координатном электроприводе фрезерного станка. Коммутаторы двигателей реализовывались на базе ламповых тиратронов, а процесс обработки деталей мог производиться считыванием импульсов с магнитной ленты. По сути, это первый станок с числовым программным управлением (ЧПУ). Во всех развитых странах с этого времени началось широкое использование ШД в области металлообработки. Развитие электронной и полупроводниковой техники позволило создать эффективные схемы управления шаговыми двигателями, что предопределило использование их в различных системах автоматики.

В настоящее время разработаны разнообразные конструкции активных и реактивных шаговых двигателей. Продолжается разработка новых двигателей, отличающихся повышенным быстродействием, статической и динамической точностью, мощностью, экономическими показателями и др.

Системы с ШД находят все большее применение в различных отраслях промышленности.

#### 2.4.2. Принцип работы

Конструкция простейшего трехфазного ШД и временные диаграммы токов обмоток возбуждения представлены на рис. 2.2.

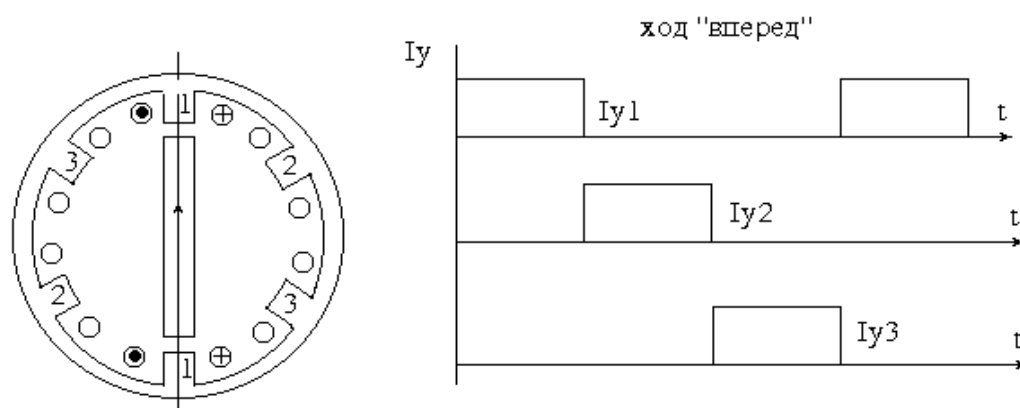


Рис. 2.2. Симметричная коммутация трехфазного ШД

Рассмотрим работу трехфазного шагового двигателя с реактивным ротором. Поочередно на три фазовые обмотки двигателя 1-3 подаются последовательно импульсы тока  $I_{y1} - I_{y3}$  (такая коммутация называется симметричной). В соответствии с формулой

$$\alpha_{ш} = \frac{2\pi}{m \cdot p},$$

где  $p$  – число пар полюсов (у двигателя с реактивным ротором  $p = Z_p$ );  $Z_p$  – число зубцов ротора;  $m$  – число фаз или так называемых тактов управления в одном цикле.

Можно определить шаг такого ШД

$$\alpha_{ш} = 360^\circ / 1 \cdot 2 \cdot 3 = 60^\circ.$$

Погрешность отработки одного шага определяется конструкцией и не может быть больше величины, характерной для данного шагового двигателя. Точность отработки большой серии импульсов не зависит от числа импульсов и находится в пределах точности отработки единичного угла поворота. Это позволяет создавать системы автоматического регулирования дискретного типа без обратных связей, что уменьшает количество элементов и обеспечивает надежность, удешевляет систему. Структурная схема электропривода (ЭП) с шаговым двигателем показана на рис. 2.3.

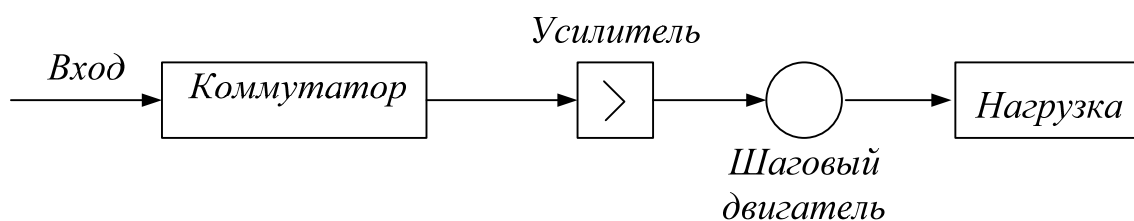


Рис. 2.3. Структурная схема ЭП с шаговым двигателем

При изменении последовательности подачи импульсов на обмотки возбуждения можно реверсировать вал двигателя, т. е. заставить вращаться его в обратном направлении. Если выполнить ротор такого ШД активным, то при обесточенных фазных обмотках ротор будет фиксироваться силами магнитного притяжения в положении последнего шага, т. е. в таких двигателях реализуется так называемая нулевая защита – обеспечивается наличие тормозного момента (5-10 % от максимального момента двигателя) при обесточенных обмотках. Коммутацию обмоток при симметричном управлении можно выполнить и парной, тогда одновременно оказываются включенными по две обмотки возбуждения.

Для двукратного уменьшения шага двигателя, можно реализовать несимметричную коммутацию обмоток возбуждения – с поочередным включением одной из двух обмоток возбуждения (1-2) в соответствии с временной диаграммой, представленной на рис. 2.4. Несимметричную коммутацию можно организовать и другим сочетанием коммутируемых обмоток, например, включением поочередно 2 и 3 обмоток (несимметричная коммутация 2-3).

Системы автоматического управления с шаговыми двигателями можно разделить на две группы:



– Системы, в которых двигатель выполняет функцию преобразования унитарного кода в фазомодулированный сигнал или другой вид информации. К этим системам относятся устройства, в которых двигатель вращает задающий сельсин, поворотный или дифференциальный трансформатор; применение шаговых двигателей в качестве фильтра высших гармоник и др.

– Системы, в которых двигатель использован для привода исполнительного механизма непосредственно или через усилитель момента. К этим системам относятся приводы подач станков, старт-стопных лентопротяжных механизмов, индексирующие устройства счетчиков, управление затворами и задвижками, синхронизация вращения валов с регулируемым по программе передаточным отношением и т. д.

Необходимо отметить, что когда количество коммутируемых обмоток больше одной, увеличивается магнитодвижущая сила (МДС) полюсов и примерно в полтора раза возрастает вращающий момент на валу ШД. В двигателях, реализованных по аналогичному принципу, с помощью увеличения числа обмоток и полюсов ротора можно уменьшить единичный шаг обработки до  $15^\circ$ . Дальнейшее уменьшение шага сопряжено со значительными технологическими трудностями по размещению в ограниченном объеме большого количества обмоток. Поэтому двигатели с шагом от единиц до долей градуса выполняются как редукторные, т. е. с зубчатыми полюсами и ротором из ферромагнитного материала.

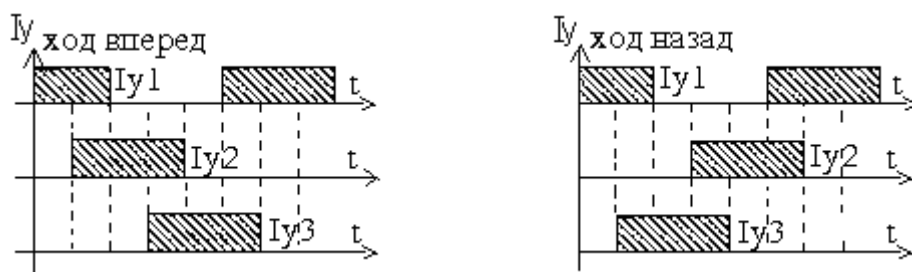


Рис. 2.4. Несимметричная (1-2) коммутация трехфазного ШД

Такие двигатели называются параметрическими и они широко используются в настоящее время. На рис. 2.5 представлена электромагнитная система четырехфазного параметрического ШД. Как видно, из-за сдвига смежных полюсов относительно зубцов ротора на  $1/4$  зубцового деления ротор будет перемещаться с единичным шагом  $3^\circ$  (равным  $1/4$  зубцового деления ротора) при симметричной коммутации 1-2-3-4. Единичный шаг можно уменьшить вдвое использованием несимметрич-

ной коммутации (1-2), последовательно подключая обмотки возбуждения 1,1-2,2,2-3,3,3-4, 4,4-1 и т. д.

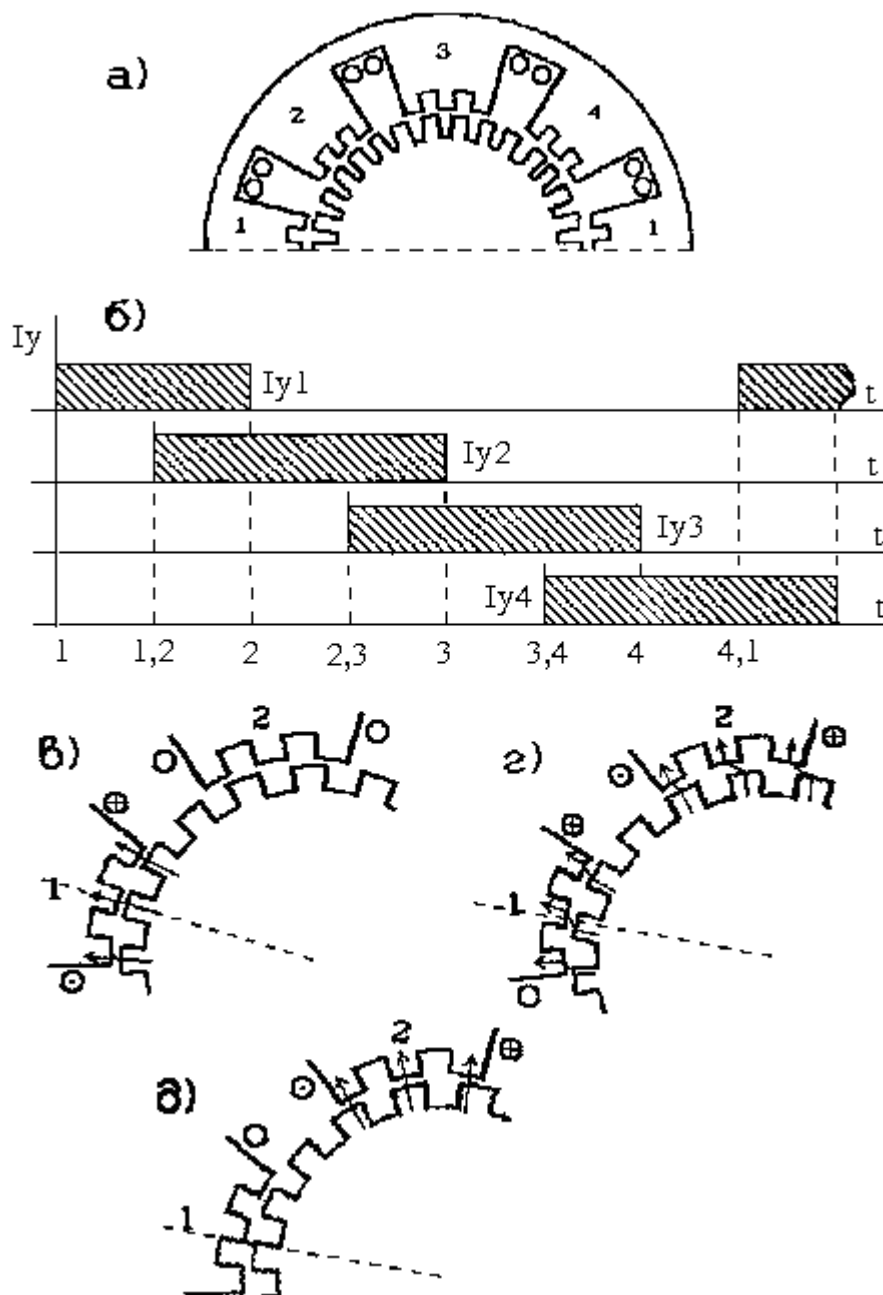


Рис. 2.5. Четырехфазный параметрический редуктор II с реактивным ротором

Такая последовательность коммутации обмоток называется восьмитактной и ей соответствует единичный шаг  $1.5^\circ$ . Существует большое количество ШД, единичный шаг которых больше  $40^\circ$ . Такие большие шаги, однако, часто не смущают проектировщиков, т. к. не являются препятствием для применения двигателей в случае последующей редукции скорости вращения различными типами редукторов.

Преимущества привода с шаговым двигателем по сравнению со следящей системой, выполняющей те же функции:

– Повышение надежности устройства, обусловленное уменьшением количества элементов системы, так как отсутствуют датчики обратной связи, усилитель датчика, электронные узлы индицирования рас-согласования (реверсивный счетчик), тахогенератор.

– Удешевление устройства, обусловленное уменьшением количества элементов.

– Упрощение синтеза систем автоматического управления, характеризующееся уменьшением количества связей между узлами.

– Увеличение точности дискретного перемещения, обусловленное фиксацией ротора ШД при остановке двигателя.

### **2.4.3. Классификация шаговых двигателей**

В настоящее время используются разные типы электрических машин, шаговые двигатели можно разделить на несколько типов в соответствии с их структурой и принципами работы.

#### ***1. Реактивные двигатели***

Это трехфазный двигатель, статор которого имеет шесть зубцов. Каждые два зубца статора, отстоящие на 180 градусов друг от друга, принадлежат одной фазе; катушки противоположных зубцов соединены последовательно или параллельно. Ротор имеет четыре зубца. Статор и ротор обычно изготавливают из шихтованного магнитомягкого материала, но часто используют и массивные роторы.

Реактивные двигатели разделяются на многопакетные и однопакетные типы ШД. У однопакетных особенностью является то, что все фазы выполнены в виде одного слоя, т. е. находятся в одной плоскости. У многопакетных (каскадных) моделей каждый пакет соответствует одной фазе, а ротор и статор имеют одинаковое количество зубцов.

#### ***2. Шаговые двигатели с постоянными магнитами***

Цилиндрический постоянный магнит используется в качестве ротора, а статор имеет 4 зубца, вокруг каждого из которых имеется обмотка.

#### ***3. Гибридные шаговые двигатели***

Этим типом ШД для ротора используется постоянный магнит. Термин «гибридный» происходит от того, что двигатель работает, используя принципы как реактивного двигателя, так и двигателя с постоянными магнитами. Структура статора очень близка к структуре статора реактивного шагового двигателя, но соединение обмоток отличается. А ротор в своем теле располагает цилиндрический постоянный магнит, который намагничен вдоль оси ШД для создания аксиального магнитного потока.

#### **4. Гибридные шаговые двигатели с постоянным магнитом в статоре**

В этом двигателе как магнит, так и ток в обмотках создают одноименнополюсное магнитное поле. Зубцы статора в двух пакетах смещены относительно друг друга на четверть зубцового деления, а зубцы четырех пакетов ротора расположены на одной линии.

#### **5. Двигатель с постоянными магнитами когтеобразного типа**

Статор штампуют из круглой металлической полосы и вытягивают в форме колокола. Когтеобразные полюсы статора выгибаются внутри в форме полюсов-выступов. Пакет статора образуется соединением двух выгнутых таким образом оболочек, при этом когтеобразные полюсы перемежаются, а обмотка проходит с их внутренней стороны.

#### **6. Шаговый двигатель с внешним ротором**

Пакеты статора закреплены на валу. Внешний ротор соединен с валом двумя подшипниками и свободно вращается. Этот двигатель сконструирован для системы прогона бумаги.

#### **7. Линейный шаговый двигатель**

У реактивных двигателей такого типа сердечники как статора, так и ползуна (ротора) набраны из пластин электротехнической стали. А у активных двигателей ползун состоит из постоянного магнита и электромагнитов.

### **2.4.4. Режимы работы**

Как правило, у ШД выделяются следующие режимы работы:

- статический (протекание тока по одной из фазных обмоток);
- квазистатический (отработка единичных шагов);
- установившийся (постоянная частота управляющих импульсов);
- переходный (пуск из неподвижного состояния, торможение, реверс).

#### **2.4.4.1. Статические характеристики**

Как известно характеристики, относящиеся к заторможенному двигателю, являются статическими характеристиками.

$M-\Theta$  – характеристика. Шаговый двигатель фиксируют неподвижно в положении равновесия при возбуждающем токе, поданном по определенной схеме возбуждения (одно- или двухфазной). Если теперь к ротору приложить внешний момент, он вызовет угловое смещение. Отношение внешнего момента  $M$  к угловому смещению  $\Theta$  приведено на рис. 2.6. Эта кривая называется статической моментной характеристикой  $M-\Theta$ . Максимальный статический момент является удерживающим

моментом, он соответствует  $\Theta = \Theta_M$  на рис. 2.6. Если угловое смещение  $\Theta$  больше, чем  $\Theta_M$ , то статический момент действует не в обратном направлении, а в направлении следующего положения равновесия. Строго удерживающий момент определяется как максимальный статический момент, который может быть приложен к валу возбужденного двигателя без последующего движения. Угол, при котором достигается удерживающий момент, не всегда отличается от положения равновесия на один угол шага.

*M-I характеристика.* Удерживающий момент  $M_{уд}$  возрастает с ростом тока, и эта зависимость называется *M-I* характеристикой. На рис. 2.7 изображены *M-I* характеристики типичного гибридного и реактивного ШД с одним и тем же углом шага  $1,8^\circ$ . Максимальный статический момент, существующий в гибридном двигателе с невозбужденной обмоткой, является фиксирующим моментом.

*Предельная механическая характеристика.* В качестве основного фрагмента установившегося режима можно исследовать предельную механическую характеристику – зависимость допустимого момента сопротивления от частоты управляющих импульсов. Эта характеристика (рис.2.8) имеет убывающий характер, но с локальными перегибами.

С ростом частоты увеличивается индуктивное сопротивление обмотки возбуждения, происходит запаздывание в нарастании тока и при предельной частоте  $f_{пр}$  двигатель выпадает из синхронизма (теряет шаг).

Основное требование к ШД в переходных режимах (пуск, торможение, реверс, переход с одной частоты на другую) – это сохранение синхронизации (отсутствие потери шага) при изменении частоты управляющих импульсов.

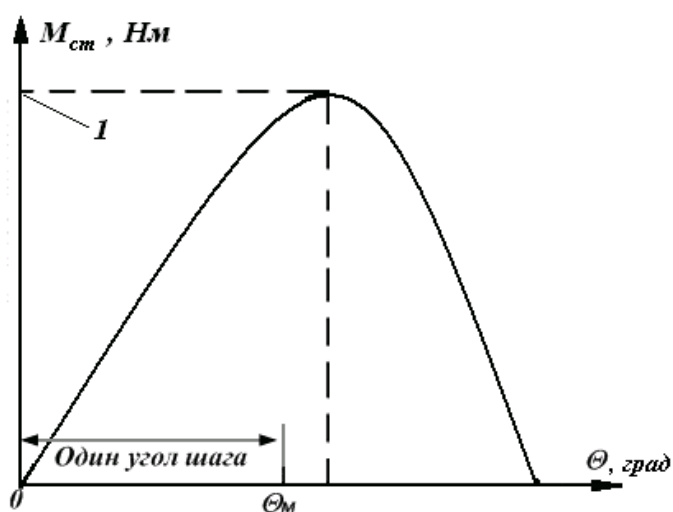


Рис. 2.6. *M-Θ* характеристика: 1 – удерживающий момент

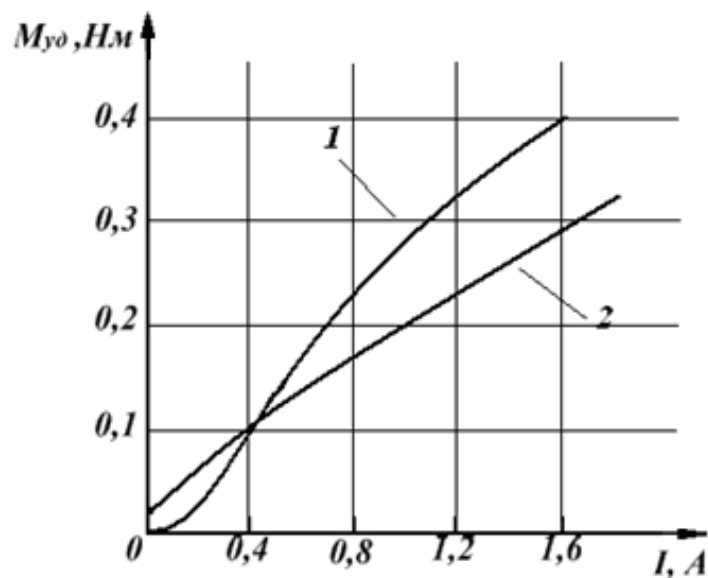


Рис. 2.7. Примеры  $M$ - $I$  характеристик: 1 – четырехфазный реактивный ШД с углом шага  $1,8^\circ$ ; 2 – четырехфазный гибридный ШД с углом шага  $1,8^\circ$

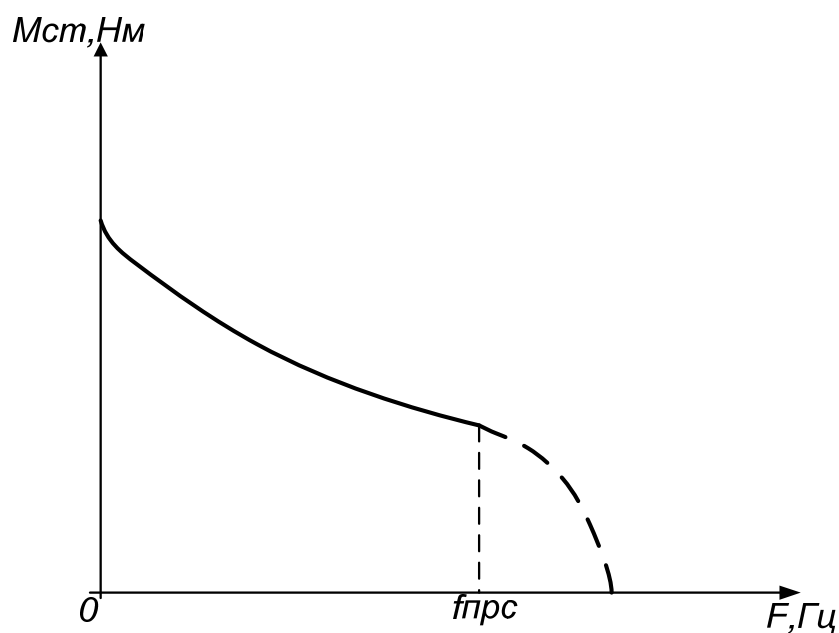


Рис. 2.8. Предельная механическая характеристика

#### 2.4.4.2. Динамические характеристики

Динамические характеристики – это характеристики двигателя во время движения.

Переходной режим работы может быть проиллюстрирован предельной динамической характеристикой приемистости (рис. 2.9) для двух моментов инерции установки, приведенных к валу двигателя.

Частота приемистости  $f_{прс}$  управляющих импульсов – это максимальная частота, при которой возможен пуск без выпадения из синхронизма. У современных ШД  $f_{прс} = 100 \div 1000$  Гц при пуске, при реверсе частота приемистости снижается до  $(0,2 \div 0,5)f_{прс}$ .

Эта характеристика существенно зависит от приложенного к валу двигателя момента инерции, с увеличением которого частота приемистости при постоянном моменте сопротивления падает.

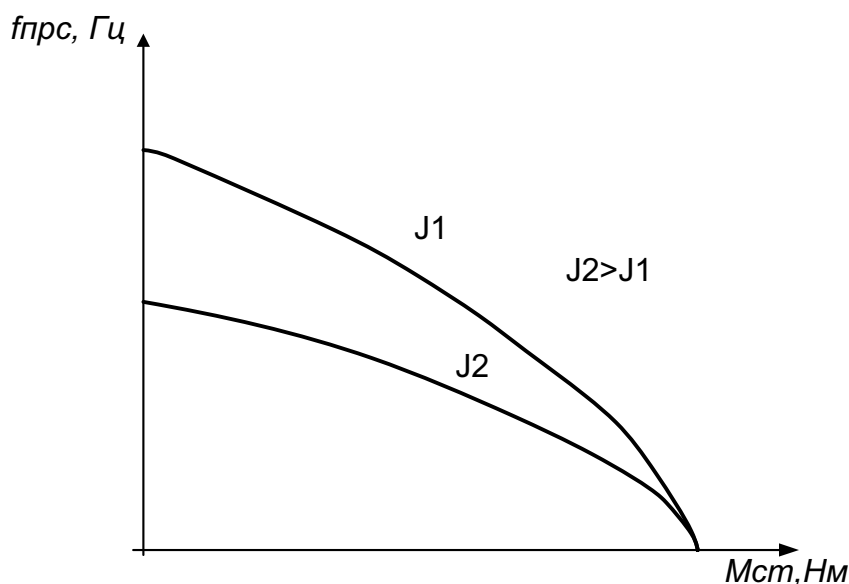


Рис. 2.9 . Предельные динамические характеристики приемистости для двух значений моментов инерции, приведенных к валу ШД

#### 2.4.5. Область применения

В последние годы появилось много новых устройств числового программного управления дискретного действия с применением шаговых (импульсных) двигателей. Это объясняется тем, что указанные двигатели позволяют преобразовать управляющий импульс в фиксированный угол поворота вала или фиксированное линейное перемещение без датчика обратной связи. Последнее обстоятельство существенно упрощает систему управления механизмом и увеличивает ее надежность, так как сокращается количество электронных элементов.

Развитие систем числового программного управления и телеметрических систем создало широкие возможности для применения шаговых двигателей, которые выполняют самые различные функции в системах:

– Использование шаговых двигателей в периферийных устройствах вычислительных машин (в принтерах прогон бумаги и перемещение ползуна, в графопостроителе, в системе управления флоппи-дисками, CD-ROM, DVD-ROM и жесткими дисками).

– Применение ШД в станках с числовым программным управлением (двухкоординатные и вращающиеся столы, фрезерные станки, чертежные автоматы, перфоратор и считыватель ленты, устройство контроля профилей копировальных станков).

– Используются также в часах, в телефаксах, устройствах печати маркировки продукции, изготовления интегральных схем, космических летающих аппаратах, для регулирования ядерных энергетических реакторов.

Развитие средств автоматики является необходимым условием совершенствования и создания новых автоматизированных систем.

## **2.5. Принципиальная электрическая схема стенда**

На данном стенде установлен шаговый двигатель, выполненный на основе синхронного реактивного редукторного шестифазного микродвигателя. Обмотка возбуждения, соединенная по схеме шестифазной звезды с нулевым проводом, располагается на полюсных выступях статора с гребенчатой зубцовой зоной. Ротор из ферромагнитного материала также имеет редукторное исполнение с 20-ью зубцами.

Основные элементы системы управления логического блока ШД:

- GC – генератор прямоугольных импульсов;
- CT – счетчик логического блока;
- MS – мультиплексор логического блока;
- DC – дешифратор логического блока;
- SU – шифратор униполярный;
- MS1 – мультиплексор управляющего устройства;
- HG – семисегментный индикатор;
- DC1 – дешифратор индикатора;
- CT1 – счетчик индикатора;
- ИС – усилители мощности.

### **2.5.1. Логический блок системы управления**

Логический блок (ЛБ) – это логическая схема, управляющая последовательностью включения обмоток ШД. Как правило, ЛБ состоит из регистра сдвига и основных базовых логических схем И-НЕ, ИЛИ-НЕ, НЕ и т. д. Часто в логический блок входят счетчики, дешифраторы, триггеры и т. д., т. е. практически большинство базовых устройств цифровой схемотехники. В последнее время ЛБ выполняется в виде одной микросхемы.

Логический блок должен реализовывать в каждом конкретном случае требуемую таблицу истинности (табл. 2.1). Например, для двух-



фазного (симметричного) управления четырехфазным шаговым двигателем может быть предложена схема на рис. 2.10.

Необходимо подчеркнуть, что эта схема далеко не единственно возможная. С выхода ЛБ импульсы подаются на базу силового транзистора напрямую, если это возможно, или после усиления.

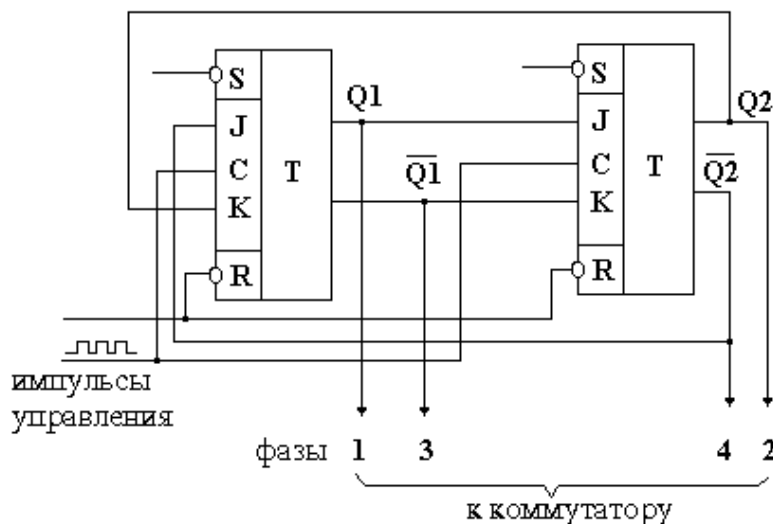


Рис. 2.10. Вариант схемотехники ЛБ

Таблица 2.1

	R	1	2	3	4	5	6
ФАЗА1	0	1	1	0	0	1	1
ФАЗА2	0	0	1	1	0	0	1
ФАЗА3	1	0	0	1	1	0	0
ФАЗА4	1	1	0	0	1	1	0

Для усиления отклика ШД на управляющие импульсы и повышения частоты приемистости, осуществляют форсировку напряжения, питающего обмотку возбуждения

$$U_p = a \cdot U_n,$$

где  $a$  – коэффициент форсировки;

$U_n$  – номинальное напряжение обмотки возбуждения.

Для того, чтобы ток обмотки двигателя не превышал своего номинального значения вводят дополнительное форсировочное сопротивление  $R_{\phi}$ . С целью, чтобы и процесс затухания тока в обмотке возбуждения также ускорился, часто вводят сопротивление  $R_o$  в цепь диода  $VD_o$ , защищающего цепь от перенапряжений при отключении силового транзистора (рис. 2.11). Существуют и другие способы форсировок.

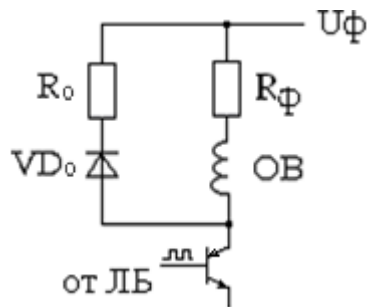


Рис. 2.11. Схема форсировки

### 2.5.2. Схема управления шаговым двигателем

Функциональная схема логического блока управления шаговым двигателем приведена на рис. 2.1.

Назначение переключателей на панели приборного блока:

- S1 – переключатель режима подачи импульсов от генератора или устройства одиночного сигнала;
- S2 – кнопка подачи одиночного импульса;
- S3 – переключатель направления вращения вала ШД;
- S4 – переключатель пуска или принудительного останова двигателя;
- S5 – кнопка начального сброса;
- S6 – переключатель режима индикации (счет частоты или импульсов);
- S7 – переключатель режима коммутации обмотки возбуждения шагового двигателя (6-тактный или 12-тактный);
- S8 – переключатель режима коммутации обмотки возбуждения двигателя по фазам (алгоритм управления);
- S9 – переключатель вида задающего (управляющего) устройства – логический блок или компьютер;
- S10 – переключатель блокировки коммутации фаз двигателя.

Периодически повторяющиеся управляющие импульсы напряжения прямоугольной формы вырабатываются генератором частоты GC и через асинхронные RS-триггеры, исключающие потерю импульсов вследствие дребезга контактов переключателей S1÷S4, поступают на прямой «+1» (ШД вращается по часовой стрелке) или инверсный «–1» – (двигатель вращается против часовой стрелки) входы счетчика СТ в зависимости от положения переключателя S3 (рис. 2.1). Изменение частоты генератора осуществляется потенциометрами R1 и R2.

Переключатель S1 устанавливает режим импульсов напряжения: периодически повторяющиеся или одиночные, подаваемые нажатием кнопки S2. Переключателем S4 разрешается («START») или блокируется («STOP») прохождение импульсов на вход счетчика СТ.

Кнопкой S5 осуществляется сброс системы управления ШД в исходное состояние.

Реверсивный 4-разрядный счетчик СТ выполнен на основе триггеров (микросхема К155ИЕ7) и подсчитывает количество поступающих на вход импульсов в двоичном коде. Максимальное число импульсов, которое может быть записано в счетчике, равно:  $N_M = 2^n - 1 = 2^4 - 1 = 15$ , где  $n$  – число разрядов.

В исходном состоянии счетчик обнулен. С приходом первого импульса он начинает суммирование (если импульс напряжения от генератора поступает на вход «+1» счетчика) или вычитание (если импульс напряжения поступает на вход «-1» счетчика); в последнем случае в начале счета все разряды счетчика находятся в состоянии «1». На выходе счетчика появляются сигналы, отображающие количество входных сигналов, записанных в двоичном коде. Например, при 10 входных импульсах состояние счетчика будет (табл. 2.2):

$$Q4=1; Q3=0; Q2=1; Q1=0,$$

то есть в двоичном коде записано число

$$1010 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 = 8 + 0 + 2 + 0 = 10.$$

С помощью мультиплексора MS (микросхема К555КП11) и переключателя S7 выбирается 12-тактная или 6-тактная схема управления. Для 6-тактной схемы младший разряд мультиплексора Q1 и тем самым вход «1» дешифратора DC принудительно устанавливается в «0», вследствие чего все четные состояния дешифратора Q2, Q4, Q6, Q8, Q10, Q12 исключаются (табл. 2.4).

Дешифратор DC (микросхема К155ИД3) преобразует 4-разрядный двоичный код выхода MS в код «1 из 16-ти», то есть при каждой комбинации входных в DC сигналов формируется единичный сигнал только на том выходе DC, номер которого соответствует десятичной записи того же числа. Например, если на вход DC подана комбинация сигналов в двоичном коде 1001 (в десятичном коде число 9), то сигнал «1» появится лишь на выходе Q9 дешифратора (табл. 2.3).

Шаговый двигатель работает по 12-тактной или 6-тактной схемам, поэтому для обеспечения этого условия выходы Q13 и Q14 дешифратора через элемент 3И-НЕ (микросхема К155ЛА4) подаются на вход R (сброс) счетчика СТ. С приходом 12-ого импульса (для 12-тактной схемы) и 6-го (для 6-тактной схемы) на выходе Q13 или Q14 дешифратора устанавливается «1» и цикл счета импульсов начинается снова (табл. 2.3).

Таблица состояний (истинности) четырехразрядного счетчика СТ на сложение.

Таблица 2.2

№ импульса	Выходы счетчика			
	Q4(8)	Q3(4)	Q2(2)	Q1(1)
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Выходы Q15, Q16 дешифратора и элемент 2И используются для повторения циклов счета при поступлении импульсов напряжения генератора на вход «-1» СТ (реверс ШД).

В табл. 2.4 показана работа дешифратора при 6-тактной и 12-тактной схемам коммутации обмотки возбуждения двигателя с алгоритмами управления 1–2 и 2–3 (порядок включения фаз и одновременной их работы).

Изменение алгоритма управления можно наблюдать по переключению светодиодов на верхней панели. Каждый светодиод включен в цепь одной фазы ШД и показывает, какая фаза находится во включенном состоянии.

Сигналы Q1÷Q12 с выхода дешифратора поступают на комбинационную схему SU из элементов 2И-НЕ (К155ЛА3) и 4И-НЕ (К155ЛА1), управляемую от переключателя S8. Эта схема представляет собой шифратор униполярного кода дешифратора «1 из 12-ти» в шестипозиционный код управления фазами двигателя. Выходные сигналы логиче-

Таблица истинности дешифратора DC при 12-тактной схеме управления.

Таблица 2.3

Число импульсов	Входы				Выходы												
	8	4	2	1	Q13	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
11	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 2.4

S7	S8	Состояние дешифратора											
режим коммутации	алгоритм	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
6step	1-2	1		2		3		4		5		6	
6step	2-3	6,1,2		1,2,3		2,3,4		3,4,5		4,5,6		5,6,1	
12step	1-2	1	1,2	2	2,3	3	3,4	4	4,5	5	5,6	6	6,1
12step	2-3	6,1,2	1,2	1,2,3	2,3	2,3,4	3,4	3,4,5	4,5	4,5,6	5,6	5,6,1	6,1

ских элементов 4И-НЕ в виде 6-ти позиционного кода поступают на вход мультиплексора MS1, режим которого (логический блок «1» или компьютер) выбирается переключателем S9.

Выходные сигналы мультиплексора Q1÷Q6 в установленном ранее режиме коммутации управляют усилителями мощности «ИС» в цепи обмоток возбуждения ШД.

Обмотки возбуждения двигателя питаются от диодного выпрямителя током напряжения  $U_n=48В$ , цепи управления работают при напряжении 5В. Гальваническая развязка силовой и управления цепей выполнена с помощью транзисторной оптопары АОТ100Б усилителя мощности (рис. 2.1). Блокировка коммутации фаз ШД выполняется переключателем S10.

Индикация частоты импульсов или их числа индикатором НГ осуществляется следующим образом. На вход делителя частоты 1/100 подается частота сети 50 Гц, а с выхода снимается частота 0,5 Гц, за-

дающая интервал измерения (2 с) . Схемой управления на элементах И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ и переключателем S6 выбирается режим измерения частоты (положение «1») или числа импульсов (положение «Nstep»). На входы «+1» и «-1» двоично-десятичного реверсивного счетчика СТ1 (реализован на 4-х микросхемах К155ИЕ6) подаются те же сигналы, что и на входы счетчика СТ логического блока. Дешифратор DC1 преобразует 4-х разрядный десятичный код сигналов генератора в код, необходимый для управления 4-мя семисегментными индикаторами НГ.

## **2.6. Программа экспериментов**

Порядок экспериментального исследования электропривода:

- проверка работоспособности стенда;
- исследование работы счетчика, дешифратора, шифратора и усилителей мощности;
- определение единичного шага;
- исследование предельной механической характеристики;
- исследование предельной динамической характеристики приемистости.

### ***Внимание!***

**При работе стенда его жалюзи должны быть открыты.**

**Силовой блок стенда допускает работу в повторно-кратковременном режиме в течение не более 2-х часов.**

**Если исследуется блок логики при отключенной силовой части переключателем S10 стенд может работать в продолжительном режиме.**

## **2.7. Проверка работоспособности стенда (рис. 2.1)**

Перед включением необходимо убедиться, что:

- переключатели S1, S3, S4, S6 ÷ S10 установлены в верхнее по схеме положение;
- винт регулировки нагрузки на электромеханическом агрегате повернуть вправо до упора.

Проверку проводить по следующей схеме:

- включить сетевой автомат на левой боковой панели, при этом должен загореться красный светодиод на верхней панели, а на индикаторе НГ должна отображаться частота генератора;

– поворачивая ручки потенциометров R1 и R2 убедиться, что происходит изменение частоты;

– переключить тумблеры S1, S6, S8, S9, S10 в нижнее положение, затем нажать кнопку S5;

– при этом должен загореться светодиод фазы «1»; нажимая кнопку S2 убедиться, что происходит вращение лимба на ШД, переключение светодиодов на верхней панели, на индикаторе HG отображается количество нажатий кнопки S2;

– перевести переключатель S3 в нижнее положение и нажимая S2, убедиться, что лимб вращается в обратном направлении и отсчет на индикаторе HG происходит также в обратном направлении, S3 перевести в верхнее положение;

– установить переключатель S7 в нижнее положение и нажать кнопку S5;

– нажимая кнопку S2, убедиться, что переключение светодиодов происходит в следующем порядке 1 – 1,2 – 2 – 2,3 – 3 – 3,4 – 4 – 4,5 – 5 – 5,6 – 6 – 6,1 – 1 и т. д., затем переключить S8 в положение «2-3» и наблюдать переключение светодиодов 6,1,2 – 1,2 – 1,2,3 – 2,3 – 2,3,4 – 3,4 – 3,4,5 – 4,5 – 4,5,6 – 5,6 – 5,6,1 – 6,1 – 6,1,2 и т. д.;

– переключатель S4 установить в положение «STOP» и, нажимая кнопку S2, убедиться, что вращение лимба ШД не происходит.

## 2.8. Определение величины единичного шага

Для этого необходимо:

– переключатели S3 и S4 установить в верхнее положение, а S1, S6, S7, S8, S9 и S10 – в нижнее, нажать кнопку S5;

– заворачиванием винта на правом динамометре нагрузочного устройства снять нагрузку с вала шагового двигателя;

– записать начальное значение угла поворота лимба;

– нажимая многократно кнопку S2, повернуть лимб на некоторый угол.

Величина единичного шага

$$\alpha_{ш} = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{n},$$

где  $\varphi_1$  – начальный угол поворота лимба;

$\varphi_2$  – конечный угол поворота лимба;

$n$  – число нажатий кнопки S2 (считать и контролировать по индикатору HG), для повышения достоверности число «n» должно быть достаточно большим.

Те же действия произвести для 6-ти тактной схемы коммутации, для чего переключатель S7 установить в положение «6 step».

## 2.9. Исследование предельной механической характеристики

Опыты проводятся для схем коммутации с различными алгоритмами управления.

Вначале характеристика  $M_c = \varphi(f)$  снимается для 12-тактной системы коммутации с алгоритмом 1 – 2. Для этого необходимо:

– переключатели S1, S3, S4, S6 установить в верхнее положение, а S7, S8, S9 и S10 – в нижнее, нажать кнопку S5;

– снять нагрузку с вала ШД заворачиванием винта на правом динамометре, замерить радиус шкива (R);

– пуск двигателя производить плавно, повышая частоту импульсов с помощью потенциометров R1 и R2 (при частотах свыше 600 Гц пуск из неподвижного состояния невозможен);

– нагружать вал ШД при помощи фрикционного тормоза, записывая в табл. 2.5 значения частоты импульсов генератора  $f$  (показания индикатора HG) и показания динамометров F1, F2; опыт проводить до момента начала пропуска шагов (выпадение из синхронизма), наблюдаемого визуально; частота, при этом, есть предельная частота  $f_{np}$ ;

– выполнить аналогичные опыты для 12-тактной схемы коммутации с алгоритмом 2–3 (переключатель S8 поставить в верхнее положение) и для 6-тактной схемы коммутации с алгоритмами 1– 2 и 2 – 3 при верхнем положении переключателя S7;

– по окончании опыта переключатели поставить в исходные положения.

Таблица 2.5

$f$	Гц							Примечание
$F_1$	кгс							R- .. м; $M=9,81(F_1-F_2)R$
$F_2$	кгс							
$F_1-F_2$	кгс							
$M_c$	Нм							

Привести пример расчета.

По данным табл. 2.5 построить характеристики  $M_c = \varphi(f)$  для разных схем коммутации.

## 2.10. Исследование предельной динамической характеристики приемистости

Для этого необходимо:

– переключатели S1, S3, S6 установить в верхнее положение, а S4, S7, S8, S9, S10 – в нижнее, нажать кнопку S5;



- установить определенную частоту импульсов потенциометрами R1, R2;
- нагрузить вал двигателя некоторым моментом  $M_c$ ;
- переключить S4 в положение «START»: если вал ШД начнет вращаться без пропуска шагов (алгоритм 1–2 для 12-тактной схемы, табл. 2.5), то опыт повторить, увеличив частоту при той же нагрузке;
- опыт продолжать до тех пор, пока при какой-то последующей частоте пуск не произойдет – чуть меньшая частота и будет частотой приемистости  $f_{прс}$ ;
- аналогично установить другие точки характеристики  $f_{прс} = \varphi(M_c)$ , меняя нагрузку двигателя;
- данные опыта заносятся в таблицу, аналогичную табл. 2.5, в которой  $f = f_{прс}$ ;
- по данным таблицы, аналогичной табл. 2.5, построить зависимость  $f_{прс} = \varphi(M_c)$ ;
- выполнить опыты при других схемах коммутации: 12-тактная схема, алгоритм 2–3; 6-тактная схема, алгоритмы 1–2 и 2–3;
- по окончании опытов переключатели поставить в исходное положение.
- по окончании работы отключить автомат на левой боковой панели приборного блока.

## 2.11. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.
3. Расчет и результаты сравнения единичного шага для 6-и и 12-тактных схем коммутации.
4. Таблицы опытных данных и характеристики  $M_c = \varphi(f)$  для 6-и и 12-тактных схем коммутации с алгоритмами 1–2 и 2–3 на одном графике.
5. Таблицы опытных данных и характеристики  $f_{прс} = \varphi(M_c)$  для 6-и и 12-тактных схем коммутации с алгоритмами 1–2 и 2–3 на одном графике.
6. Краткие выводы.

## 2.12. Контрольные вопросы

- 2.12.1. Объяснить принцип действия реактивного редукторного шагового двигателя.

- 2.12.2. Что такое симметричная и несимметричная коммутация обмоток возбуждения исследуемого двигателя?
- 2.12.3. Почему при несимметричной коммутации обмоток шагового двигателя может быть получен меньший шаг ротора?
- 2.12.4. Как выполнить реверс ШД?
- 2.12.5. Каким образом обеспечивается 12-ти тактная и 6-ти тактная схемы работы исследуемого двигателя?
- 2.12.6. Каким способом регулируют скорость вращения ШД?
- 2.12.7. Почему при предельной частоте  $f_{np}$  шаговый двигатель выпадает из синхронизма?
- 2.12.8. Почему при снижении момента инерции установки частота приемистости увеличивается?

### Список литературы

1. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 180 с.
2. Штелтинг Г., Байсе А. Электрические микромашины. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 227 с.
3. Хрушев В.В. Электрические микромашины автоматических устройств. – Л., «Энергия», 1976. – 384 с.
4. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
5. Лабораторный практикум к выполнению лабораторных работ по курсу «Теория электропривода» для студентов направления 14.06.00 и специальности 14.06.04 / сост.: Ю.Н. Дементьев, С.М. Семенов, Ю.С. Боровиков. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 132 с.
6. Шаговые электродвигатели. Карпенко Б.К., Ларченко В.И., Прокофьев Ю.А. – «Техніка», 1972. – 216 с.
7. Ратмиров В.А., Ивоботенко Б.А. Шаговые двигатели для систем автоматического управления. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1962. – 128 с.
8. Головин П.И. Энергосистема и потребители электрической энергии, Энергоатомиздат, 1987. – 260 с.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

### **3.1. Цель работы**

Исследование статических и динамических характеристик, режимов работы и параметров синхронного электропривода в системе потребления электроэнергии.

### **3.2. Оборудование стенда (перечень аппаратуры)**

Аппаратная часть комплекта выполнена по блочному (модульному) принципу и содержит:

- спроектированные с учебными целями натурные аналоги электрических машин, трансформаторов и элементов электрических цепей;
- источники питания;
- измерительные преобразователи и приборы;
- персональный IBM-совместимый компьютер со встроенной платой ввода/вывода данных фирмы National Instruments;
- трехсоставной лабораторный стол со встроенным контейнером для хранения съемных функциональных блоков, проводников и методических материалов, рамами для установки необходимых в эксперименте функциональных блоков, выкатной полкой для клавиатуры компьютера и подставкой для системного блока последнего.

Питание комплекса осуществляется от трехфазной электрической сети напряжением 380 В с нейтральным и защитным проводниками.

- Потребляемая мощность Вт, не более.....500.
- Габариты(длина/ширина/высота),мм.....2750×900×1600.
- Масса, кг, не более.....250.

Программная часть комплекта включает:

- программную среду персонального компьютера (Windows всех версий, начиная с Windows 98);
- разработанные регистраторы режимных параметров машин постоянного и переменного тока, пульта управления электроприводами, виртуальный осциллограф.

#### **3.2.1. Назначение и описание функциональных блоков лабораторной работы (рис. 3.1, 3.2)**

- Трехфазный источник питания.

Предназначен для питания комплекта трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения

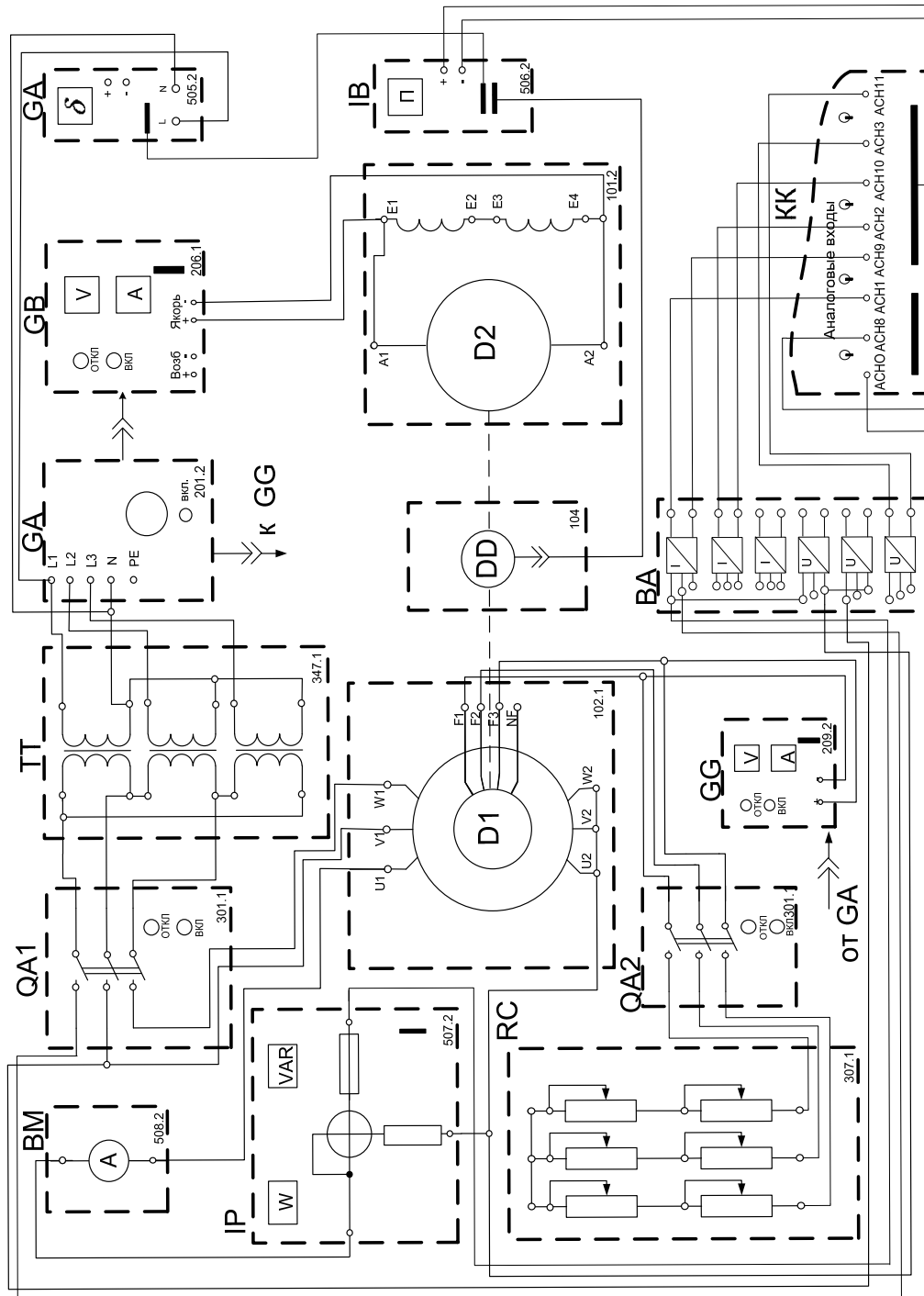


Рис. 3.1. Электрическая схема настройки угла нагрузки синхронного двигателя

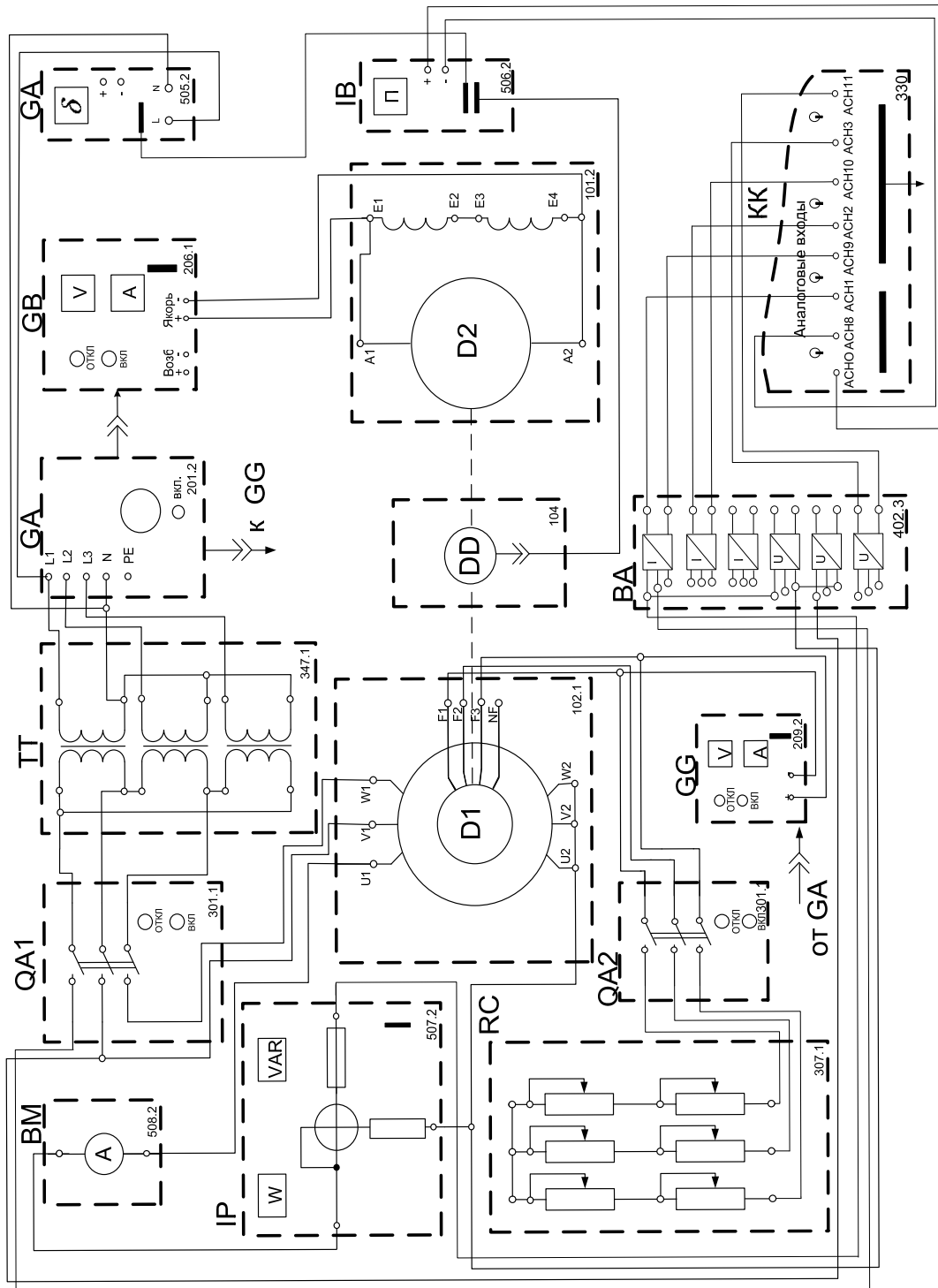


Рис. 3.2. Электрическая схема соединений синхронного электропривода

– Источник питания машины постоянного тока.

Предназначен для питания обмоток якоря и возбуждения постоянным током. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Якорное напряжение регулируется вручную или дистанционно. Напряжение возбуждения нерегулируемое.

– Возбудитель машины переменного тока.

Предназначен для питания обмотки возбуждения синхронной машины. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Напряжение возбуждения регулируется вручную или дистанционно / автоматически. Выходные цепи изолированы от входных.

– Трехполюсный выключатель.

Предназначен для ручного или дистанционного / автоматического (от ПЭВМ) включения / отключения электрических цепей.

– Активная нагрузка.

Предназначена для моделирования однофазных и трехфазных потребителей активной энергии. Регулируется вручную.

– Реостат для цепи ротора машины переменного тока.

Предназначен для ручного регулирования тока в обмотке ротора машины переменного тока.

– Трехфазная трансформаторная группа.

Предназначена для преобразования однофазного / трехфазного напряжения.

– Блок мультиметров.

Предназначен для измерения токов, напряжений, омических сопротивлений. Цифровой с жидкокристаллическим дисплеем.

– Указатель угла нагрузки синхронной машины.

Предназначен для измерения и отображения в аналоговой форме угла нагрузки синхронной машины. Имеет выходные гнезда для подключения к ПЭВМ.

– Указатель частоты вращения.

Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в электромашинном агрегате в аналоговой форме.

– Измеритель мощностей.

Предназначен для измерения активной и реактивной мощностей в однофазной электрической цепи и отображения их в аналоговой форме.

– Преобразователь угловых перемещений.

Предназначен для преобразования скорости вращения электрических машин в сигнал цифрового вида.

– Коннектор.

Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам платы сбора данных PCI 6024E персонального компьютера.

– Блок датчиков тока и напряжения.

Предназначен для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых цепях постоянного и переменного тока, и гальванически с последними не связанных.

– Персональный компьютер

Предназначен для дистанционного / автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.

Исследуемая машина переменного тока (синхронный двигатель):

$$P_H = 100 \text{ Вт};$$

$$U_H = 230 \text{ В};$$

$$I_1 = 0,26 \text{ А};$$

$$I_{\text{ВХ}} = 1,6 \text{ А};$$

$$U_{\text{ВН}} = 22 \text{ В};$$

$$I_{\text{ВН}} = 1,85 \text{ А};$$

$$n_H = 1500 \text{ об/мин};$$

$$\cos \varphi_H = 1.$$

Нагрузочная машина постоянного тока (двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением):

$$P_H = 90 \text{ Вт};$$

$$U_H = 220 \text{ В};$$

$$I_H = 0,56 \text{ А};$$

$$n_H = 1500 \text{ об/мин};$$

$$I_{\text{ВН}} = 0,2 \text{ А};$$

$$\eta_H = 57,2 \text{ \%};$$

$$\cos \varphi_H = 0,73;$$

$$R_{\text{я}} = 86 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{о.в.}} = 1,15 \text{ кОм}.$$

Исследуемая и нагрузочная машины жестко соединены между собой и представлены в виде электромашинного агрегата, дополненного маховиком и преобразователем угловых перемещений.

### 3.2.2. Обозначения и параметры используемой аппаратуры

Таблица 3.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
ТТ	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3×80В·А; 230/242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
QA1, QA2	Трехполюсный выключатель	301.1	~400 В; 10 А
RC	Реостат для цепи ротора машины переменного тока	307.1	3х0...40 Ом; 1 А
RA	Активная нагрузка	306.1	3 × 0...50 Вт; 220 В; 0,5 А
ВА	Блок датчиков тока и напряжения	402.3	3 измерительных преобразователя «ток – напряжение» 5 А/1 А/5 В; 3 измерительных преобразователя «напряжение – напряжение» 1000 В/100 В/5 В
КК	Коннектор	330	8 аналог. дифф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
IBM	Персональный компьютер	550	IBM-совместимый плата сбора информации PCI 6024E
GA	Трехфазный источник питания	201.2	~400 В; 16 А
GB	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	-0...250 В; 3 А (якорь); -200 В; 1 А (возбуждение)
GG	Возбудитель машины переменного тока	209.2	-0...40 В; 3,5 А



Окончание таблицы 3.1

D2	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; – 220 В /0,76А (якорь) – 220В (возбужде- ние)
DD	Преобразователь угловых пе- ремещений	104	6 выходных сигналов
D1	Машина переменного тока	102.1	50 Вт; ~230 В; 1500 мин <sup>-1</sup>
IP	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
BM	Блок мультиметров	508.2	≈0...1000 В; ≈0...20 А
IB	Указатель частоты вращения	506.3	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>
IQ	Указатель угла нагрузки син- хронной машины	505.2	– 180°...0...180°

### 3.3. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

Блок-схема соединения тепловой защиты машины переменного тока изображена на рис. 3.3.

Перечень аппаратуры схемы тепловой защиты (рис. 3.3) приведен в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
D	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~230В / 1500 мин <sup>-1</sup>
GA	Трехфазный источник питания	201.2	~400В / 16А



Рис. 3.3. Схема тепловой защиты машины переменного тока

### 3.4. Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра

Для измерения трех базовых электрических величин (напряжения, тока и омического сопротивления) используется мультиметр. Схемы подключения мультиметра для измерения этих величин приведены на рис. 3.4, рис. 3.5, рис. 3.6. До его подключения к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- установить род тока (постоянный/переменный);
- выбрать диапазон измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильно подсоединить зажимы мультиметра к измеряемой цепи.

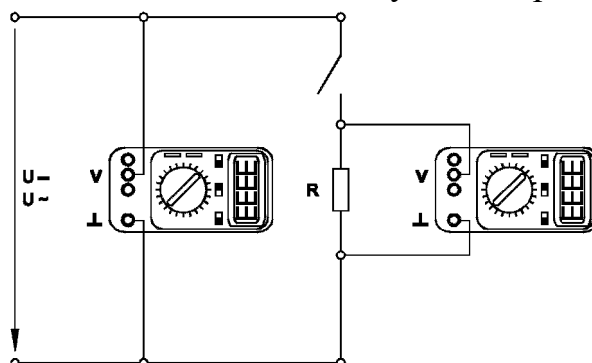
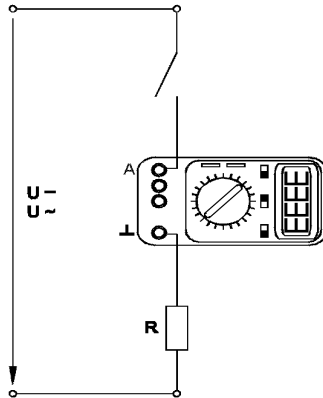
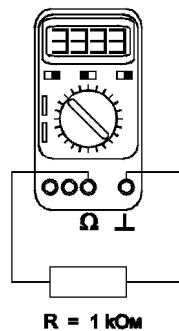


Рис. 3.4. Схема присоединения мультиметра (как вольтметра) для измерения напряжения



*Рис. 3.5. Схема присоединения мультиметра (как амперметра) для измерения тока*



*Рис. 3.6. Схема присоединения мультиметра (как омметра) для измерения омического сопротивления*

### **3.5. Порядок работы с оригинальными программными продуктами**

В программное обеспечение учебного лабораторного комплекса «Электрический привод» входят одиннадцать программных продуктов – «Многоканальный осциллограф», «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока», «Регистратор режимных параметров машины переменного тока», «Регистратор режимных параметров частотного привода» и семь узкоспециализированных программ для проведения экспериментов.

#### **3.5.1. Описание работы с программой «Многоканальный осциллограф»**

Программа «Многоканальный осциллограф» является виртуальным аналогом реальных приборов и обладает широкими функциональными возможностями. Она предназначена для регистрации и отображения различных аналоговых сигналов в удобной для пользователя форме.

«Осциллограф» имеет четыре одинаковых канала, каждый из которых может быть сопоставлен с любым физическим каналом аналого-

вого ввода платы. Каналы платы должны быть настроены на дифференциальный режим работы.

Каждый из каналов осциллографа может быть включен или выключен, иметь свой собственный коэффициент деления, быть «прямым» или «инверсным», иметь «открытый» или «закрытый» вход (т. е. сохранять или отрезать постоянную составляющую сигнала). Кроме того, сигнал любого канала можно «сгладить» (применяется для наблюдения зашумленных сигналов), отобразить определенным цветом, сдвинуть по вертикали.

Имеется два способа синхронизации картинки на экране осциллографа. Первый из них, «50 Гц» применяется для наблюдения сигналов, частота которых кратна 50 Гц. В этом режиме частоту синхронизации можно менять в небольших пределах, нажимая на кнопки с красными стрелками. Нажатием на правую стрелку можно заставить «бежать» картинку вправо, нажатием на левую – влево.

Второй способ синхронизации – классическая синхронизация по какому-либо каналу. Здесь можно выбрать номер канала, по которому будет производиться синхронизация, а также уровень синхронизирующего напряжения.

По оси времени картинку на экране осциллографа можно растянуть или сжать, задавая тот или иной масштаб по горизонтали, а также сдвинуть вправо или влево соответствующим движком.

Осциллограф:

– Работает в режиме XY. В этом случае можно задать номера каналов, сопоставленных с осями X и Y, а также цвет отображаемой линии. В любой момент сканирование аналоговых каналов можно остановить. При этом картинка на экране осциллографа «заморозится». Полученные осциллограммы можно теперь также, как и до «замораживания» масштабировать, менять цвета линий и пр.

– Можно использовать в режиме запоминания, для чего в окне «Параметры» должна быть поставлена соответствующая галочка. В этом случае программа во время сканирования будет непрерывно сохранять данные в циклический буфер. Его содержимое можно отобразить *после остановки сканирования*. Существует возможность изменять порядок отображения запомненных кривых.

– Может вычислять интегральные значения принимаемых сигналов. Для включения этого режима нужно нажать соответствующую кнопку.

Программа позволяет сохранять осциллограммы в файлы. Сохранение производится двумя способами – в текстовый файл или в файл собственного формата \*.osc. В первом случае в созданном файле будет

находиться таблица значений точек каналов, которую можно затем экспортировать в Excel. Во втором случае в сохраненном файле будет содержаться информация об осциллограммах, о положениях органов управления и пр. Сохраненный файл можно снова загрузить в «Осциллограф» и выполнять все те же действия, что и с «замороженной» осциллограммой.

Расширение \*.osc регистрируется в Windows при установке программы либо путем вызова соответствующего пункта меню.

«Многоканальный осциллограф» может гибко настраиваться на определенную скорость сканирования и нужное быстродействие. При установке параметров сканирования можно исходить из следующих соображений.

*Частота сканирования* должна находиться в пределах 1000 – 50000 герц. Если необходимо рассмотреть мелкие (по частоте) подробности сигнала (например, интервалы коммутации тиристоров в схемах силовой электроники), то частоту сканирования целесообразно задавать относительно высокую, если же форма сигнала не слишком интересна (например, заведомо известно, что сигналы – синусоиды), то частоту сканирования можно задать относительно низкую. Необходимо иметь в виду, что при установке высокой частоты сканирования быстродействие программы снижается, поэтому иногда целесообразно оставлять включенным лишь один канал.

*Частоту обновления осциллограмм* следует устанавливать в пределах 5...50 Гц. При этом необходимо иметь в виду, что если частота сканирования, деленная на частоту обновления осциллограмм, не кратна 50 Гц, то режим синхронизации «50 Гц» работать не будет. Также нужно учитывать, что чем выше частота обновления осциллограмм, тем быстрее реагирует осциллограф на изменение режима схемы; тем меньший по длине отрезок времени отображается на экране; тем сильнее нагружается система. Верно и обратное утверждение.

На графиках осциллографа отображается каждая N-ная точка. Число N задается в пределах от 1 до 10. Чем выше N, тем менее подробно строятся графики и тем меньше загружается система. Верно и обратное утверждение.

Опцию «*Запоминать последние N секунд процесса*» следует устанавливать в диапазоне 1...20 с. Опцию «*Отображать каждую N-ную точку*» (на вкладке «Запоминание») – в диапазоне 1...10 с. Чем больше время запоминания, тем больше используется оперативная память компьютера и тем дольше отображается записанный в память процесс. Чем больше число N, тем менее подробно и более быстро происходит отображение. Верны и обратные утверждения.

Для некоторого увеличения общего быстродействия программы рекомендуется отключать режим запоминания.

Ниже перечислены неочевидные возможности интерфейса программы, а также некоторые замечания.

- Двойным щелчком мыши можно устанавливать в ноль регуляторы смещения картинка по горизонтали и по вертикали.

- Щелчок мыши на осях графика вызывает окно настройки соответствующей оси.

- В этом окне, помимо всего прочего, можно включить или отключить отображение нулевых линий.

- Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

- Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

- Для удобства определения значений величин на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.

- Регулятор уровня синхронизации проградуирован *в единицах графика*.

- Делители напряжения каналов и временной делитель проградуированы по отношению *к одной единице* графика (например, положение 500 мВ означает, что одна единица (не клетка!) графика соответствует 500 мВ).

- Параметры сканирования по умолчанию можно установить, выбрав соответствующий пункт меню «Настройка».

- Таким же образом можно зарегистрировать расширение «\*.osc».

- Аналогичным образом можно вернуть все органы управления в исходное положение.

- Цвет того или иного графика можно выбрать, щелкнув «мышкой» по соответствующей кнопке выбора цвета.

- Отображение интегральных (средних, действующих, средневыпрямленных, максимальных, минимальных, амплитудных) значений сигналов можно включить, нажав на соответствующую кнопку.

- В режиме запоминания осциллограммы можно сглаживать, причем существуют два режима сглаживания – обычное, предназначенное для сглаживания случайных помех, и сильное (x10), предназначенное для сглаживания частот, сравнимых с 50 Гц. Следует, однако, всегда

понимать, что *любое сглаживание в общем случае искажает форму снятых зависимостей.*

– В режиме запоминания можно также менять порядок отображения графиков (т. е. вывести какую-либо кривую поверх остальных).

### **3.5.2. Описание работы с программой «Регистратор режимных параметров машины переменного тока»**

Программы-регистраторы предназначены для регистрации и отображения специфических параметров электрических машин в удобной для пользователя форме. Программы не имеют практически никаких настроек и обладают простым, удобным и интуитивно понятным интерфейсом.

Необходимым условием работы программ является правильное подключение к коннектору (код 330) аналоговых сигналов. Для удобства пользования, кроме схем данного руководства краткая информация по подключению сигналов имеется в самих программах.

Регистратор режимных параметров машины переменного тока в реальном времени отображает зависимости от времени тока статорной обмотки, частоты вращения и электромагнитного момента машины, а также – ее механическую характеристику (зависимость частоты вращения от электромагнитного момента).

## **3.6. Общие сведения**

### **3.6.1. История развития синхронной машины**

С самого начала синхронный электродвигатель (СД) был построен в виде однофазного генератора, который с середины прошлого столетия использовался для снабжения осветительных установок. Первый трехфазный синхронный генератор разработали в 1887 году независимо друг от друга F. A. Haselwander и Bradley. Впоследствии создается явнуполусная синхронная машина и турбогенератор – дальнейшие формы синхронного генератора. Charles E. Brown считается изобретателем последующего типа двигателя с обмоткой возбуждения, заложенной в пазы.

Совершенствование синхронной машины находится в тесной связи с расширением электрического энергоснабжения и возрастающей единичной мощности генераторов. Синхронные двигатели использовались, прежде всего, там, где необходимо было постоянное число оборотов или необходимость использования фазовращателя, т. е. в индустрии и ремесленных мастерских.

### 3.6.2. Принцип работы синхронного двигателя

Принцип действия асинхронного двигателя основан на взаимодействии поля системы и индуцированного вращающегося поля ротора. Таким же образом можно представить себе работу синхронной машины. Но главное отличие состоит в том, что переменное поле не должно индуцироваться. Ротор устроен как магнит, производящий переменное поле. Магнит ротора похож на иглу компаса в магнитном поле Земли; направление произведенного магнитного поля определяется обмоткой ротора. Причем ротор приводится в движение. Переменное поле не должно индуцироваться, т. е. синхронный двигатель не нуждается в разнице числа оборотов между полем ротора и системы. Ротор вращается с числом оборотов равному числу оборотов системы. Это число оборотов именуется синхронным числом. Поэтому машина называется синхронной.

Наиболее распространенной синхронной машиной является явнополюсный синхронный двигатель (ЯСД). Его ротор зовется также индуктором. Индуктор машин малой мощности представляет собой постоянный магнит. Для машин большой мощности ротор выполнен как электромагнит на постоянном токе. Из-за совпадения числа оборотов между полем ротора и статора синхронный двигатель нашел применение, прежде всего, в точной промышленности, например, в производстве часов. В легкой промышленности они встречаются реже. В тяжелой – опять же очень распространены. Они достигают больших мощностей и используются, прежде всего, в качестве приводов для компрессоров и насосов.

Синхронные двигатели не могут сами пускаться. Поэтому им необходимо вспомогательное оборудование – двигатели, которые выводят их на номинальное число оборотов.

В отличие от асинхронных двигателей синхронные имеют строго постоянную частоту вращения, не зависящую от нагрузки. Преимущества: возможность регулирования их коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и коэффициента электрической системы.

На рис. 3.7 приведена схема включений синхронного двигателя. Токи, протекающие по трехфазной обмотке статора, создают намагничивающие силы, результирующий вектор которых образует вращающееся в пространстве электромагнитное поле статора  $\psi_1$ .

Скорость вращения поля равна:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{P_{\Pi}},$$

где  $f$  – частота питающей сети;  $P_{\Pi}$  – число пар полюсов машины и является рабочей скоростью СД.



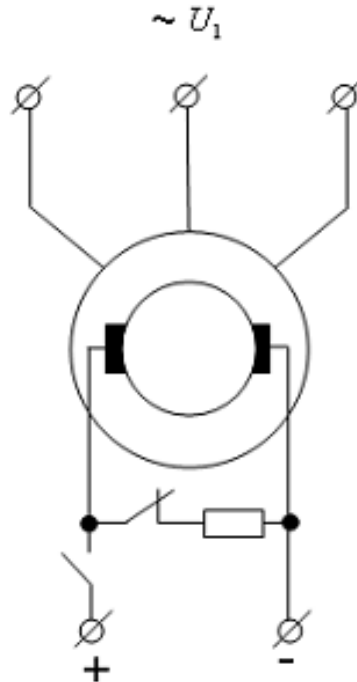


Рис. 3.7. Схема включения синхронного двигателя

На роторе СД расположена обмотка возбуждения, которая питается постоянным током от независимого регулируемого источника напряжения – возбудителя. Ток возбуждения создает электромагнитное поле  $\psi_0$ , неподвижное относительно ротора, и вращающееся в установившемся режиме вместе с ротором со скоростью  $\omega_0$ . Взаимодействие полей статора и ротора создает электромагнитный момент синхронной машины

$$M = K \cdot \bar{\Phi}_1 \cdot \bar{\Phi}_0.$$

При отсутствии нагрузки векторы полей  $\bar{\Phi}_1$  и  $\bar{\Phi}_0$  совпадают в пространстве и вращаются со скоростью  $\omega_0$ . При возникновении на валу двигателя момента сопротивления, векторы  $\bar{\Phi}_1$  и  $\bar{\Phi}_0$  расходятся на угол  $\theta$ , называемый углом нагрузки.

Изменению нагрузки на валу машины соответствует изменение  $\theta$  (рис. 3.8). Максимальный момент – при угле  $\theta = \frac{\pi}{2}$ . Если нагрузка на валу будет больше  $M_{\text{макс}}$ , то синхронный режим нарушается и машина выпадает из синхронизма.

Механическая характеристика СД (рис. 3.9) представляет абсолютно жесткую прямую линию 1, ограниченную значениями момента  $\pm M_{\text{макс}}$ .

Так как ротор двигателя вращается со скоростью  $\omega_0$  и скольжения отсутствует, то вся мощность электромагнитного поля статора  $P_1$  преобразуется в механическую мощность на валу. Если пренебречь потерями в статоре, то  $P_{эм} = 3U_1 \cdot I_1 \cos \varphi_1 = M \cdot \omega_0$ , откуда  $M = \frac{3 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1}{\omega_0}$ .

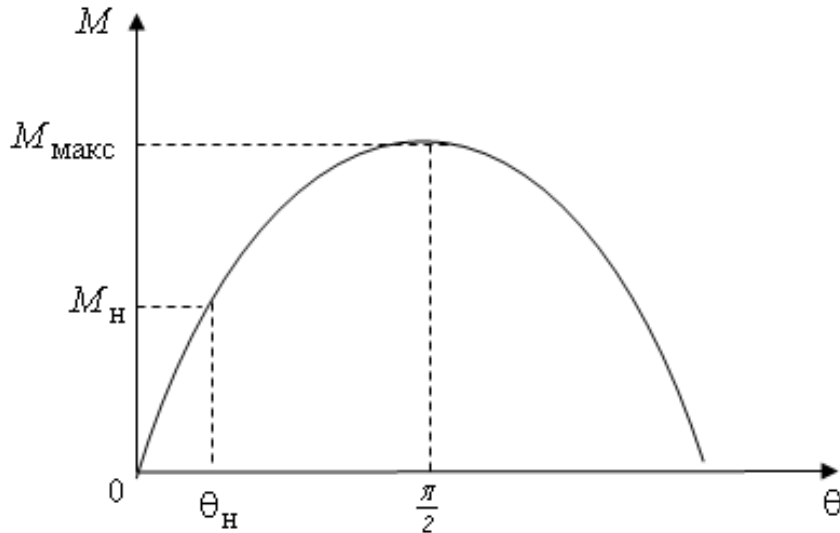


Рис. 3.8. Угловая характеристика СД (невянополюсная машина)

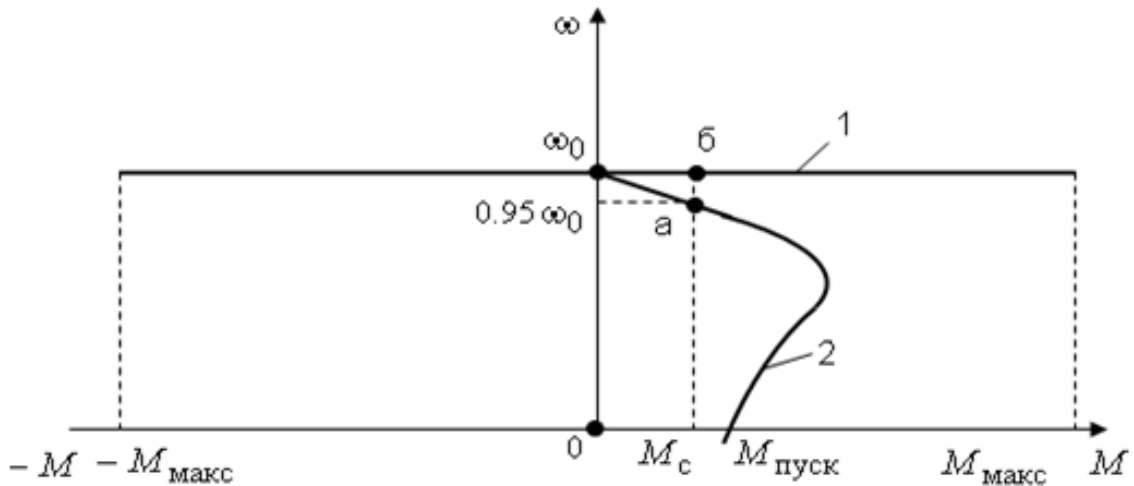


Рис. 3.9. Механическая характеристика СД

Как известно, пуск СД осуществляется в асинхронном режиме. Для этого в конструкции используется обмотка короткозамкнутого асинхронного двигателя. Поэтому при разгоне до синхронной скорости двигатель работает как асинхронный короткозамкнутый с механической характеристикой 2 (рис. 3.9). По достижении синхронной скорости ( $0,95 \omega_0$ ) в обмотку возбуждения подается постоянный ток и двигатель втягивается в синхронизм, переходя на работу в точку б, соответствующую синхронному режиму.

### 3.6.3. Область применения

Одной из важных областей применения является использование синхронной машины в качестве синхронного компенсатора, дающего возможность улучшить коэффициент мощности  $\cos\varphi$  электрической системы.

Если ротор синхронной машины привести во вращение с частотой  $n$  и возбудить его, то поток возбуждения  $\Phi_B$  будет индуцировать в обмотке якоря ЭДС с частотой  $f_1 = p \cdot n / 60$ . ЭДС обмотки якоря двигателя составляют симметричную трехфазную систему и при подключении к обмотке якоря генератора симметричной нагрузки, эта обмотка нагрузится симметричной системой токов. Машина при этом будет работать в генераторном режиме.

Синхронные компенсаторы устанавливаются исключительно с целью получения реактивной мощности. Естественно, что эти машины могут работать также в режиме потребления реактивной мощности. Это можно наглядно продемонстрировать с помощью известных  $U$ -образных характеристик.

На рис. 3.10 представлены  $U$ -образные характеристики синхронного генератора, подключенного к электрической сети с неизменным уровнем напряжения  $U_1 = \text{const}$  при различных значениях активной нагрузки  $P = 0; P'; P \gg$  ( $I_1$  — ток статора;  $I_B$  — ток возбуждения).

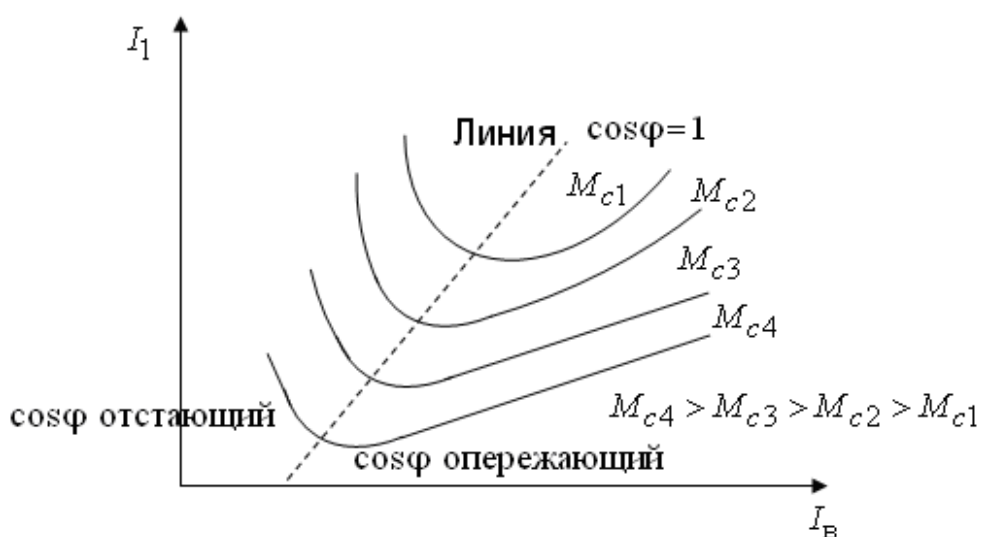


Рис. 3.10.  $U$ -образные характеристики синхронного генератора ( $U_1 = \text{const}$ , активная нагрузка  $P = 0; P'; P \gg$ )

При потоке возбуждения меньше номинального, вектор тока статора  $I_1$  отстает от вектора напряжения сети  $U_1$  на угол  $\varphi$ , т. е. двигатель работает с отстающим  $\cos\varphi$  (реактивная мощность «потребляется»).

При увеличении тока возбуждения ток статора будет опережать по фазе напряжение  $U_1$ ,  $\cos\varphi$  станет опережающим, и синхронный двигатель будет генерировать реактивную мощность.

При появлении преобразователей частоты синхронный двигатель использовался в качестве привода. Поэтому в настоящее время применение его широко: от сервомоторов до двигателей большой мощности. В качестве примера можно назвать 30 МВт воздуходувку доменной печи (синхронный двигатель с преобразователем). Также используют синхронные двигатели в качестве приводов для цементных мельниц, подъёмно-транспортных машин (т. е. конвейеров) и прокатных станков. В настоящее время часто применяется синхронный двигатель, прежде всего, как микродвигатель в часах, фотоаппаратах и в точном приборостроении.

### 3.7. Принципиальная электрическая схема стенда (рис. 3.1, 3.2)

Источник  $GA$  – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока  $GB$  используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока  $D2$ , работающей в режиме генератора, нагруженного на активную нагрузку  $RA$ .

Возбудитель  $GG$  используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения синхронного двигателя  $D1$ .

Преобразователь угловых перемещений  $DD$  генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения  $IB$  и указателя угла нагрузки  $IQ$ .

Машина переменного тока (синхронный двигатель) получает питание от источника  $GA$  через трехфазную трансформаторную группу ТТ и трехполюсный выключатель  $QA1$ .

Реостат для цепей ротора машины переменного тока включен в цепь ротора двигателя  $D1$  через трехполюсный выключатель  $QA2$ .

Измеритель мощностей  $IP$  используется для измерения активной мощности в фазе «А» исследуемого двигателя.

С помощью мультиметра блока ВМ контролируется ток фазы «А» двигателя  $D1$ .

Датчики тока и напряжения блока ВА гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормируют сигналы о токе фазы «А», напряжении фазы «А» и напряжении фазы «В» исследуемого двигателя  $D1$ .

Коннектор КК выполняет функцию связующего звена между компьютером IBM и блоком измерительных трансформаторов.

Компьютер  $IBM$  используется в режиме информационно-измерительной системы.

### 3.8. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования электропривода:

- подготовка стенда к эксперименту (рис. 3.1);
- настройка указателя угла нагрузки;
- проверка работоспособности стенда (рис. 3.2);
- снятие угловых статических характеристик  $P = f(\theta)$  и  $M = f(Q)$ ;
- снятие статической U-образной характеристики  $I_1 = f(I_B)$ ;
- снятие характеристики реактивной мощности двигателя изменением возбуждения  $Q = f(I_B)$ ;
- определение координат и параметров электропривода в переходных режимах (пуск, торможение при работе на холостом ходу и под нагрузкой, сброс и наброс нагрузки).

### 3.9. Подготовка стенда к эксперименту (рис. 3.1)

Для этого необходимо проделать следующее:

- Убедиться, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (рис 3.3).
- Соединить гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника GA.
- Подключить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 3.1).
- Переключатели режима работы источника GB, возбудителя GG и выключателей QA1, QA2 установить в положение «РУЧН.».
- Регулировочные рукоятки источника GB и возбудителя GG повернуть в крайнее левое положение.
- Тумблер пределов измерения угла указателя блока IQ синхронной машины установить в положение  $200^0$ .
- Установить переключателем в блоке ТТ номинальное вторичное фазное напряжение трансформаторов 220 В.
- Установить сопротивления фаз реостата блока RC равными 8 Ом.

### 3.10. Настройка указателей угла нагрузки

Для этого необходимо проделать следующее:

- Включить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Установить мультиметры на соответствующие пределы измерений токов и напряжений.
- Включить источник  $GA$ . О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» трехполюсного выключателя  $QA2$ .
- Вращая регулировочную рукоятку возбuditеля  $GG$ , установить напряжение на его выходе равным 20 В.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» трехполюсного выключателя  $QA1$ . Двигатель  $D1$  должен прийти во вращение.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» возбuditеля  $GG$ .
- Сразу после вхождения двигателя  $D1$  в синхронизм отключить выключатель  $QA2$  нажатием кнопки «ОТКЛ.».
- Нажать кнопку «ВКЛ.» источника  $GB$ .
- Вращая регулировочные рукоятки источника  $GB$  и возбuditеля  $GG$ , установить потребляемые двигателем  $D1$  активную и реактивные мощности, равные 0 Вт и 0 Вар.
- Установить с помощью потенциометров «УСТАНОВКА НУЛЯ» («ГРУБО» и «ТОЧНО») указателя угла нагрузки  $IQ$  угол нагрузки, равный  $0^0$ .
- Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков. Отключить источник  $GA$  нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом в левое положение ключа-выключателя.

### 3.11. Проверка работоспособности стенда (рис. 3.2)

Для этого необходимо проделать следующее:

- Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 3.2).
- Переключатели режима работы источника  $GB$ , возбuditеля  $GG$  и выключателей  $QA1$ ,  $QA2$  установить в положение «РУЧН.».
- Регулировочные рукоятки источника  $GB$  и возбuditеля  $GG$  повернуть в крайнее левое положение.
- Тумблер пределов измерения угла указателя угла нагрузки  $IQ$  синхронной машины установить в положение  $200^0$ .
- Переключатели активной нагрузки  $RA$  установить в крайнее правое положение.

- Установить переключателем в блоке ТТ номинальное вторичное фазное напряжение трансформаторов 220 В.
- Установить сопротивления фаз реостата блока  $RC$  равными 8 Ом.
- Включить выключатели «СЕТЬ» всех используемых в эксперименте блоков.
- Установить мультиметры на соответствующие пределы измерений токов и напряжений.
- Включить источник  $GA$ . О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» трехполюсного выключателя  $QA2$ .
- Вращая регулировочную рукоятку возбuditеля  $GG$ , установить напряжение на его выходе равным 20 В.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» трехполюсного выключателя  $QA1$ . Двигатель  $D1$  должен прийти во вращение.
- Нажать кнопку «ВКЛ.» возбuditеля  $GG$ .
- Сразу после вхождения двигателя  $D1$  в синхронизм отключить выключатель  $QA2$  нажатием кнопки «ОТКЛ.».

### 3.12. Снятие статических характеристик синхронного электропривода

#### 3.12.1. Снятие угловых статических характеристик

Последовательность снятия зависимостей мощности ( $P$ ) и электромагнитного момента сопротивления ( $M_l$ ) на валу машины от угла нагрузки ( $\Theta$ ).

Подготовить стенд к работе по пункту 3.11.

– Частоту вращения  $n$  [ $\text{мин}^{-1}$ ] двигателя  $D1$  измерять с помощью указателя  $IV$ .

– Активную  $P$  [Вт] и реактивную  $Q$  [Вар] мощности, потребляемые двигателем  $D1$ , определять с помощью измерителя  $IP$ .

– Ток статора ( $I_l$ ) двигателя  $D1$  фиксировать мультиметром блока  $BM$ .

– Ток возбуждения ( $I_B$ ) двигателя  $D1$  измерять амперметром возбuditеля  $GG$ .

– Угол нагрузки (фазовый сдвиг между ЭДС двигателя  $D1$  и напряжением источника  $GA$ ) фиксировать по указателю  $IQ$ .

– Нажать кнопку «ВКЛ.» источника  $GB$ .

– Вращая регулировочную рукоятку источника  $GB$ , изменять угол нагрузки  $\Theta$  двигателя  $D1$  и заносить показания блока  $IQ$ , ваттметра  $W$  измерителя мощностей  $IP$  и амперметра  $A$  блока  $BM$  в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Θ, Град							
P, Вт							
I <sub>1</sub> , А							

– В случае перехода двигателя *D1* в асинхронный режим работы разгрузить его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника *GB* в крайнее левое положение до тех пор, пока не восстановится синхронная работа двигателя с сетью.

– По завершении эксперимента повернуть регулировочные рукоятки источника *GB* (разгрузить двигатель *D1* по активной мощности) и возбuditеля *GG* в крайнее левое положение и нажать кнопки «ОТКЛ.». Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» задействованных в эксперименте блоков. Отключить источник *GA* нажатием на кнопку – гриб с последующим поворотом в левое положение ключа выключателя.

– Используя данные табл. 3.3 вычислить значения электромагнитного момента  $M_1$  двигателя *D1* по выражению:

$$M_1 = \frac{3 \cdot P - 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1}{\omega_0},$$

где  $P$  – активная мощность, потребляемая фазой двигателя, Вт;  $R_1$  – активное сопротивление фазы статорной обмотки двигателя, Ом ( $R_1 = 21$  Ом);  $I_1$  – фазный ток двигателя, А;  $\omega_0$  – угловая частота вращения магнитного поля двигателя ( $\omega_0 = 157$  с<sup>-1</sup>).

Полученные результаты занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Θ, Град							
$M_1$ , Н·м							

Привести пример расчета.

– По данным табл. 3.3 и 3.4 построить угловые характеристики  $P = f(\Theta)$  и  $M = f(\Theta)$  двигателя *D1*.

### 3.12.2. Снятие статической U-образной характеристики

Последовательность снятия зависимости тока статора ( $I_1$ ) от тока возбуждения ( $I_B$ ) при различных значениях активной нагрузки.

Подготовить стенд к работе по п. 3.11.

– Вращая регулировочную рукоятку источника *GB*, установить активную мощность, потребляемую двигателем *D1* из сети, равной, например, 75 Вт и поддерживать её в ходе эксперимента.



– Вращая регулировочную рукоятку возбудителя  $GG$ , изменять ток возбуждения  $I_B$  двигателя  $D1$  в диапазоне 0,8...2 А и занести показания амперметра возбудителя  $GG$  и амперметра А блока ВМ в табл. 3.5.

Таблица 3.5

$I_B, A$									
$I_1, A$									

– В случае перехода двигателя  $D1$  в асинхронный режим работы разгрузить его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника  $GB$  в левое положение до тех пор, пока не восстановиться синхронная работа двигателя с сетью.

– По завершении эксперимента повернуть регулировочные рукоятки источника  $GB$  (разгрузить двигатель  $D1$  по активной мощности) и возбудителя  $GG$  в крайнее левое положение и нажать кнопки «ОТКЛ.». Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» задействованных в эксперименте блоков. Отключить источник  $GA$  нажатием на кнопку – гриб с последующим поворотом крайнее левое положение ключа выключателя.

– По данным табл. 3.5 построить  $U$ -образную характеристику  $I_1 = f(I_B)$  двигателя  $D1$ .

### 3.12.3. Снятие характеристики реактивной мощности

Последовательность снятия зависимости реактивной мощности ( $Q$ ) от тока возбуждения ( $I_B$ ) при различных значениях нагрузки.

Подготовить стенд к работе по п. 3.11.

– Вращая регулировочную рукоятку источника  $GB$ , установить активную мощность, потребляемую двигателем  $D1$  из сети, равной, например, 75 Вт и поддерживать её в ходе эксперимента.

– Вращая регулировочную рукоятку возбудителя  $GG$ , изменять ток возбуждения  $I_B$  двигателя  $D1$  в диапазоне 0,8..2 А и занести показания амперметра возбудителя  $GG$  и варметра  $VAR$  измерителя мощностей  $IP$  в табл. 3.6.

Таблица 3.6

$I_B, A$									
$Q, \text{ВАр}$									

– В случае перехода двигателя  $D1$  в асинхронный режим работы разгрузить его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника  $GB$  в левое положение до тех пор, пока не восстановиться синхронная работа двигателя с сетью.

– По завершении эксперимента повернуть регулировочные рукоятки источника  $GB$  (разгрузить двигатель  $D1$  по реактивной мощности) и возбудителя  $GG$  в крайнее левое положение и нажать кнопки «ОТКЛ.». Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» задействованных в эксперименте блоков. Отключить источник  $GA$  нажатием на кнопку – гриб с последующим поворотом в крайнее левое положение ключа выключателя.

– По данным табл. 3.6 построить зависимость  $Q = f(I_B)$  двигателя  $D1$ .


### **3.13. Определение координат и параметров электропривода в переходных режимах (пуск, торможение, сброс–наброс нагрузки)**

#### **3.13.1. Рекомендации по использованию программы «Регистратор режимных параметров машины переменного тока»**

– Для определения координат точек на графиках использовать отображаемые на экране текущие координаты указателя мыши.

– Масштабирование производить путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществлять обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

– Графики относительно осей координат двигать путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

– Очищать область построения механической характеристики нажатием на соответствующую виртуальную кнопку  или клавишу «Пробел».

#### **3.13.2. Снятие характеристик $\omega = f(t)$ , $I_1 = f(t)$ $U_1 = f(t)$**

##### **переходных процессов синхронного электропривода**

Исследование переходных процессов пуска, торможения при работе на холостом ходу и под нагрузкой, сброса-наброса нагрузки проводить по заданию преподавателя.

Подготовить стенд к работе по пункту 3.11.


– Привести в рабочее состояние персональный компьютер *IBM*. Запустить программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».

– Вращая регулировочную рукоятку источника  $GB$ , установить активную мощность, потребляемую двигателем  $D1$  из сети, равной, например, 75 Вт.

– Начать сбор данных, нажав на виртуальную кнопку «Запустить» .

– Организовать интересующий переходный процесс, например, сброс-наброс нагрузки двигателя  $D1$ . Для чего нажать кнопку «ОТКЛ.» и спустя 5 с – кнопку «ВКЛ.» источника  $GB$ .

– Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени  $\omega = f(t), I_1 = f(t), U_1 = f(t)$ . При получении характеристик плохо приемлемых для анализа повторить опыт с использованием программы «Многоканальный осциллограф».

– Сразу после завершения переходного процесса нажать виртуальную кнопку «Остановить»  и анализировать запомненные зависимости координат и параметры электропривода от времени. Результаты анализа занести в табл. 3.7.

– Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти;

– По завершении эксперимента, вращая в левое положение регулировочную рукоятку источника  $GB$ , разгрузить двигатель  $D1$  по активной мощности. Нажать кнопку «ОТКЛ.» источника  $GB$ . Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» блоков, используемых в эксперименте. Отключить источник  $GA$  нажатием на кнопку-гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя.

Таблица 3.7

№ п.п.	Параметр переходного процесса								Название переходного процесса (пуск, торможение и т. д.)
	$t_{пп},$ мс	$\omega_{уст},$ $c^{-1}$	$\omega_{нач},$ $c^{-1}$	$I_{нач},$ мА	$I_{уст},$ мА	$\delta I_{уст},$ %%	$\delta I_{макс},$ %%	$I_{макс},$ мА	
1									
...									
6									

### 3.14. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Электрическая схема соединений с краткими пояснениями.
3. Таблица опытных данных и графики зависимостей  $P = f(\theta)$  и  $M = f(\Theta)$ .
3. Таблица опытных данных и график зависимости  $I_1 = f(I_B)$ .
4. Таблица опытных данных и график зависимости  $Q = f(I_B)$ .
5. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , тока  $I_1 = f(t)$  и напряжения  $U_1 = f(t)$  при пуске, останове, сбросе и набросе нагрузки на соответствующих характеристиках.
6. Краткие выводы.

### 3.15. Контрольные вопросы

- 3.15.1. Перечислить виды конструктивных исполнений СД.
- 3.15.2. Достоинства и недостатки синхронного электропривода.
- 3.15.3. В чем особенность пуска изучаемого электропривода?
- 3.15.4. Что такое угловая характеристика синхронного двигателя?
- 3.15.5. Способы ограничения тока при пуске СД.
- 3.15.6. За счет чего синхронный двигатель может компенсировать реактивную мощность в питающей сети?
- 3.15.7. Изобразить основные статические характеристики изучаемого электропривода и пояснить эти зависимости.
- 3.15.8. По каким критериям может происходить регулирование тока возбуждения синхронного двигателя?
- 3.15.9. Области применения синхронного электропривода.
- 3.15.10. Изобразить зависимости переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  при пуске, торможении, сбросе и набросе нагрузки.

### Список литературы

1. Быстрицкий Г.Ф. Энергосиловое оборудование промышленных предприятий: учебное пособие для вузов. 4-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 304 с.
2. Соколова Е.М. Электрическое и электромеханическое оборудование: общепромышленные механизмы и бытовая техника: учебное пособие для сред. проф. образования. – М.: Мастерство; Высшая школа, 2001. – 224 с.
3. Онищенко Г.Б. и др. Автоматизированный электропривод промышленных установок. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.

4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
5. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
6. Москаленко В.В. Электрический привод: учеб. пособие для студ. Учреждений сред. проф. образования. – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.
7. Электротехника: учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова.– Челябинск: Изд-во Ю-УрГУ, 2005. – 639 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ

### 4.1. Цель работы

– исследование рабочих характеристик: зависимости напора ( $H$ ), мощности ( $N$ ), коэффициент полезного действия ( $\eta$ ) от величины подачи ( $Q$ ) центробежного насоса;

– овладение методикой измерения расхода жидкости с помощью скоростного крыльчатого расходомера.

### 4.2. Оборудование стенда

Лабораторный стенд предназначен для изучения отдельных устройств, используемых при автоматизации водоснабжения, а также для проведения экспериментальных исследований систем автоматического регулирования (САР) по уровню и давлению.

Стенд смонтирован по модульному принципу и состоит из двух частей: электроавтоматики и гидроаппаратуры. Общий вид стенда представлен на рис. 4.1.

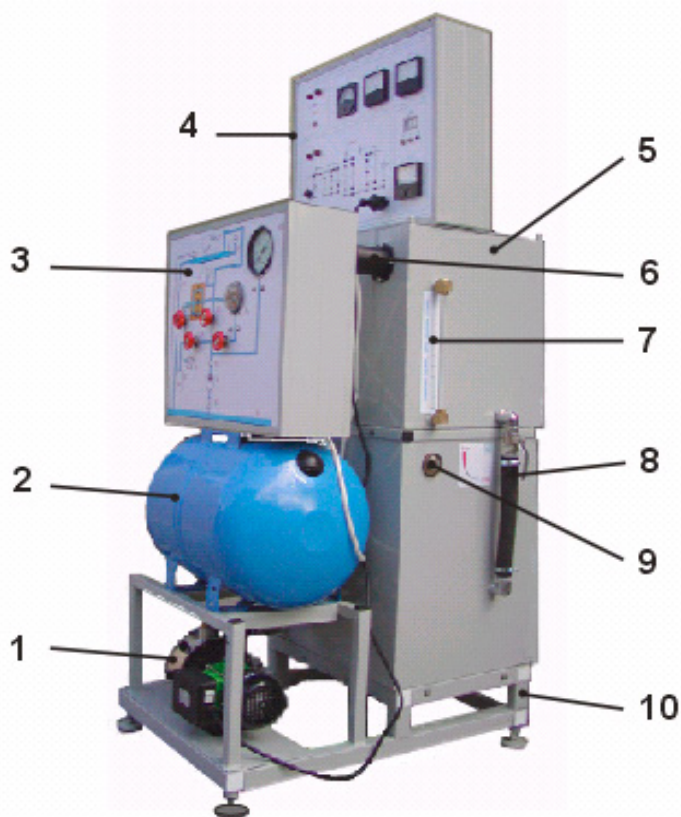


Рис. 4.1. Общий вид стенда

Стенд состоит из следующих основных устройств:

- 1 – насосная установка, в состав которой входят центробежный насос (Н) и однофазный приводной электродвигатель;
- 2 – пневматический бак (ПБ);
- 3 – модуль гидравлического управления (МГУ);
- 4 – модуль электрического управления;
- 5 – гидробак верхний (Б2);
- 6 – потенциометрический датчик уровня (ДУ);
- 7 – указатель уровня воды в верхнем гидробаке (УУ);
- 8 – гидробак нижний (Б1);
- 9 – указатель уровня воды в нижнем гидробаке (заменен на трубчатый указатель);
- 10 – рама стенда.

В скобках приведены обозначения устройств, принятые ниже на гидравлической схеме, изображенной на соответствующей панели.

Электропитание изделия осуществляется от однофазной сети напряжением  $\sim 220 \pm 22$  В и частотой  $50 \pm 0,5$  Гц.

Мощность потребляемая от сети, 1 кВт.

Габаритные размеры, мм 1470 x 1000 x 600.

Масса изделия, 95 кг.

Номинальная мощность электродвигателя ,600 Вт.

Тип насоса – КРМ 80.

Модули гидравлического и электрического управления, представляющие собой конструктивно законченные устройства, предназначены для регулирования, измерения регистрируемых величин и контроля за работой стенда.

На рис. 4.2 приведена гидравлическая схема стенда (эта же схема показана на передней панели модуля гидравлического управления). В корпусе модуля гидравлического управления установлены все устройства, которые на рис. 4.1 изображены внутри прямоугольника, выделенного штрихпунктирной линией.

Состав гидравлического модуля:

КО – клапан обратный;

РД – реле давления;

В1...В5 – вентили;

П – имитатор потребителей воды;

Т – датчик температуры;

РА – расходомер;

МН – манометр.

Обратный клапан в напорную линию насоса установлен с целью предотвращения утечек воды из пневматического бака ПБ через неработающий гидронасос Н в нижний гидробак Б1.

Вентиль В1 установлен во всасывающем трубопроводе, соединяющем нижний гидробак с насосом. Этот вентиль в процессе эксплуатации стенда всегда открыт. Закрывают вентиль при демонтаже насоса и проведении ремонтных работ. Вентиль В6 установлен в трубопроводе, соединяющем верхний и нижний гидробаки.

В дно верхнего гидробака (Б2) вварена труба перелива (гидролиния 1 на рис. 4.2) с большим внутренним диаметром. Перелив предусмотрен на высоте 0,26 м от дна (Б2). То есть максимальный уровень воды в верхнем гидробаке примерно 0,26 м. Вода из него через трубу перелива перетекает в нижний гидробак (Б1). Благодаря этому при любых ситуациях в нижнем гидробаке (Б2) всегда есть вода, что предотвращает выход из строя гидронасоса Н, так как работа насоса **всухую невозможна**.

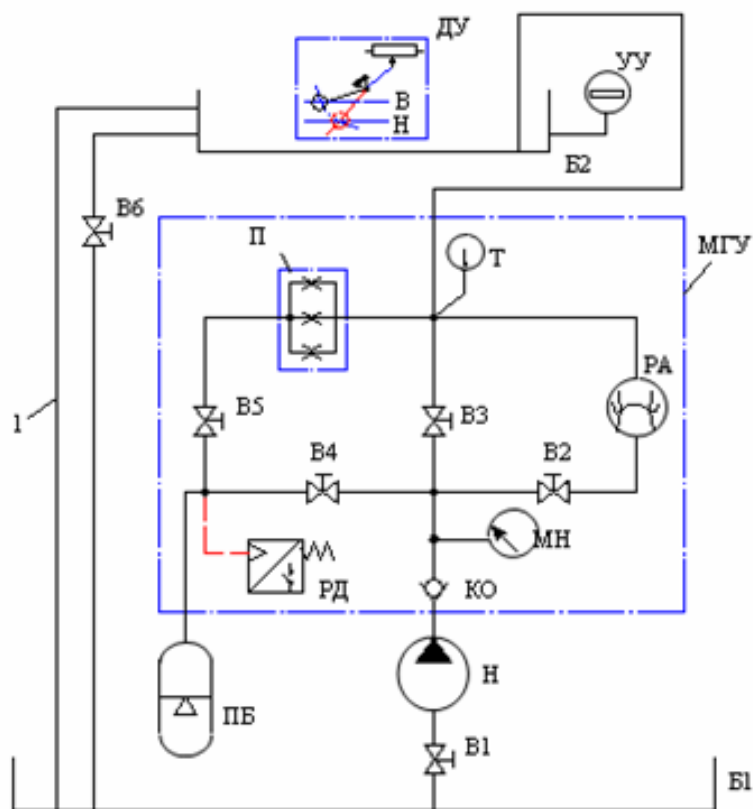


Рис. 4.2. Схема гидравлическая стенда

Электрическая схема стенда изображена на рис. 4.3 (схема также приведена на передней панели модуля электрического управления).



Состав электрического модуля:

ДУ – потенциометрический датчик уровня (установлен в Б2, поз. 6 на рис. 4.1);

ЭМП – электромагнитное реле;

РД – реле давления (установлено в корпусе модуля гидравлического управления);

ЭД – электродвигатель привода гидронасоса;

$R_H$  – сопротивление нагрузки;

A, V, W – амперметр, вольтметр, ваттметр соответственно;

HL2 – лампочка световой индикации.

В корпусе модуля электроавтоматики за лицевой панелью расположены платы автоматики, реле, силовой трансформатор.

На лицевой панели расположены измерительные приборы, сигнальные индикаторы, в том числе электронный секундомер:

– СЕК – цифровое табло секундомера (трехразрядное);

– Вкл., Счет, Сброс – кнопки управления секундомером (Вкл. – включение питания; Счет – включение и выключение секундомера; Сброс – сброс показаний цифрового табло).

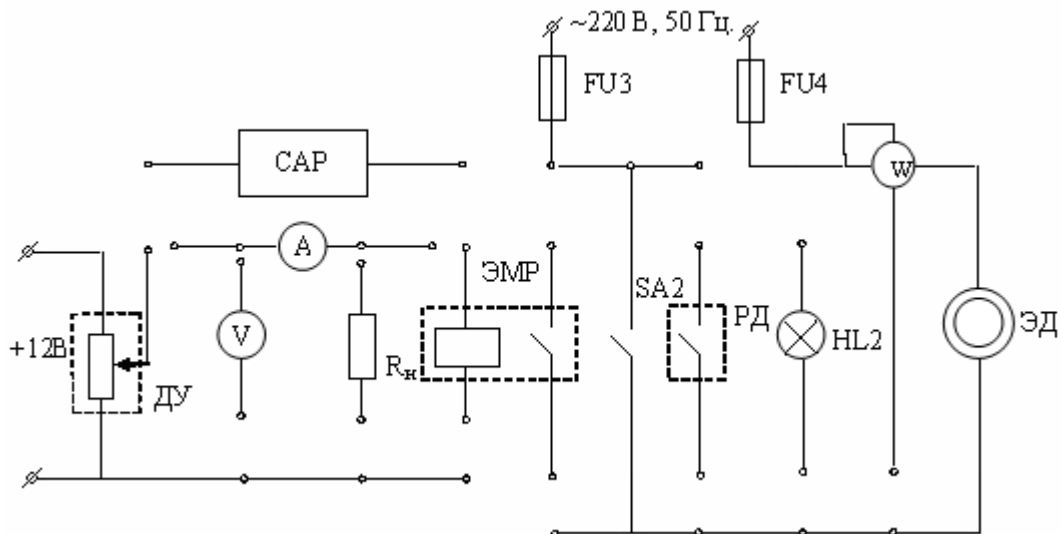


Рис. 4.3. Электрическая схема стенда

**Внимание:** при работе секундомера (когда идет подсчет времени) **запрещается нажимать** кнопку «Сброс».

В нижнем правом углу панели модуля электроавтоматики установлен прибор, регистрирующий температуру рабочей жидкости ( $T$ , °C).

В линиях питания электрической системы стенда (на входе) установлены предохранители FU1, FU2, FU3 и FU4, а также предусмотрена световая индикация исправности электрической схемы (HL1).

Структурирование электрической схемы стенда, которое необходимо выполнять перед началом каждой новой лабораторной работы,

осуществляется путем установки переключателей со штекерами в гнезда, расположенные на передней панели.

Установка переключателей производится в соответствии со схемой электрических соединений. Места установки переключателей на схемах отмечены «жирной» линией.

Включение питания стенда осуществляется путем установки тумблера «СЕТЬ» в верхнее положение. Тумблер расположен в верхнем левом углу передней панели модуля.

Напряжение питания – от электросети 220 В, 50 Гц. Напряжение питания потенциометрического датчика уровня – 12 В, ток постоянный.

**Перед началом работы на стенде необходимо:**

– Заправить нижний гидробак (Б1) водой. Для этого требуется снять крышку (с установленным на ней модулем электрического управления) верхнего гидробака (Б2) и через трубу перелива заполнить нижний гидробак. Заправка бака осуществляется до верхней отметки указателя уровня, установленного в нижнем гидробаке (позиция 9, рис. 4.1).

– Заземлить корпус стенда.

**Примечание:** указания по определению мощности.

У некоторых конструкций однофазных электродвигателей, мощность, потребляемая на холостом (или близком к нему) ходу превышает мощность, которая потребляется двигателем под нагрузкой. Это объясняется значительным ростом реактивной составляющей тока при малых нагрузках. Указанные процессы имеют место и на данном стенде (при увеличении давления в напорной линии насоса уменьшается потребляемая им из сети мощность). Поэтому при проведении экспериментов, в которых необходимо измерять мощность  $N_{эл}$  показания ваттметра  $W$  необходимо умножить на коэффициент  $\delta$  (безразмерный), определяемый из графика (рис. 4.4).

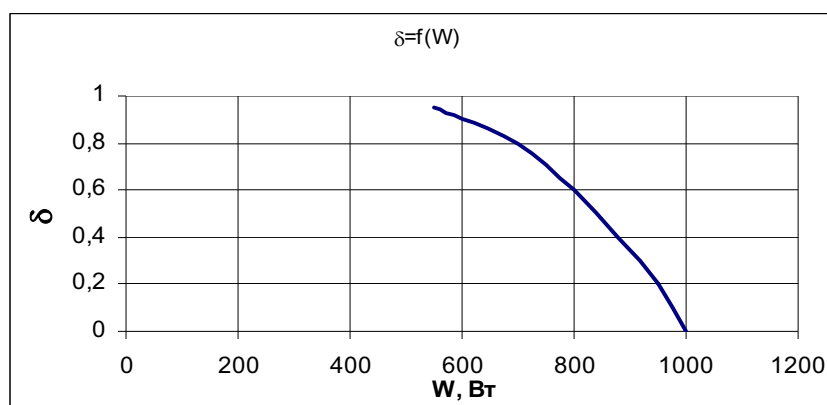


Рис. 4.4 . Зависимость потребляемой электродвигателем мощности  $W$  от величины нагрузки  $\delta$

### **4.3. Общие сведения**

#### **4.3.1. Изучение устройства, основных технических показателей и характеристик центробежного насоса**

Насосы – это гидравлические машины, предназначенные для создания напорного потока жидкой среды (напор – это энергетический показатель). Этот поток создается в результате силового воздействия на жидкость в проточной полости или рабочей камере насоса.

По характеру силового воздействия на жидкость различают насосы динамические и объемные.

В динамическом насосе силовое воздействие на жидкость осуществляется в проточной полости, постоянно сообщаемой со входом и выходом насоса.

В объемном насосе силовое воздействие на жидкую среду происходит в рабочей камере, периодически изменяющей свой объем и попеременно сообщаемой со входом и выходом насоса.

Динамические насосы не обладают свойством герметичности. При неподвижном рабочем колесе, которое устанавливается в проточной полости (то есть при неработающем насосе), жидкость практически беспрепятственно может перетекать со входа на выход и наоборот. Из-за негерметичности динамические насосы не способны развивать высокие давления. Но в связи с тем, что проточная полость у этих насосов постоянно сообщена со входом и выходом и жидкость подается непрерывным потоком, динамические насосы имеют (по сравнению с объемными) более высокие подачи. Также из-за негерметичности динамические насосы (если они не снабжены специальными устройствами) не обладают свойством самовсасывания. Это значит, что если насос установлен выше уровня жидкости в баке, из которого она засасывается, то в начальный момент, когда всасывающий трубопровод и насос заполнены воздухом, насос не способен создать разрежение, достаточное для подъема жидкости, и начать работу. В связи с этим перед включением динамический насос необходимо заливать жидкостью и удалять из него воздух.

Объемные насосы обладают свойствами герметичности, самовсасывания, способны создавать высокие давления. Если вытеснитель в рабочей камере имеет идеальное уплотнение, то такой насос способен создавать сколь угодно высокое давление. Но в связи с тем, что объемный насос постоянно работает в режиме переключения камер (каждая камера периодически подключается то к всасыванию, то к выходу насоса), он имеет по сравнению с динамическим насосом невысокую подачу.

Таким образом, динамические насосы способны обеспечивать высокие подачи при относительно невысоких давлениях. Объемные насосы, наоборот, обеспечивают высокие давления при относительно невысоких подачах.

При решении задач водоснабжения и водоотведения с целью механизации рабочих операций применяются чаще всего динамические насосы. Механизация рабочих операций создает предпосылки для последующей автоматизации управления этими процессами. При этом насос является важнейшей частью объекта регулирования, так как вносит существенный вклад в формирование характеристик объекта. Поэтому при автоматизации управления процессами водоснабжения и водоотведения актуальной является задача определения характеристик насоса.

К динамическим насосам относятся лопастные насосы, электромагнитные и насосы трения.

Лопастные насосы бывают двух типов: центробежные и осевые.

К насосам трения относятся вихревые, шнековые, дисковые, струйные насосы и др.

В области водоснабжения и водоотведения чаще всего используются центробежные насосы.

В центробежном насосе жидкость под действием центробежных сил перемещается через рабочее колесо от центра к периферии. Жидкость, отбрасываемая лопатками колеса, поступает в спиральный отвод и далее в напорный трубопровод. Спиральный отвод предназначен не только для улавливания жидкости, выходящей из рабочего колеса, но и для частичного преобразования ее кинетической энергии в потенциальную энергию давления.

Центробежные насосы классифицируют по следующим основным признакам:

- по направлению оси расположения, вращения или движения рабочих органов (горизонтальный, вертикальный);
- по расположению рабочих органов и конструкций опор (консольный, моноблочный, с выносными опорами, с внутренними опорами);
- по расположению входа в насос (с боковым входом, с осевым входом, двустороннего входа);
- по числу ступеней и потоков (одноступенчатый, двухступенчатый, многоступенчатый, однопоточный, двухпоточный, многопоточный).

На рис. 4.5 показан в разрезе центробежный насос (горизонтальный, консольного типа, с осевым входом, одноступенчатый, однопоточный).

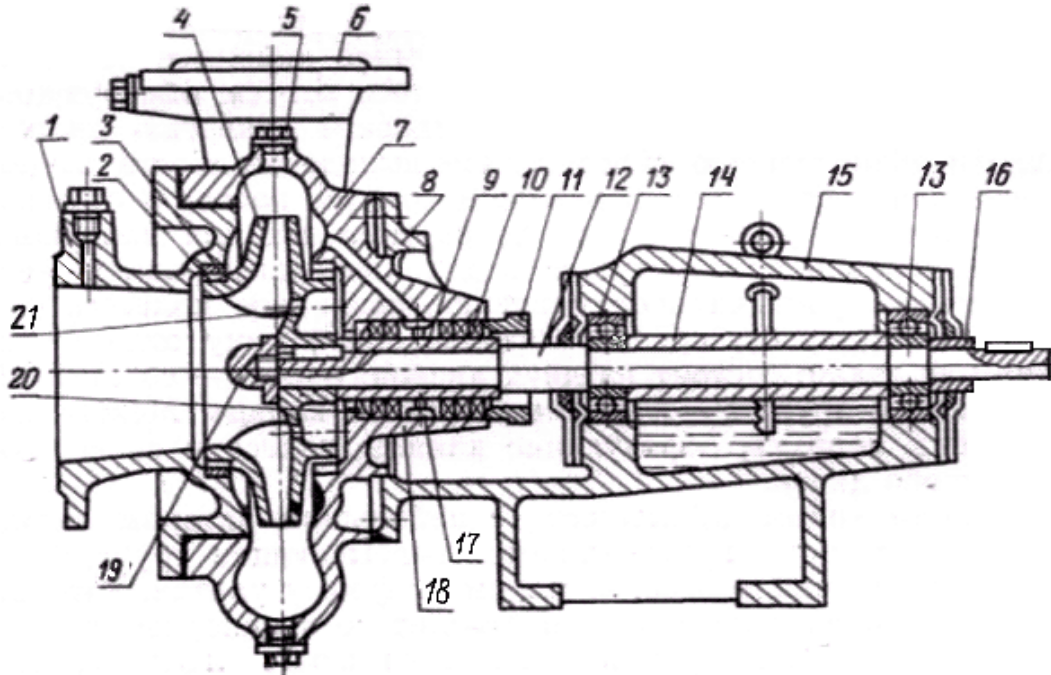


Рис. 4.5. Разрез центробежного насоса

Рабочее колесо 4 установлено на вал 12 с помощью шпонки. Для фиксации рабочего колеса в осевом направлении предназначена гайка 19. Вал установлен на двух подшипниках качения 13, которые смазываются жидкой смазкой (во многих конструкциях насосов подшипники смазываются консистентной смазкой). Уплотняющий узел насоса состоит из грундбуксы 20, набивки сальника 10, кольца гидравлического уплотнения 19 и крышки сальника 11. Грундбукса служит для предохранения от износа корпуса, в котором установлен уплотняющий узел. Грундбукса представляет собой бронзовое ступенчатое кольцо.

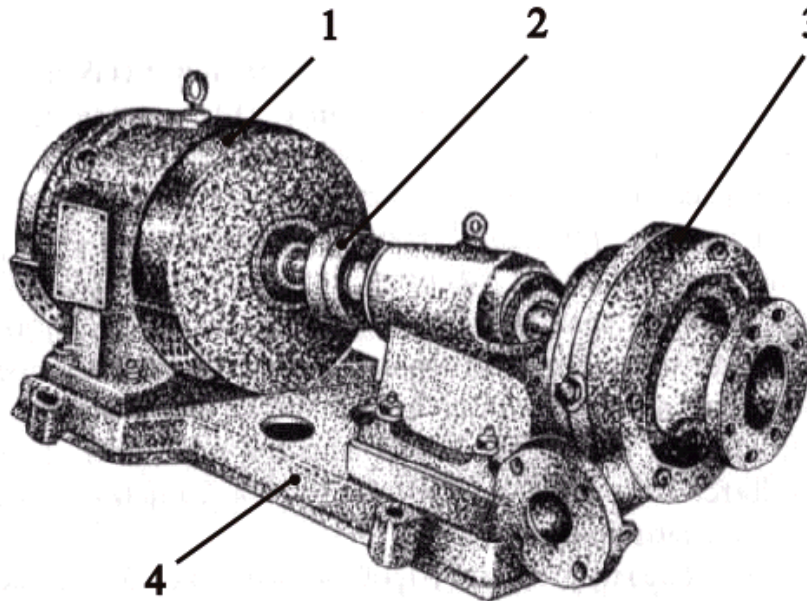


Рис. 4.6. Общий вид насосного агрегата

На рис. 4.6 показан общий вид насосного агрегата, состоящего из электродвигателя 1, соединительной муфты 2 и центробежного насоса 3, которые смонтированы на плите 4.

Для подачи воды (кроме морской) и других жидкостей, имеющих сходные с водой свойства по вязкости и химической активности, температурой до 85 °С, отечественной промышленностью выпускаются следующие типы насосов:

– консольные и консольно-моноблочные насосы типов К и КМ (горизонтальные, одноступенчатые, с рабочими колесами одностороннего входа);

– одноступенчатые насосы с двусторонним входом, с осевым разъемом корпуса типа Д;

– многоступенчатые секционные насосы типа ЦНС.

В соответствии с ГОСТом марки центробежных насосов включают:

– прописные буквы, указывающие тип насоса;

– цифры после букв, обозначающие подачу насоса, м<sup>3</sup>/ч;

– цифры после наклонной черты либо после дефиса, обозначающие напор насоса, м.

Например:

К 8/18 – консольный насос с одним рабочим колесом, односторонним входом жидкости, подачей 8 м<sup>3</sup>/ч и напором 18 м;

КМ 90/20 – моноблок-насос консольного типа, с подачей 90 м<sup>3</sup>/ч и напором 20 м;

Д200-95 – одноступенчатый насос с двусторонним входом жидкости, подачей 200 м<sup>3</sup>/ч и напором 95 м.

Работа насоса характеризуется следующими основными параметрами: подачей, напором, давлением, мощностью, КПД и частотой вращения.

Подача насоса  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) есть объем жидкости, проходящей в единицу времени через напорный (выходной) патрубок.

Она зависит от геометрических размеров проточной полости и рабочего органа и скорости его движения, а также от утечек жидкости внутри насоса между областями нагнетания и всасывания.

Как известно напор насоса  $H$  (м) – это удельная (приходящаяся на единицу веса) энергия, приобретаемая жидкостью при прохождении через насос. Напор насоса:

$$H = H_{\text{н}} - H_{\text{в}},$$

где  $H_{\text{н}}$  – напор на выходе (в напорном патрубке) насоса, м;  $H_{\text{в}}$  – напор на входе насоса, м.

Учитывая, что напор в любом сечении трубопровода равен сумме: геометрического  $z$ ;

пьезометрического  $\frac{p}{\rho \cdot g}$ ,

где  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;

скоростного  $\frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$ ,

где  $V$  – средняя скорость жидкости;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса;

напоров, можно записать

$$H = (z_{\text{н}} - z_{\text{в}}) + \frac{p_{\text{н}} - p_{\text{в}}}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_{\text{н}} \cdot V_{\text{н}}^2 - \alpha_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}}^2}{2 \cdot g}. \quad (4.1)$$

Индекс «н» относится к напорному патрубку (выходу насоса), «в» – к входному.

Давление насоса  $p$  определяется из выражения:

$$p = \rho \cdot g \cdot H. \quad (4.2)$$

Мощность насоса  $N$  есть мощность, потребляемая насосом:

$$N = M \cdot \omega, \quad (4.3)$$

где  $M$  – крутящий момент на валу насоса;  $\omega$  – угловая скорость вала насоса.

Полезная мощность насоса  $N_{\text{п}}$  – это мощность, приобретаемая жидкостью при прохождении ею насоса:

$$N_{\text{п}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H. \quad (4.4)$$

КПД насоса определяется отношением полезной мощности  $N_{\text{п}}$  к мощности насоса  $N$ :

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N}. \quad (4.5)$$

При проектировании насосных установок необходимо знать рабочие характеристики насоса, с тем чтобы обеспечить работу насоса в области максимальных значений КПД.

Рабочие характеристики центробежного насоса – это зависимости  $H = f_1(Q)$ ,  $N = f_2(Q)$  и  $\eta = f_3(Q)$ . Получают рабочие характеристики при постоянной частоте вращения вала насоса. Зависимость  $H = f_1(Q)$  называют главной характеристикой. Рабочие характеристики насоса, полученные при номинальной частоте вращения, именуется внешними.

Проводя испытания насоса при различных частотах вращения вала насоса, получают универсальную характеристику насоса, представляющую собой семейство зависимостей  $H = f(Q)$ , построенных при постоянных значениях КПД. Знание универсальной характеристики насоса особенно важно в тех случаях, когда привод насоса осуществляется от двигателя, имеющего переменную частоту вращения (двигателя внутреннего сгорания).

Для определения всасывающей способности насоса и условия возникновения кавитации проводят кавитационные испытания и строят кавитационные характеристики – зависимости  $H = f_1(H_V)$ ,  $Q = f_2(H_V)$  и  $\eta = f_3(H_V)$ , где  $H_V$  – вакуумметрическая высота всасывания насоса. Кавитационные характеристики определяют (как и рабочие) при постоянной частоте вращения вала насоса. Вакуумметрическая высота всасывания  $H_V = p_{\text{ВАК}} / (\rho \cdot g)$ , где  $p_{\text{ВАК}}$  – вакуумметрическое давление на входе насоса.

#### 4.3.2. Физическая сущность расхода, единицы и методы его измерения. Классификация и устройство расходомеров

Расход – это количество жидкости (газа), проходящей через живое сечение потока в единицу времени.

Различают объемный ( $Q$ ), весовой ( $Q_B$ ) и массовый ( $Q_M$ ) расходы. Единицы измерения этих расходов в системе СИ:  $Q$  – м<sup>3</sup>/с;  $Q_B$  – Н/с;  $Q_M$  – кг/с.

Чаще всего при выполнении расчетов используют объемный расход.

Весовой и массовый расходы связаны с объемным следующими зависимостями:

$$Q_B = \gamma \cdot Q; \quad Q_M = \rho \cdot Q, \quad (4.6)$$

где  $\gamma$  и  $\rho$  – удельный вес и плотность жидкости (газа) соответственно.

Наиболее простым способом измерения расхода (он используется в данной лабораторной работе) является объемный с помощью мерного бака. Суть его заключается в том, что измеряется время  $t$  прохождения через систему определенного объема жидкости  $W$ , которая поступает в мерный бак. Зная  $W$  и  $t$ , затем вычисляют объемный расход, который равен:

$$Q = \frac{W}{t}. \quad (4.7)$$

Измерение расхода может осуществляться с помощью сужающихся расходомеров. В качестве устройств, сужающих поток и создающих перепад давления, используются диафрагмы, сопла, трубы Вентури и др.

На рис. 4.7 показана схема сужающего расходомера. В качестве сужающего устройства здесь применена диафрагма. Расход через диа-



фрагму тем больше, чем больше падение напора  $\Delta H$  (или давления) на диафрагме.

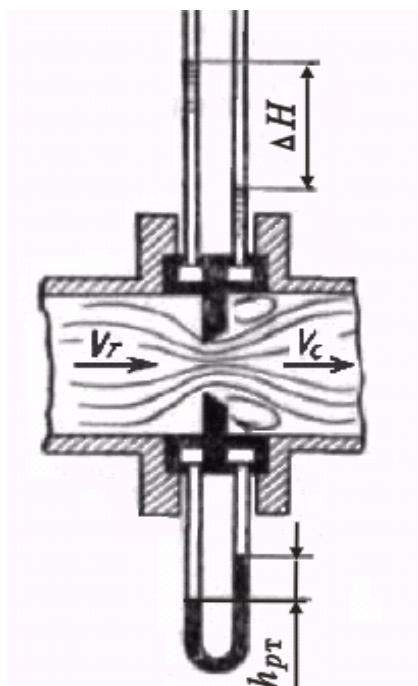


Рис. 4.7. Схема сужающего расходомера

На практике наиболее широкое применение для измерения расхода находят механические расходомеры-счетчики, которые бывают двух типов: объемные и скоростные.

Принцип действия объемных расходомеров основан на попеременном заполнении и опорожнении рабочей камеры. Число заполнений или опорожнений, подсчитываемое с помощью специальных устройств (механических, электрических), характеризует расход через систему. Достоинством объемных расходомеров является высокая точность измерения: максимальная относительная погрешность не превышает 1 %%. Недостаток – громоздкость и сложность конструкций, а для некоторых расходомеров – невозможность применения для загрязненных жидкостей.

Объемные расходомеры бывают следующих типов: дисковые, поршневые, шестеренные, кольцевые и лопастные.

Для измерения расхода воды чаще всего применяют скоростные расходомеры.

Принцип действия скоростных расходомеров основан на том, что жидкость, протекающая через прибор, приводит во вращение крыльчатку или вертушку, частота вращения которой пропорциональна скорости потока и, следовательно, расходу. Ось крыльчатки или вертушки посредством передаточных механизмов соединена со счетчиком.

Скоростные расходомеры по конструкции проще объемных, но обладают меньшей точностью измерений. Максимальная относительная погрешность измерений может достигать 2...3 %.

По конструктивному признаку скоростные расходомеры разделяются на две основные группы: крыльчатые расходомеры, ось вращения крыльчатки которых перпендикулярна направлению движения жидкости, и турбинные (аксиальные) расходомеры, у которых ось вращения вертушки (турбинки) параллельна направлению движения жидкости.

Крыльчатые расходомеры могут быть одноструйными и многоструйными. Основными элементами крыльчатого одноструйного расходомера (рис. 4.8) являются: крыльчатка 1, камера крыльчатки 2, агатовый подшипник 3, входной патрубок 4, редуктор 5, механизм счетчика 6, циферблат 7, крышка циферблата 8, корпус 9, сальник 10, лопасть регулятора 11.

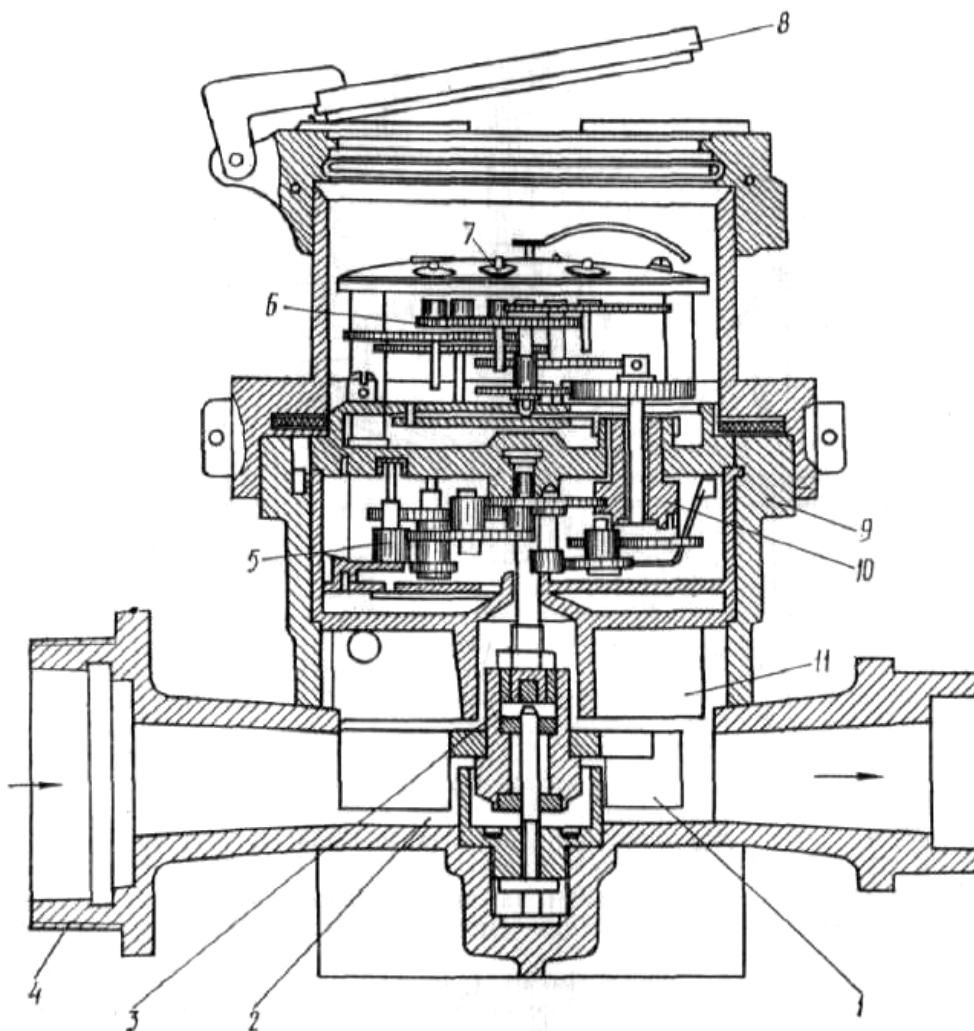


Рис. 4.8. Крыльчатый расходомер

К основным элементам турбинного расходомера рис. 4.9 относятся: вертушка 1, корпус 2, лопасть регулятора 3, струевыпрямитель 4, редуктор 5, механизм счетчика 6, большая стрелка 7, малые стрелки 8, крышка стекла 9, ось червячной шестерни 10, винт с агатом 11, червячный винт 12.

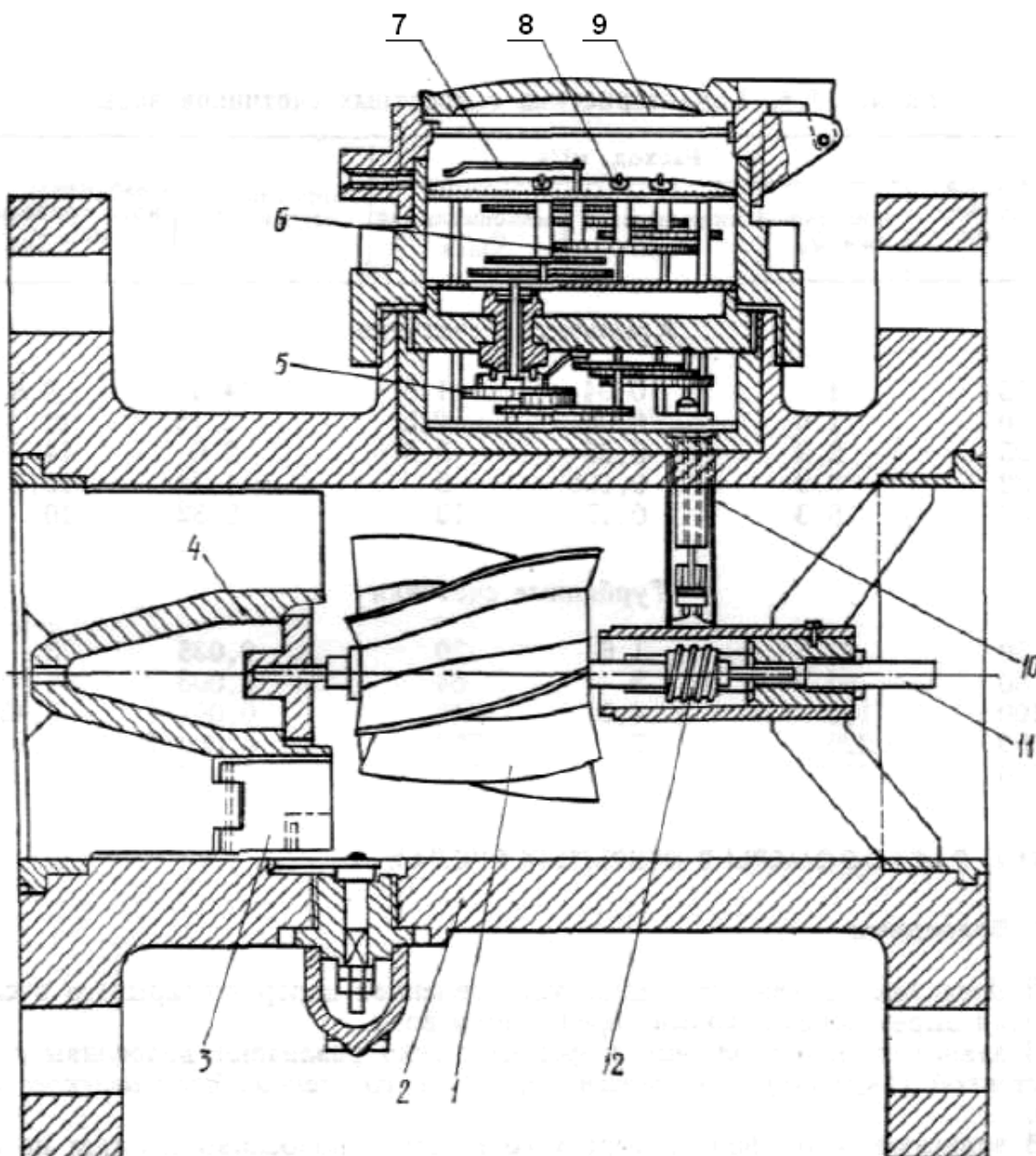


Рис. 4.9. Турбинный расходомер

Скоростные расходомеры-счетчики применяются для учета количества воды, расходуемой в системах водоснабжения. Подбор счетчиков воды, предназначенных для установки в водопроводных сетях, производится чаще всего по максимальному суточному расходу.

При измерении расхода необходимо фиксировать мгновенное значение расхода или расход жидкости за определенный период времени, т. е. интегральную величину расхода. Эти показатели позволяют определить мгновенное значение расхода устройства, изображенного на рис. 4.7.

Скоростные же расходомеры, приведенные на рис. 4.8 и 4.9, являются расходомерами интегрирующего типа. Для определения с их помощью расхода в единицу времени необходимо использовать секундомер. Так же определяется расход и с помощью мерного бака.

#### 4.4. Подготовка установки к работе по снятию рабочих характеристик центробежного насоса.

##### Электрическая схема соединений установки

Описание экспериментальной установки приведено в разделе 4.2.

Объектом испытания является центробежный насос типа КРМ-80. Привод насоса осуществляется от однофазного двигателя (напряжение питания 220 В).

Перед включением установки необходимо:

– С помощью переключек со штекерами обеспечить схему электрических соединений в соответствии с рис. 4.10 (на передней панели модуля электрического управления).

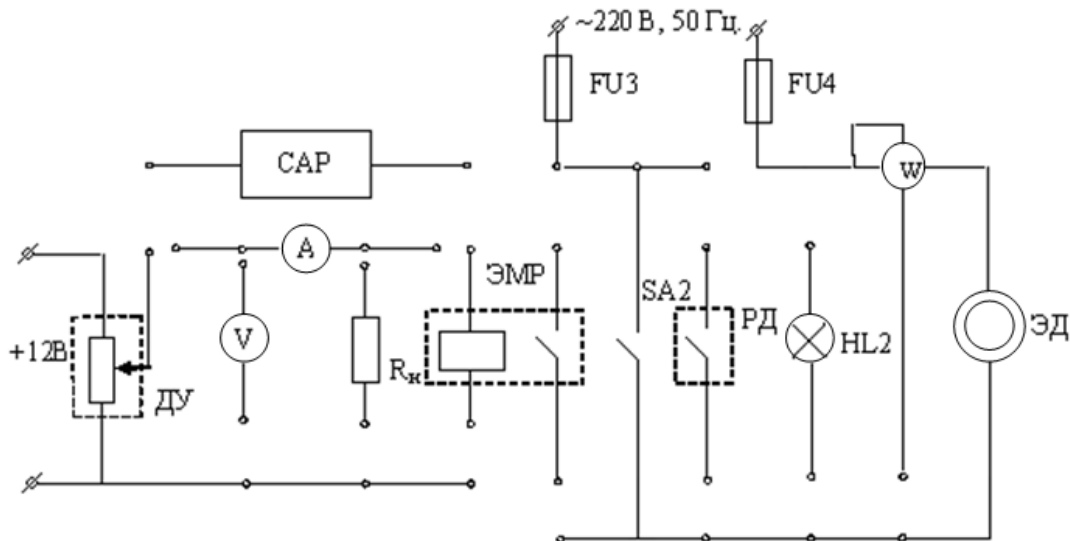


Рис. 4.10. Схема электрических соединений панели модуля электрического управления для снятия характеристик центробежного насоса

– На модуле гидравлического управления закрыть вентили В3, В4 и В5 (закрытие вентиля осуществляется путем вращения маховичка управления по часовой стрелке). Вентиль В2 необходимо открыть (при управлении вентилями рекомендуется не прикладывать больших усилий).

– Открыть вентиль В6 (в открытом положении рукоятка вентиля перпендикулярна оси трубопровода).

#### 4.5. Подготовка установки к работе по измерению расхода жидкости. Электрическая схема соединений установки

Описание экспериментальной установки приведено в разделе 4.2.

Объектом испытания является скоростной крыльчатый расходомер, мерный бак с указателем уровня (в качестве мерного бака используется верхний гидробак). На стенде предусмотрена возможность определения расхода двумя способами.

Перед включением установки необходимо:

– С помощью переключателей со штекерами обеспечить схему электрических соединений в соответствии с рис. 4.11 (на передней панели модуля электрического управления).

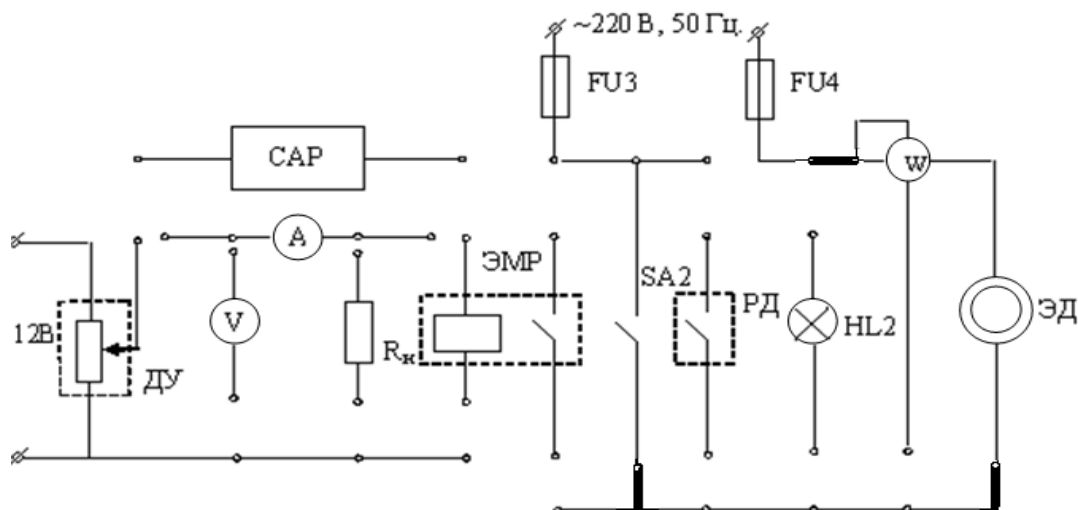


Рис. 4.11. Схема электрических соединений панели модуля электрического управления для измерения расхода жидкости

– На модуле гидравлического управления закрыть вентили В3, В4 и В5 (закрытие вентиля осуществляется путем вращения маховичка управления по часовой стрелке). Вентиль В2 необходимо открыть (при управлении вентилями рекомендуется не прикладывать больших усилий).

– Закрыть вентиль В6 (в закрытом положении рукоятка вентиля перпендикулярна оси трубопровода).

– Включить на модуле электрического управления питание электронного секундомера (нажать кнопку «ВКЛ.»).

#### 4.6. Программа экспериментов

По снятию рабочих характеристик центробежного насоса:

– проверка работоспособности стенда;

– снятие внешней главной характеристики насоса  $H = f(Q)$ ;

– снятие внешних рабочих характеристик насоса  $N = f(Q)$  и  $\eta = f(Q)$ ;

– снятие рабочей характеристики насоса при изменении частоты вращения эл. двигателя  $H = f(Q)$ ;

– снятие рабочих характеристик насоса при изменении частоты вращения эл. двигателя  $N = f(Q)$  и  $\eta = f(Q)$ .

По изменению расхода жидкости:

– проверка работоспособности стенда;

– определение объемного расхода воды ( $Q$ ) по показаниям объема жидкости ( $W$ ), проходящей через систему за фиксированную величину времени  $t$ ;

– двукратное повторение вышеназванного опыта.

#### 4.7. Методика снятия рабочих характеристик (зависимости напора от величины подачи $H = f(Q)$ , мощности насоса от величины подачи $N = f(Q)$ , КПД насоса от величины подачи $\eta = f(Q)$ центробежного насоса)

После выполнения условий пункта 4.4 необходимо:

– Включить электрическое питание стенда. Для этого тумблер «СЕТЬ» на модуле электрического управления установить в верхнее положение. Насос запустить тумблером SA2.

– Провести экспериментальные исследования по определению рабочих характеристик насоса. В начале, вращая по стрелке вентиль В2, определить максимальное давление, которое развивает насос (по манометру МН).

– Затем, разбив диапазон изменения давления насоса на 5 интервалов, провести 6 опытов. В каждом опыте давление должно быть постоянным. Первый опыт следует начать с минимального давления насоса.

**ВНИМАНИЕ:** Запрещается продолжительное время (более 30с) работать при максимальных давлениях, т. к. в этом случае может не быть протока воды через насос (это видно по расходомеру, стрелка которого в этом случае не движется). Отсутствие протока воды может приводить к перегреву насоса.

В каждом опыте необходимо измерять:

- Давление на выходе насоса  $P_H$  (по манометру);
- Время  $t$  прохождения через расходомер объема воды  $W$  (объемом необходимо задаваться, принимая например,  $W=0,01\text{ м}^3$  или  $10\text{ дм}^3$ );
- Мощность  $N_{Эл}$ , подводимую к электродвигателю (по ваттметру), при определении мощности показания ваттметра необходимо умножить на 100, тогда мощность будет выражаться в ваттах. Результаты измерений занести в табл. 4.1.

– После проведения всех опытов необходимо отключить электрическое питание стенда и снять перемычки со штекерами с модуля электрического управления.

При обработке результатов исследований приняты следующие допущения:

– давление на входе насоса ( $p_B$ ) принято равным атмосферному давлению (оснований для такого допущения два: наличие подпора жидкости на входе в насос, поскольку уровень воды в нижнем баке выше уровня расположения насоса; сравнительно низкие потери давления во всасывающем трубопроводе);

– вертикальные координаты на входе и выходе насоса равны, то есть  $z_H = z_B$  (не учитывается вертикальный размер насоса);

– средние скорости течения жидкости на входе и выходе насоса равны, то есть  $V_H = V_B$ .

Выражение для определения искомых величин:

– подача насоса

$$Q = \frac{W}{t};$$

– мощность насоса

$$N = N_{Эл} \cdot \eta_{Эл}$$

где  $\eta_{Эл} = 0,5$ ;

– напор насоса

$$H = \frac{P_H}{\rho \cdot g},$$

где  $p_H$  вычисляется в паскалях ( $1 \text{ кгс/см}^2 = 10^5 \text{ Па}$ );

– полезная мощность насоса

$$N_{П} = P_{П} \cdot Q;$$

– КПД насоса

$$\eta = \frac{N_{П}}{N}.$$

Результаты вычислений занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Измеряемые величины \ Номер опыта	1	2	3	4	5	6
Давление на выходе насоса, $p_H$ (кгс/см <sup>2</sup> )						
Объем воды, проходящей через расходомер, $W$ (м <sup>3</sup> )						
Время прохождения объема, $t$ (с)						
Мощность на входе электродвигателя, $N_{Эл}$ (Вт)						
Подача насоса, $Q$ (м <sup>3</sup> /с)						
Мощность насоса, $N$ (Вт)						
Напор насоса, $H$ (м)						
Полезная мощность насоса, $N_{П}$ (Вт)						
КПД насоса, $\eta$ (-)						

Привести пример расчета.

По данным табл. 4.1 построить зависимости:

- внешнюю и главную характеристики насоса  $H = f(Q)$ ;
- внешние рабочие и рабочие характеристики насоса  $N = f(Q)$  и  $\eta = f(Q)$ .

#### 4.8. Методика измерения расхода жидкости

После выполнения условий пункта 4.5 необходимо:

– Включить электрическое питание стенда. Для этого тумблер «СЕТЬ» на модуле электрического управления необходимо установить в верхнее положение. Запустить насос тумблером SA2. При этом насос начнет подавать воду в верхний бак стенда.

– Когда уровень воды в стеклянной трубке указателя, установленного на боковой поверхности верхнего бака (поз.7, рис. 4.1), совпадет с нижней меткой шкалы, необходимо нажать кнопку «Счет» управления секундомером. Когда уровень воды в указателе поднимется на 30 делений, следует выключить (остановить) секундомер, нажав для этого повторно кнопку «Пуск». Затем с табло секундомера снять время  $t_0$  (время заполнения верхнего бака на 30 делений). Результат измерения записать в табл. 4.2. После чего нажать кнопку «Сброс» (обнуление табло).

– Используя секундомер и скоростной расходомер (установлен на панели модуля гидравлического управления), определить время  $t$  прохождения через скоростной расходомер объема воды  $W$  (объемом необходимо задаться, приняв, например,  $W = 0,020 \text{ м}^3$  (20 дм<sup>3</sup>)).



– Опыты по пунктам 2 и 3 повторить трижды. Каждый раз перед началом выполнения пункта 2 необходимо выключать насос и сливать воду из верхнего бака в нижний. Для слива воды необходимо открывать вентиль 6. Результаты испытаний занести в табл. 4.2.

– После обработки результатов исследований и определения  $C_{CP}$  необходимо при различных значениях расхода (расход изменяется при изменении давления в напорной линии насоса путем воздействия на вентиль В2) провести опыты по определению расхода воды в верхний бак с помощью мерного бака, а также с помощью скоростного расходомера (количество опытов указывает преподаватель).

– По окончании проведения всех опытов необходимо отключить электрическое питание стенда и снять перемычки со штекерами с модуля электрического управления.

Выражения для определения искомых величин:

– расход воды (по скоростному расходомеру)

$$Q = \frac{W}{t};$$

– объем воды, содержащейся в верхнем баке между нулевым и тридцатым делениями указателя уровня

$$W_6 = Q \cdot t_6;$$

– цена деления указателя уровня

$$C = \frac{W_6}{K},$$

где  $K$  – число делений ( $K = 30$ ).

Результаты вычислений занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Измеряемые величины	Номер опыта		
	1	2	3
Время заполнения верхнего бака (от нижней метки шкалы до верхней), $t_6$ (с)			
Объем воды, проходящей через скоростной расходомер, $W$ ( $\text{м}^3$ )			
Время прохождения объема $W$ , $t$ (с)			
Расход воды, $Q$ ( $\text{м}^3/\text{с}$ )			
Объем воды, поступившей в верхний бак за время $t_6$ , $W_6$ ( $\text{м}^3$ )			
Цена деления указателя уровня верхнего бака, $C$ ( $\text{дм}^3/\text{дел}$ )			

Привести пример расчета.

После определения цены деления в каждом опыте необходимо вычислить среднее арифметическое цены деления  $C_{CP}$ .

#### 4.9. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общий вид и электрическая схема стенда с краткими пояснениями.
3. Таблица опытных данных и характеристики:  
 $H = f(Q)$  для всех опытов на одном графике;  $N = f(Q)$  для всех опытов на другом графике;  $\eta = f(Q)$  для всех опытов на третьем графике.
4. Таблица опытных данных и величина среднего арифметического цены деления  $C_{\text{ср}}$  указателя уровня.
5. Краткие выводы.

#### 4.10. Контрольные вопросы

- 4.10.1. Назначение и классификация гидронасосов, достоинства и недостатки динамических и объемных насосов.
- 4.10.2. Основные технические показатели и характеристики насосов.
- 4.10.3. Устройство, принцип работы, классификация, обозначения, область применения центробежных насосов.
- 4.10.4. Основные характеристики центробежных насосов.
- 4.10.5. Понятие расхода, единицы измерения.
- 4.10.6. Методы измерения расхода жидкости.
- 4.10.7. Классификация расходомеров.
- 4.10.8. Устройство скоростных расходомеров.
- 4.10.9. Основные параметры для определения расхода жидкости с помощью мерного бака и скоростного расходомера.

#### Список литературы

1. Калицун В.И. и др. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учеб. пособие для вузов / В.И. Калицун, В.С. Кедров, Ю.М.Ласков. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 2000. – 397 с.
2. Кедров В.С. и др. Водоснабжение и канализация: учебник для вузов / В.С. Кедров, П.П. Пальгунов, М.А. Сомов. – М.: Стройиздат, 1984. – 288 с.
3. Прозоров И.В. и др. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учеб. пособие для строительных специальностей вузов / И.В. Прозоров, Г.И. Николадзе, А.В. Минаев. – М.: Высш.школа, 1990. – 448 с.
4. Калицун В.И. Основы водоснабжения и канализации: учеб. пособие для техникумов; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1977. – 207 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДДЕРЖАНИЯ УРОВНЯ И ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОЙ СРЕДЫ

### 5.1. Цель работы

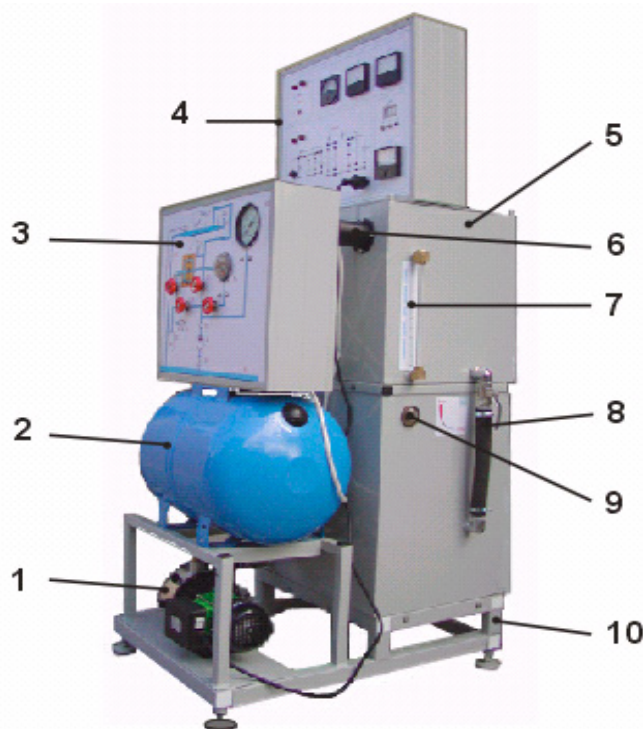
– исследование системы авторегулирования по уровню, применяемого в водоснабжении с построением графической зависимости потребляемой энергии ( $A$ ) от величины среднего расхода воды ( $Q_{cp}$ );

– исследование системы авторегулирования по давлению, применяемого в водоснабжении с построением графической зависимости потребляемой энергии ( $A$ ) от величины среднего расхода воды ( $Q_{cp}$ ).

### 5.2. Оборудование стенда

Лабораторный стенд предназначен для изучения отдельных устройств, используемых при автоматизации водоснабжения, а также для проведения экспериментальных исследований систем автоматического регулирования (САР) по уровню и давлению.

Стенд смонтирован по модульному принципу и состоит из двух частей: электроавтоматики и гидроаппаратуры. Общий вид стенда представлен на рис. 5.1.



*Рис. 5.1. Общий вид стенда*

Стенд состоит из следующих основных устройств:

- 1 – насосная установка, в состав которой входят центробежный насос (Н) и однофазный приводной электродвигатель;
- 2 – пневматический бак (ПБ);
- 3 – модуль гидравлического управления (МГУ);
- 4 – модуль электрического управления;
- 5 – гидробак верхний (Б2);
- 6 – потенциометрический датчик уровня (ДУ);
- 7 – указатель уровня воды в верхнем гидробаке (УУ);
- 8 – гидробак нижний (Б1);
- 9 – указатель уровня воды в нижнем гидробаке (заменен на трубчатый указатель);
- 10 – рама стенда.

В скобках приведены обозначения устройств, принятые ниже на гидравлической схеме, изображенной на соответствующей панели.

Электропитание изделия осуществляется от однофазной сети напряжением  $\sim 220 \pm 22$  В и частотой  $50 \pm 0,5$  Гц.

Мощность потребляемая от сети, 1 кВт.

Габаритные размеры, мм 1470 x 1000 x 600.

Масса изделия, 95 кг.

Номинальная мощность электродвигателя ,600 Вт.

Тип насоса – КРМ 80.

Модули гидравлического и электрического управления, представляющие собой конструктивно законченные устройства, предназначены для управления, измерения регистрируемых величин и контроля за работой стенда.

На рис. 5.2 приведена гидравлическая схема стенда (эта же схема показана на передней панели модуля гидравлического управления). В корпусе модуля гидравлического управления установлены все устройства, которые на рис. 5.1 изображены внутри прямоугольника, выделенного штрихпунктирной линией.

Состав гидравлического модуля:

КО – клапан обратный;

РД – реле давления;

В1...В5 – вентили;

П – имитатор потребителей воды;

Т – датчик температуры;

РА – расходомер;

МН – манометр.

Обратный клапан в напорную линию насоса установлен с целью предотвращения утечек воды из пневматического бака ПБ через неработающий гидронасос Н в нижний гидробак Б1.

Вентиль В1 установлен во всасывающем трубопроводе, соединяющем нижний гидробак с насосом. Этот вентиль в процессе эксплуатации стенда всегда открыт. Закрывают вентиль при демонтаже насоса и проведении ремонтных работ. Вентиль В6 установлен в трубопроводе, соединяющем верхний и нижний гидробаки.

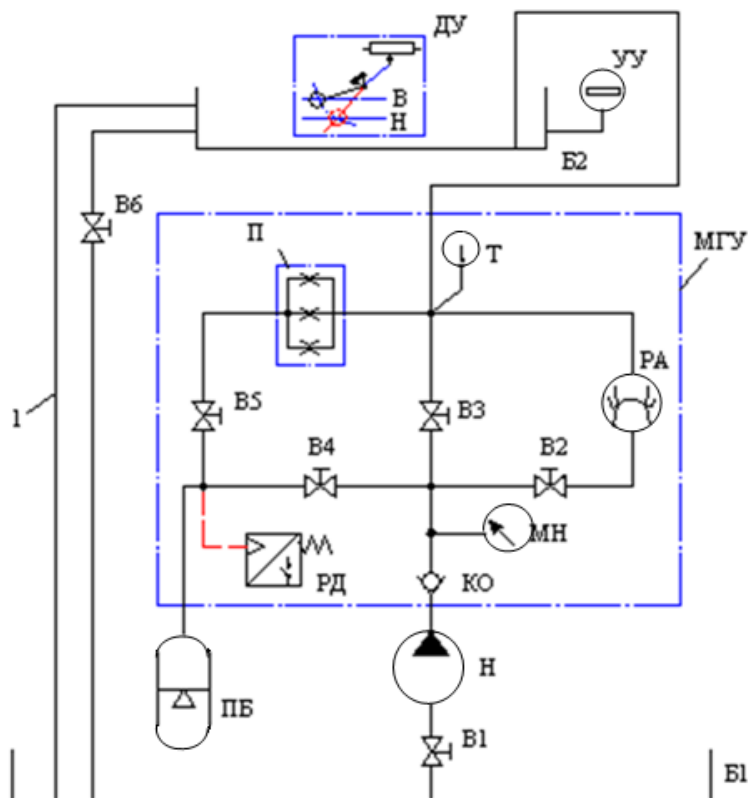


Рис. 5.2. Схема гидравлическая стенда

В дно верхнего гидробака (Б2) вварена труба перелива (гидролиния 1 на рис. 5.2) с большим внутренним диаметром. Перелив предусмотрен на высоте 0,26 м от дна (Б2). То есть максимальный уровень воды в верхнем гидробаке примерно 0,26 м. Вода из него через трубу перелива перетекает в нижний гидробак (Б1). Благодаря этому при любых ситуациях в нижнем гидробаке (Б2) всегда есть вода, что предотвращает выход из строя гидронасоса Н, так как работа насоса **всухую невозможна**.

Электрическая схема стенда изображена на рис. 5.3 (схема также приведена на передней панели модуля электрического управления).

Состав электрического модуля:

ДУ – потенциометрический датчик уровня (установлен в Б2, поз. 6 на рис. 4.1);

ЭМП – электромагнитное реле;

РД – реле давления (установлено в корпусе модуля гидравлического управления);

ЭД – электродвигатель привода гидронасоса;

$R_H$  – сопротивление нагрузки;

A, V, W – амперметр, вольтметр, ваттметр соответственно;

HL2 – лампочка световой индикации.

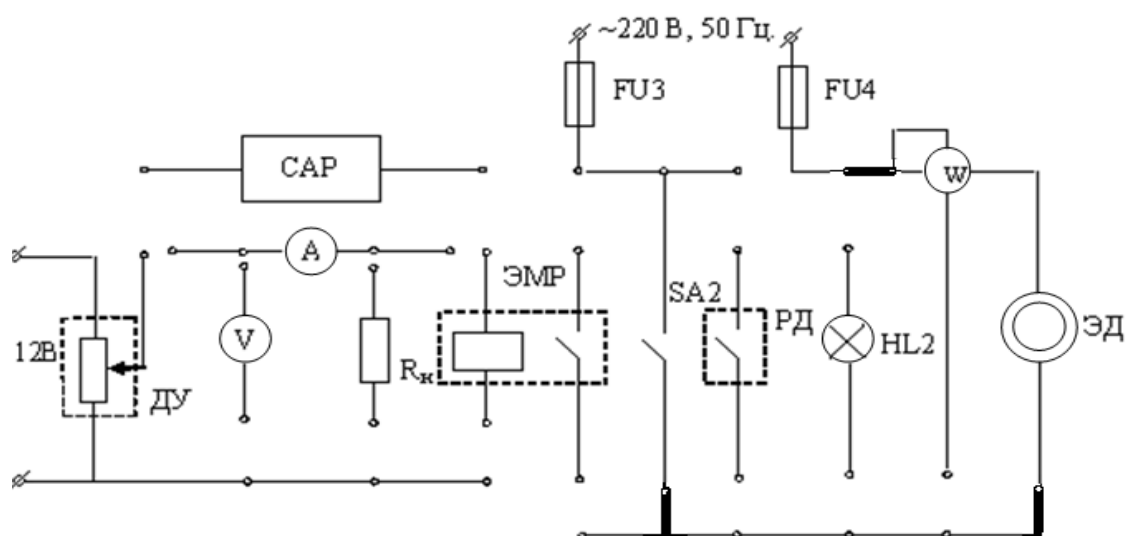


Рис. 5.3. Электрическая схема стенда

В корпусе модуля электроавтоматики за лицевой панелью расположены платы автоматики, реле, силовой трансформатор.

На лицевой панели расположены измерительные приборы, сигнальные индикаторы, в том числе электронный секундомер:

– СЕК – цифровое табло секундомера (трехразрядное);

– Вкл., Счет, Сброс – кнопки управления секундомером (Вкл. – включение питания; Счет – включение и выключение секундомера; Сброс – сброс показаний цифрового табло).

**Внимание:** при работе секундомера (когда идет подсчет времени) запрещается нажимать кнопку «Сброс».

В нижнем правом углу панели модуля электроавтоматики установлен прибор, регистрирующий температуру рабочей жидкости (Т, °С).

В линиях питания электрической системы стенда (на входе) установлены предохранители  $FU1$ ,  $FU2$ ,  $FU3$  и  $FU4$ , а также предусмотрена световая индикация исправности электрической схемы ( $HL1$ ).

Структурирование электрической схемы стенда, которое необходимо выполнять перед началом каждой новой лабораторной работы, осуществляется путем установки перемычек со штекерами в гнезда, расположенные на передней панели.

Установка перемычек производится в соответствии со схемой электрических соединений. Места установки перемычек на схемах отмечены «жирной» линией.

Включение питания стенда осуществляется путем установки тумблера «СЕТЬ» в верхнее положение. Тумблер расположен в верхнем левом углу передней панели модуля.

Напряжение питания – от электросети 220В, 50Гц. Напряжение питания потенциометрического датчика уровня – 12В, ток постоянный.

**Перед началом работы на стенде необходимо:**

1. Заправить нижний гидробак (Б1) водой. Для этого необходимо снять крышку (с установленным на ней модулем электрического управления) верхнего гидробака (Б2) и через трубу перелива заполнить нижний гидробак. Заправка бака осуществляется до верхней отметки указателя уровня, установленного в нижнем гидробаке (поз. 9, рис. 5.1).

2. Заземлить корпус стенда.

### 5.3. Общие сведения

Как известно, система автоматического регулирования есть совокупность взаимодействующих в процессе работы элементов, предназначенных для поддержания значения регулируемой величины (координаты) в заданных пределах.

На рис. 5.4 представлена функциональная схема САР с регулированием по отклонению. Система состоит из объекта регулирования ОР, регулятора Р и цепи обратной связи с регулятором РОС.

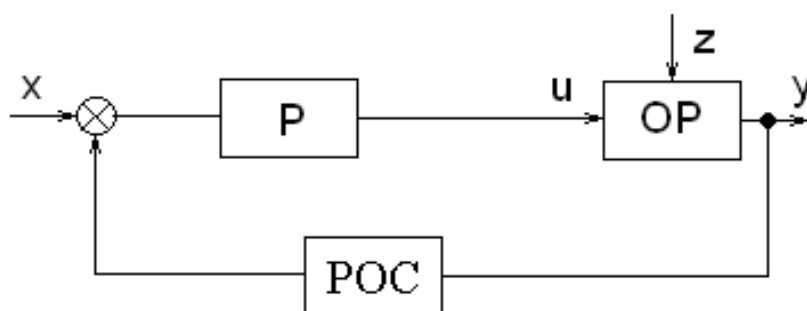


Рис. 5.4. Функциональная схема САР по отклонению

Все воздействия, приложенные к элементам системы, можно разделить на внешние и внутренние.

Внешние воздействия, в свою очередь, делятся на возмущающие  $z$  и задающие  $x$ . Возмущающие воздействия приложены к объекту регулирования ОР. Внешние воздействия на САР часто называют входными величинами.

Величина, по которой осуществляется регулирование, является регулируемой или выходной величиной (обозначена на рис. 5.5 буквой « $y$ »).

В приведенной схеме авторегулирования реализуется принцип регулирования по отклонению, так как алгоритм регулирования формируется в зависимости от отклонения регулируемой величины  $y$  относительно заданного ее значения  $x$ . Управляющее воздействие формируется только при условии  $\Delta = x - y \neq 0$ , то есть при возникновении отклонения  $\Delta$ . В этом случае:

$$u = f(x - y). \quad (5.1)$$

Для измерения отклонения  $\Delta$  и формирования управляющего воздействия  $u$  в схему (рис. 5.4) введена обратная связь. Для рассматриваемой САР обратная связь является отрицательной, как видно из формулы (5.1), регулируемая величина  $y$  и управляющее воздействие  $u$  – величины, противоположные по знаку.

Преимуществом принципа регулирования по отклонению является то, что управляющее воздействие формируется только после того, как возникнет ошибка  $\Delta = x - y$  в выполнении заданного алгоритма функционирования системы.

На стенде имеется возможность проводить экспериментальные исследования двух типов наиболее распространенных в водоснабжении САР с регулированием по отклонению (уровня и давления).

Системы авторегулирования по уровню в водоснабжении применяются в основном в сельской местности. Основным отличительным признаком такого типа систем является наличие водонапорной башни.

САР с регулированием по давлению находят применение, в основном, в городах. В этом случае резервуары с водой не возвышаются над зданиями, а как правило, их располагают ниже уровня поверхности земли. Для создания избыточного давления используются компрессоры, с помощью которых подается воздух в резервуары с водой.

В последнее время система автоматического регулирования по давлению находят применение в водоснабжении отдельных потребителей (коттеджей, дачных участков и т. д.).



#### 5.4. Экспериментальная установка САР по уровню жидкой среды

Описание экспериментальной установки приведено в разделе 5.2. Объектом исследования в данной лабораторной работе является САР по уровню жидкости.

Объектом регулирования (ОР) является верхний гидробак Б2 стенда, который имитирует водонапорную башню (рис. 5.1 и 5.2). При открытии вентиля В6 вода начинает перетекать из верхнего бака Б2 в нижний Б1, тем самым имитируется забор воды из водонапорной башни потребителями. Расход воды из верхнего бака является возмущающим воздействием ( $z$ ), которое приводит к отклонению регулируемой величины ( $y$ ) – уровня воды в баке. Процесс подачи воды в верхний бак механизирован, так как для этого используется насосная установка. Таким образом, основными устройствами объекта регулирования являются верхний гидробак Б2 (водонапорная башня) и насосная установка.

Применение в обратной связи (рис. 5.4) объекта регулирования (ОР) регулятора (РОС) позволяет автоматизировать процесс управления объектом. В состав регулятора входят потенциометрический датчик уровня поплавкового типа (ДУ), установленный в верхнем баке и электромагнитное реле (ЭМР).

Управляющее воздействие и представляет собой электрический сигнал, подаваемый на электродвигатель насосной установки.

#### 5.5. Экспериментальная установка САР по давлению в жидкой среде

Функциональная схема исследуемой в работе системы представлена на рис. 5.5.

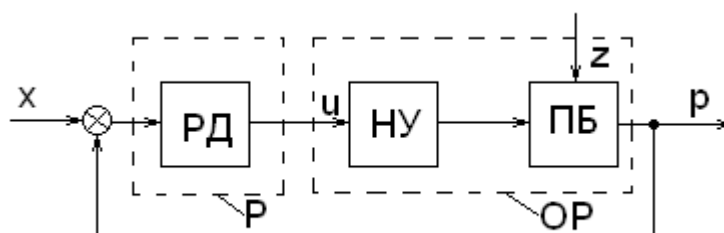


Рис. 5.5. Функциональная схема САР по давлению в жидкой среде

Система авторегулирования (рис. 5.5) состоит из объекта регулирования ОР и регулятора Р. Основными устройствами, входящими в объект регулирования, являются пневматический бак ПБ (резервуар с

водой) и насосная установка НУ, включающая центробежный насос с приводным однофазным электродвигателем.

Регулятором в данном случае является реле давления РД, схема которого приведена на рис. 5.6.

Работа реле давления осуществляется по следующей схеме. При увеличении давления  $p$  до давления, равного верхнему порогу срабатывания  $p_{верх}$ , диафрагма 2 перемещается вправо, сжимая пружину 3, и размыкает нормально замкнутые контакты 1, установленные в цепи управления электродвигателем, что приводит к отключению насосной установки. Воздействие от диафрагмы на пружину 3 и контакты 1 передается через толкатель 4 и упор 5, закрепленный на толкателе.

При уменьшении давления  $p$  диафрагма 2 с толкателем 4 под действием пружины 3 перемещаются влево, однако это не приводит к замыканию контактов 1 до тех пор, пока давление  $p$  не достигнет нижнего значения  $p_{ниж}$  (при этом упор 6, действуя на верхнюю рычажную систему 7, замкнет контакты 1, что приведет к включению насосной установки).

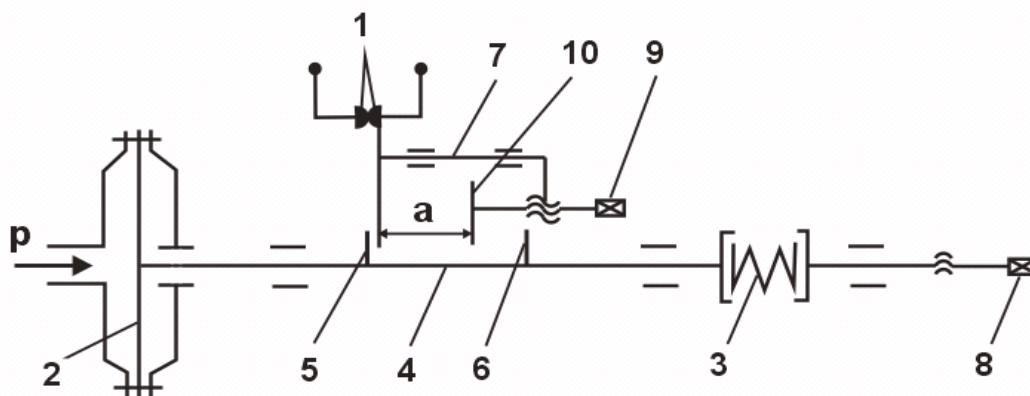


Рис. 5.6. Схема реле давления

При воздействии на винт 8 и изменении усилия пружины 3 изменяется давление  $p_{верх}$  при котором отключается насосная установка. При воздействии на винт 9 и перемещении упора 10 изменяется давление  $p_{ниж}$  при котором включается насосная установка. Причем, при уменьшении размера  $a$  снижается  $p_{ниж}$ .

В экспериментальной установке возмущающим воздействием  $z$  является расход воды потребителями.

Задающим воздействием  $x$  являются воздействия, направленные на регулирование верхнего и нижнего порогов срабатывания реле давления.

Пневматический бак представляет собой резервуар, разделенный водонепроницаемой упругой диафрагмой, по одну сторону которой находится вода, а по другую — воздух под давлением. Предусмотрена воз-

возможность изменения давления воздуха, для чего в корпус пневмобака установлен ниппель с золотником, имеющий такие же присоединительные размеры, как и ниппель с золотником автомобильного колеса (место установки ниппеля с золотником закрыто резиновой заглушкой).

Расход воды из пневматического бака на стенде осуществляется в верхний бак Б2 через трубопровод, в котором установлен вентиль. С помощью вентиля имеется возможность изменения сопротивления сети потребителей. Таким образом, с помощью трубопровода с установленным в нем вентилем и верхнего бака на стенде имитируется система потребления воды. Из верхнего бака Б2 вода затем перетекает в нижний бак, откуда затем всасывается насосом. Гидравлическая схема стенда позволяет реализовывать различные варианты соединения пневматического бака с верхним гидробаком. При одном из вариантов соединения вода из пневматического бака поступает в верхний гидробак через расходомер РА.

### 5.6. Подготовка установки к работе по регулированию уровня жидкой среды. Электрическая схема соединений установки

Описание экспериментальной установки приведено в разделе 5.2. Перед включением установки необходимо:

– С помощью перемычек со штекерами обеспечить схему электрических соединений в соответствии с рис. 5.7 (на передней панели модуля электрического управления).

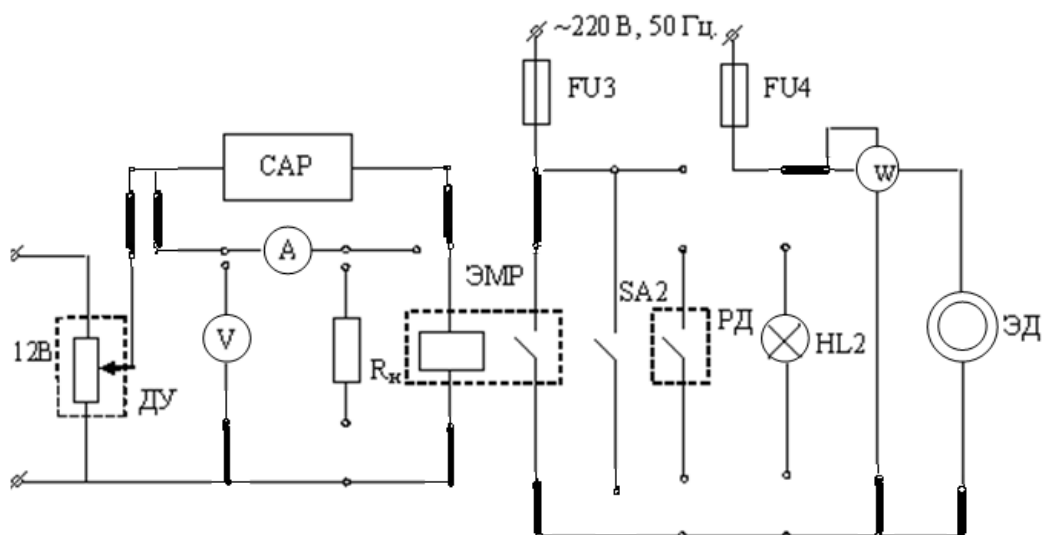


Рис. 5.7. Схема электрических соединений панели модуля электрического управления для регулирования уровня жидкости

– На модуле гидравлического управления закрыть вентили В3, В4 и В5 (закрытие вентиля осуществляется путем вращения маховичка управления по часовой стрелке). Вентиль В2 необходимо открыть, тогда при работе насоса вода из нижнего бака будет подаваться в верхний бак через расходомер РА (при управлении вентилями рекомендуется не прикладывать больших усилий).

– Включить на модуле электрического управления питание электронного секундомера (нажать кнопку «ВКЛ.»).

### 5.7. Подготовка установки к работе по регулированию величины давления в системе. Электрическая схема соединений установки

Описание экспериментальной установки приведено в разделе 5.2. Перед включением установки необходимо:

– С помощью переключателей со штекерами обеспечить схему электрических соединений в соответствии с рис. 5.8 (на передней панели модуля электрического управления).

– На модуле гидравлического управления закрыть вентили В3 и В5 (закрытие вентиля осуществляется путем вращения маховичка управления по часовой стрелке). Вентиль В4 полностью открыть (при управлении вентилями рекомендуется не прикладывать больших усилий), также целесообразно открыть вентиль В6 (при этом рукоятка управления вентилем В6 должна быть установлена параллельно оси трубопровода).

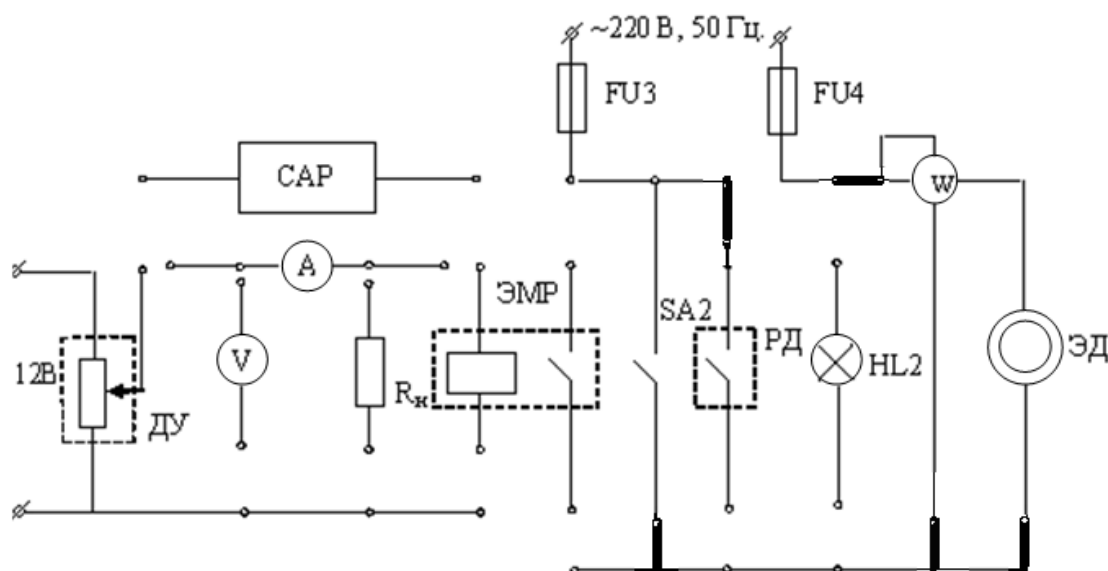


Рис. 5.8. Схема электрических соединений панели модуля электрического управления для регулирования величины давления

## 5.8. Программа экспериментов

По регулированию уровня жидкости в системе:

- проверка работоспособности стенда;
- снятие показателей времени ( $t_p$ ) работы насосной установки, потребляемой мощности ( $W_{эл}$ ) электрического двигателя, расхода воды  $Q$  и построение зависимости потребляемой в течении опыта энергии ( $A$ ) от величины расхода воды;
- повторение опыта.

По регулированию величины давления в системе:

- проверка работоспособности стенда;
- снятие показателей пороговых значений давления  $p_{верх}$  и  $p_{ниж}$  и величины расхода воды  $V_{нач}$  и  $V_{кон}$ ;
- двухкратное повторение опыта;
- снятие показателей времени ( $t_p$ ) работы насосной установки, потребляемой мощности ( $W_{эл}$ ) электрического двигателя, расхода воды  $Q$  и построение зависимости потребляемой в течении опыта энергии ( $A$ ) от величины расхода воды при различных степенях открытия вентиля;
- пятикратное повторение опыта при различных степенях открытия вентиля.

## 5.9. Исследование САР по уровню жидкой среды

После выполнения условий пункта 5.6, необходимо:

- Максимально открыть вентиль В6 (при этом рукоятку управления вентилем надо установить почти параллельно оси трубопровода).
- Зафиксировать начальное показание скоростного расходомера (РА) –  $V_{нач}$ .
- Включить электрическое питание стенда. Для этого тумблер «СЕТЬ» на модуле электрического управления необходимо установить в верхнее положение. Насосная установка начнет подавать воду в верхний бак Б2 и в дальнейшем будет работать в автоматическом режиме. Одновременно с включением насосной установки необходимо начать с помощью электронного секундомера отсчет времени, для чего следует нажать кнопку «Счет». Опыт закончить сразу же после пятого срабатывания насосной установки. При этом следует, нажав кнопку «Пуск», остановить секундомер и зафиксировать время проведения опыта  $t_{оп}$  и показание скоростного расходомера  $V_{кон}$ . Также при каждом срабатывании насосной установки надо (не останавливая секундомера) фиксировать время  $t_{p i}$ , в течение которого работает насосная установка, а также мощность  $W_{эл i}$ , подаваемую на вход электродвигателя (для получения мощности в ваттах показания ваттметра  $W$  необходимо умножать на 100). Результаты испытаний занести в табл. 5.1.

– Далее при работающей САР прикрыть вентиль В6 и добиться заметного уменьшения расхода воды из верхнего бака в нижний, что будет соответствовать уменьшению забора воды потребителями (осуществляя настройку вентиля, необходимо следить за скоростью уменьшения уровня в трубке, установленной на верхнем баке). Затем следует выключить питание стенда и дождаться полного опорожнения верхнего бака, а также нажать кнопку «Сброс» секундомера.

– После подготовки стенда к новому опыту надо повторно выполнить пункты 2 и 3.

– После проведения двух опытов следует отключить электрическое питание стенда и снять перемычки со штекерами с модуля электрического управления.

Выражение для определения искомых величин:

– средний расход воды (расход, подаваемый насосом в бак Б2, примерно равен потребляемому расходу)

$$Q_{cp} = \frac{V_{кон} - V_{нач}}{t_{оп}};$$

– потребляемую в течение опыта энергию

$$A = \sum_{i=1}^5 W_{эл i} \cdot t_{p i}.$$

При подсчете  $A$  нужно значение  $W_{эл i}$  подставлять в кВт, а  $t_{p i}$  – в часах.

Результаты вычислений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Номер опыта	1					2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Порядковый номер срабатывания насосной установки										
Измеряемая величина										
Время работы насосной установки при $i$ -ом срабатывании, $t_{p i}$ (с)										
Потребляемая электродвигателем мощность, $W_{эл i}$ (Вт)										
Продолжительность опыта, $t_{оп}$ (с)										
Средний расход воды, $Q_{cp}$ (м <sup>3</sup> /с)										
Потребляемая в течение опыта энергия, $A$ (кВт·час)										
Показания расходомера:										
начальное, $V_{нач}$ (м <sup>3</sup> )										
конечное, $V_{кон}$ (м <sup>3</sup> )										

Привести пример расчета.

По данным табл. 5.1 построить зависимость  $A = f(Q_{cp})$ .

### 5.10. Исследование САР по давлению в жидкостной среде

После выполнения условий пункта 5.7, необходимо:

– Закрывать вентиль В2 и включить электрическое питание стенда. Для этого тумблер «СЕТЬ» на модуле электрического управления нужно установить в верхнее положение. Насос начнет подавать воду в пневматический бак. При достижении давлением в баке значения, равного верхнему порогу срабатывания реле давления  $p_{верх.i}$  насосная установка отключится. Надо зафиксировать по манометру значение  $p_{верх.i}$ , а также показание расходомера  $V_{нач.i}$ . Затем следует приоткрыть вентиль В2, при этом начнется процесс опорожнения пневматического бака в верхний бак и давление будет уменьшаться. При достижении давлением нижнего порога срабатывания реле давления  $p_{ниж.i}$  насосная установка включится. В момент включения насосной установки необходимо зафиксировать  $p_{ниж.i}$ , а также показание расходомера  $V_{кон.i}$ . Результаты измерений нужно занести в табл. 5.2 и отключить электрическое питание стенда. Опыты следует повторить трижды.

Таблица 5.2

Измеряемая величина	Номер опыта		
	1	2	3
Пороговые значения давлений: $p_{верх.i}$ , кгс/см <sup>2</sup> $p_{ниж.i}$ , кгс/см <sup>2</sup>			
Показания расходомера: $V_{нач.i}$ , м <sup>3</sup> $V_{кон.i}$ , м <sup>3</sup>			
Объем пневматического бака, заполняемый водой, $V_{пб.i}$ , м <sup>3</sup>			
Среднее значение объема, $V_{пб.ср}$ , м <sup>3</sup>			
Средние пороговые значения давлений: $p_{верх.ср}$ , кгс/см <sup>2</sup> $p_{ниж.ср}$ , кгс/см <sup>2</sup>			

Привести пример расчета.

– Определить зависимость затрат электрической энергии от расхода воды потребителями. Для этого необходимо включить на модуле электрического управления питание электронного секундомера (нажать кнопку «Вкл.») и провести два опыта при различных степенях открытия

вентиля В2. В первом опыте клапан В2 нужно полностью открыть. Продолжительность каждого опыта рекомендуется ограничить пятью включениями (срабатываниями) насосной установки.

– Зафиксировать начальное показание скоростного расходомера (РА)  $V_{нач}$ . Тумблер на модуле электрического управления надо установить в положение «Пуск». При этом насосная установка начнет подавать воду в пневматический бак и одновременно в верхний бак (к потребителям). Система будет работать в автоматическом режиме. Одновременно с включением насосной установки необходимо начать с помощью электронного секундомера отсчет времени, для чего нужно нажать кнопку «Счет». Опыт закончить в момент включения в шестой раз насосной установки. При этом следует, нажав кнопку «Пуск», остановить секундомер и зафиксировать время проведения опыта  $t_{он}$  и показание скоростного расходомера  $V_{кон}$ . Также при каждом срабатывании насосной установки надо (не останавливая секундомера) фиксировать время  $t_{р.к}$ , в течение которого работает насосная установка, а также мощность  $W_{эл.к}$ , подаваемую на вход электродвигателя (для получения мощности в Ваттах показания ваттметра  $W$  нужно умножить на 10). Результаты испытаний занести в табл. 5.3.

*Примечание.* Если при полностью открытом клапане В2 насосная установка не отключается, это значит, что сопротивление сети потребителей низкое и давление на выходе насоса ниже верхнего порогового значения срабатывания реле давления. При этом пневматический бак частично заполнен водой и не опорожняется в верхний бак. Для достижения отключений насосной установки необходимо прикрыть клапан В2 и продолжить исследования.

– Далее при работающей САР необходимо прикрыть клапан В2 и добиться заметного увеличения времени, на которое отключается насосная установка между двумя срабатываниями. Оставив неизменной настройку клапана В2, нужно выполнить в соответствии с пунктом 3 опыт № 2.

– После проведения двух опытов надо отключить электрическое питание стенда и снять перемычки со штекерами с модуля электрического управления.

Выражение для определения искомых величин:

– объем пневматического бака, заполняемый водой

$$V_{пб.i} = V_{кон.i} - V_{нач.i};$$

– среднее значение объема бака, заполняемого водой

$$V_{пб.ср} = \sum_{i=1}^3 V_{пб.i} / 3;$$



– средние пороговые значения давлений

$$P_{\text{верх.ср.}} = \sum_{i=1}^3 P_{\text{верх.}i} / 3,$$

$$P_{\text{ниж.ср.}} = \sum_{i=1}^3 P_{\text{ниж.}i} / 3;$$

– средний расход воды (расход, подаваемый насосом в бак Б2, равен потребляемому расходу), то есть

$$Q_{\text{ср}} = \frac{V_{\text{кон}} - V_{\text{нач}}}{t_{\text{оп}}};$$

– потребляемую в течение опыта энергию

$$A = \sum_{k=1}^5 W_{\text{эл.}k} \cdot t_{\text{р.}k}.$$

При вычислении  $A$  необходимо значение  $W_{\text{эл.}k}$  подставлять в кВт, а  $t_{\text{р.}k}$  – в часах.

Результаты вычислений занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Номер опыта	1					2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Порядковый номер срабатывания насосной установки	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Измеряемая величина										
Время работы насосной установки при $i$ -ом срабатывании, $t_{\text{р.}k}$ (с)										
Потребляемая электродвигателем мощность, $W_{\text{эл.}k}$ (Вт)										
Показания расходомера: начальное, $V_{\text{нач}}$ (м <sup>3</sup> ) конечное, $V_{\text{кон}}$ (м <sup>3</sup> )										
Продолжительность опыта, $t_{\text{оп}}$ (с)										
Средний расход воды, $Q_{\text{ср}}$ (м <sup>3</sup> /с)										
Потребляемая в течение опыта энергия, $A$ (кВт·час)										

Привести пример расчета.

По данным табл. 5.3 построить зависимость  $A = f(Q_{\text{сп}})$ .

### 5.11 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Экспериментальная установка с краткими пояснениями. Принципиальные электрические схемы САР поддержания уровня и давления жидкой среды.
3. Таблица опытных данных и характеристики  $A = f(Q)$  САР с поддержанием давления.
4. Таблица опытных данных и характеристики  $A = f(Q)$  САР с поддержанием уровня.
5. Краткие выводы.

### 5.12. Контрольные вопросы

- 5.12.1. Назначение, структура и преимущества систем автоматического регулирования.
- 5.12.2. В чем достоинства и недостатки принципа регулирования по отклонению?
- 5.12.3. Что представляют собой объект регулирования и регулятор в исследуемой системе авторегулирования?
- 5.12.4. Какие возмущающие и управляющие воздействия действуют на САР? По какому параметру осуществляется регулирование?
- 5.12.5. Как зависит энергия, потребляемая САР, от расхода воды?
- 5.12.6. Какие устройства входят в состав объекта регулирования и регулятора?
- 5.12.7. Какие возмущающие и управляющие воздействия влияют на САР? По какому параметру осуществляется регулирование?
- 5.12.8. Пояснить методику экспериментальных исследований по определению параметров системы авторегулирования: пороговых значений давлений срабатывания, объема пневматического бака, заполняемого водой.
- 5.12.9. Как изменится объем пневматического бака, заполняемый водой, при увеличении и уменьшении давления воздуха в баке?

### Список литературы

1. Калицун В.И. и др. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учеб. пособие для вузов / В.И. Калицун, В.С. Кедров, Ю.М. Ласков. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 2000. – 397 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд.4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2004. – 752 с.
3. Прозоров И.В. и др. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учеб. пособие для строительных специальностей вузов / И.В. Прозоров, Г.И. Николадзе, А.В. Минаев. – М.: Высш.школа, 1990. – 448 с.
4. Калицун В.И. Основы водоснабжения и канализации: учеб. пособие для техникумов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1977. – 207 с.
5. Кедров В.С. и др. Водоснабжение и канализация: учебник для вузов / В.С. Кедров, П.П. Пальгунов, М.А. Сомов. – М.: Стройиздат, 1984. – 288 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК ОБЪЕКТОВ КАК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

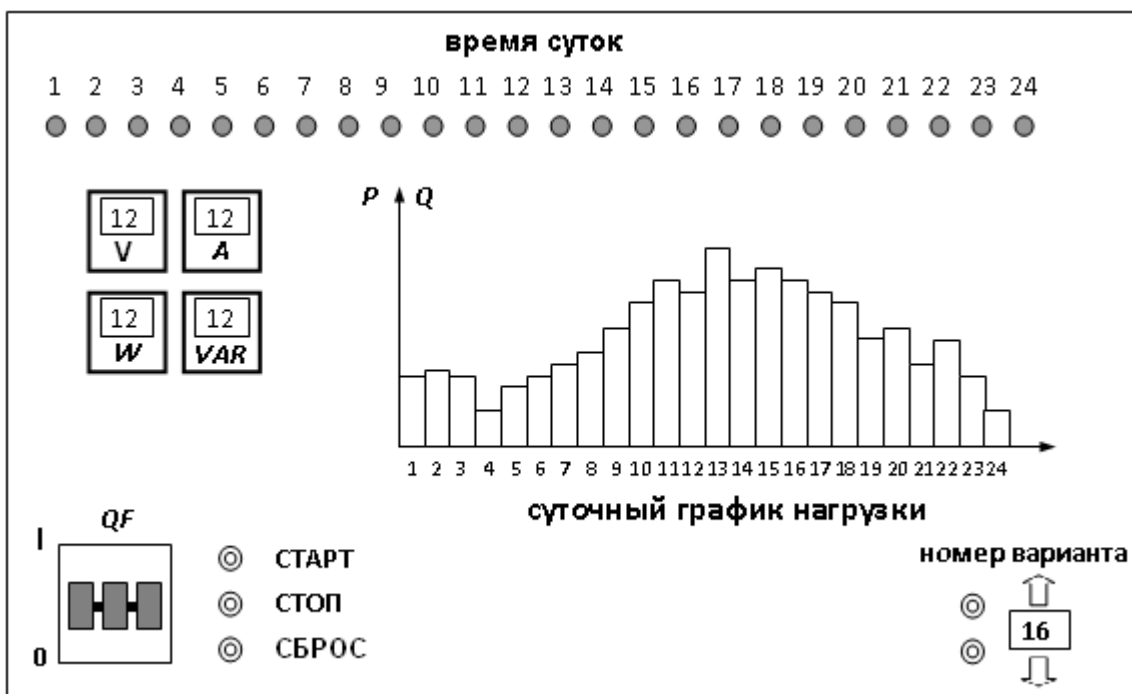
#### 6.1. Цель работы

- снятие и построение графиков нагрузок  $P=f(t)$ ,  $Q=f(t)$  технологических объектов;
- определение и анализ параметров и коэффициентов, характеризующих эти графики.

#### 6.2. Оборудование стенда

Лабораторный стенд позволяет моделировать 16 типовых графиков нагрузок предприятий различного профиля, потребляющих электроэнергию. Питание осуществляется от сети переменного тока 380 В, 50 Гц.

Мнемосхема стенда лицевой панели приборного блока изображена на рис. 6.1.



*Рис. 6.1. Мнемосхема лабораторного стенда*

### 6.3. Общие сведения

#### 6.3.1. Методика определения величин потребителей электроэнергии различных объектов

Режимы работы потребителей электрической энергии не остаются постоянными, а непрерывно изменяются в течение суток, недель и месяцев года. Соответственно изменяется и нагрузка всех звеньев передачи и распределения электроэнергии и генераторов электрических станций. Изменение нагрузок электроустановок в течение времени принято изображать в виде графиков.

Различают графики активных  $P = f(t)$  и реактивных  $Q = f(t)$  нагрузок. По продолжительности эти графики делятся на сменные, суточные и годовые.

В условиях эксплуатации изменения нагрузки по активной и реактивной мощности во времени представляют в виде ступенчатой кривой по показаниям счетчиков активной и реактивной мощности, снятым через одинаковые интервалы времени (30 или 60 мин.).

Знание графика нагрузки позволяет определять величину сечений проводов и жил кабелей, оценивать потери напряжения, выбирать мощности генераторов электростанций, рассчитывать системы электропитания проектируемых предприятий, решать вопросы технико-экономического характера и многое другое.

По суточным графикам нагрузки строятся годовые графики. Различают два типа годовых графиков. Первый – график изменения суточных максимумов нагрузок. Он дает возможность правильно запланировать вывод электрооборудования в ремонт. Второй тип – график по продолжительности, который строится по двум характерным суточным графикам предприятия (за зимние и летние сутки). Годовые графики по продолжительности используются в технико-экономических расчетах (при определении оптимального типа и мощности трансформаторов, генераторов станций, выборе вариантов электроснабжения и т. д.).

Графики нагрузок предприятий различного профиля характеризуются следующими параметрами и коэффициентами:

1. Максимумы активной ( $P_{\text{макс}}$ ), реактивной ( $Q_{\text{макс}}$ ) и полной ( $S_{\text{макс}}$ ) мощностей нагрузок.

2. Средняя активная ( $P_{\text{ср. см}}$ ) и реактивная ( $Q_{\text{ср. см}}$ ) нагрузки за наиболее загруженную смену:

$$P_{\text{ср. см}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}; \quad Q_{\text{ср. см}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (6.1)$$

где  $P_i$  и  $Q_i$  – текущие значения активной и реактивной мощности за наиболее загруженную смену (максимально загруженной считается смена с максимальным расходом активной энергии);  $n$  – количество измерений.

3. Среднесуточные активная ( $P_{\text{ср}}$ ), реактивная ( $Q_{\text{ср}}$ ) и полная ( $S_{\text{ср}}$ ) мощности нагрузок. Определяются аналогично среднесменным, только для суток.

4. Коэффициенты заполнения активного ( $K_{\text{з.а}}$ ) и реактивного ( $K_{\text{з.р}}$ ) графиков нагрузок:

$$K_{\text{з.а.}} = \frac{P_{\text{ср.см}}}{P_{\text{макс}}}; K_{\text{з.р.}} = \frac{Q_{\text{ср.см}}}{Q_{\text{макс}}}. \quad (6.2)$$

5. Коэффициент использования установленной мощности потребителей ( $K_{\text{и}}$ ). Обычно вычисляется для определенного промежутка времени:

– для наиболее загруженной смены

$$K_{\text{и.см.}} = \frac{P_{\text{ср.см}}}{P_{\text{уст}}};$$

– для суток

$$K_{\text{и.}} = \frac{P_{\text{ср.}}}{P_{\text{уст}}}, \quad (6.3)$$

где  $P_{\text{уст}}$  – установленная мощность всех электроприемников, кВт.

6. Коэффициент максимума нагрузки  $K_{\text{м}}$  (определяется для наиболее загруженной смены):

$$K_{\text{м.}} = \frac{P_{\text{макс}}}{P_{\text{ср.см}}} \quad (6.4)$$

7. Средний за сутки коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{ср}}}{\sqrt{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2}} \quad (6.5)$$

8. Среднеквадратичные или эффективные активная ( $P_{\text{э}}$ ), реактивная ( $Q_{\text{э}}$ ) и полная ( $S_{\text{э}}$ ) нагрузки суточного графика:

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}, \text{ кВт},$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – средняя нагрузка на интервалах времени между замерами показаний приборов;

$t_1, t_2, \dots, t_n$  – временные интервалы между замерами.

Если интервалы между замерами одинаковы, то:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{э}} &= \sqrt{\frac{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + \dots + P_n^2}{n}}, \text{ кВт}; \\ Q_{\text{э}} &= \sqrt{\frac{Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + \dots + Q_n^2}{n}}, \text{ кВар}, \\ S_{\text{э}} &= \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_n^2}{n}}, \text{ кВ} \cdot \text{А}, \end{aligned} \right\} \quad (6.6)$$

где  $n$  – число измерений;

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}; S_3 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} \text{ и т. д.}$$

9. Коэффициенты ( $K_{\text{ф.акт}}$ ,  $K_{\text{ф.реакт}}$ ,  $K_{\text{ф.полн}}$ ) формы графика, которые определяются как отношение среднеквадратичной мощности к средней за рассматриваемый период времени:

$$k_{\text{ф.акт}} = \frac{P_{\text{э}}}{P_{\text{ср}}}, k_{\text{ф.реакт}} = \frac{Q_{\text{э}}}{Q_{\text{ср}}}, k_{\text{ф.полн}} = \frac{S_{\text{э}}}{S_{\text{ср}}}. \quad (6.7)$$

10. Число часов использования максимума активной нагрузки в год:

$$T_{\text{макс}} = \frac{W_{\text{акт.г}}}{P_{\text{м}}}, \quad (6.8)$$

где  $W_{\text{акт.г}}$  – потребленная за год активная энергия, кВт·

$$W_{\text{акт.г}} = 365 \cdot (P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_n \cdot t_n),$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – средняя загруженность на интервалах времени между замерами показаний приборов суточного графика нагрузки;  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – временные интервалы между замерами.

11. Коэффициент сменности:

$$\alpha = \frac{P_{\text{ср.г}}}{P_{\text{ср.см}}}, \quad (6.9)$$

где  $P_{\text{ср.г}}$  – среднегодовая активная нагрузка:

$$P_{\text{ср.г}} = \frac{W_{\text{акт.г}}}{8760}$$

### 6.3.2. Определение стоимости израсходованной потребителями электроэнергии

В настоящее время согласно действующему прейскуранту цен на электроэнергию № 09-01 применяются в основном две системы тарифов: одноставочный и двухставочный.

Под **тарифами** понимается система отпускных цен за электроэнергию, дифференцированных для различных групп потребителей.

Размеры тарифов устанавливаются региональными энергетическими комиссиями (РЭК).

Для **одноставочных тарифов** стоимость израсходованной электроэнергии, руб.,

$$C_{э.о} = bW_a, \quad (6.10)$$

где  $W_a$  – количество израсходованной предприятием электроэнергии, кВт·ч;  $b$  – тарифная ставка за 1 кВт·ч, руб/кВт·ч.

По одноставочному тарифу оплата производится промышленными предприятиями с присоединенной мощностью до 750 кВ·А.

Одноставочные тарифы являются наиболее простыми при расчетах за потребленную электроэнергию. Но они имеют некоторые недостатки: при отключении потребителя в какой-то промежуток времени потребитель не несет расходов за электроэнергию в этот период. Энергосистема (ЭС) же постоянно держит в рабочем состоянии генерирующие мощности с сопровождающимися при этом издержками энергетического производства.

ЭС осуществляет электроснабжение ряда промышленных и других потребителей. Соответственно, график нагрузки имеет явно выраженный дневной и вечерний максимумы. Особое значение для энергосистемы имеют вопросы снижения электрической нагрузки предприятий в часы максимального потребления электроэнергии (с 8 до 11 ч и с 17 до 22 ч).

При использовании одноставочных тарифов потребитель не стимулируется к выравниванию суточного графика нагрузок и к снижению пиков нагрузки в часы максимума потребления электроэнергии, так как оплачивает только потребленную электроэнергию независимо от кривой графика ее потребления. Но предприятие, оплачивающее электроэнергию по одноставочному тарифу, обязано платить в 4-кратном размере израсходованную сверх лимита электроэнергию.

**Двухставочный тариф** применяется для предприятий с присоединенной мощностью более 750 кВ·А. Двухставочный тариф состоит из основной и дополнительной ставок.

За основную ставку принимается годовая плата за 1 кВт присоединенной (договорной) максимальной 30-минутной мощности предприятия, участвующей в максимуме нагрузки ЭС. Дополнительная ставка двухставочного тарифа предусматривает плату за израсходованную в киловатт-часах электроэнергию, учтенную счетчиками.



Стоимость электроэнергии по двухставочному тарифу, руб.:

$$C_{\text{э.д}} = aP_{\text{заяв.расч.}} + bW_a, \quad (6.11)$$

где  $a$  – плата за 1 кВт заявленной (расчетной) мощности предприятия, участвующей в максимуме нагрузки энергосистемы, руб./г;  $b$  – стоимость 1 кВт·ч активной энергии по счетчику.

За нарушение договорных обязательств применяется система штрафов. За потребление сверхлимитной электроэнергии предприятие обязано оплатить надбавку в 6-кратном размере дополнительной ставки двухставочного тарифа. Превышение присоединенной мощности, заявленной в часы максимума ЭС, влечет за собой плату в 10-кратном размере основной ставки двухставочного тарифа за квартал, в котором произошло нарушение условий договора.

Кроме этого, ЭС задает график работы компенсирующих устройств реактивной мощности, несоблюдение которого ведет к увеличению тарифа в размере 50 %% за квартал, в котором отмечено нарушение этого графика.

В балансе реактивных нагрузок потери реактивной мощности в элементах системы электроснабжения различных предприятий достигают 20 %%. Естественный коэффициент мощности электрических нагрузок предприятий изменяется в пределах  $\cos\varphi_{\text{ест}} = 0,7-0,9$ . Это означает, что объекты потребляют реактивную мощность

$$Q_{\text{мощ}} = P_{\text{мощ}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{ест}} = (1,02 - 0,48) P_{\text{мощ}}.$$

Полные затраты на производство и передачу всей необходимой предприятию реактивной мощности от шин электростанций в большинстве случаев значительно больше, чем затраты на производство реактивной мощности непосредственно в системе электроснабжения объекта. Поэтому экономически целесообразно от генераторов электростанций передавать часть реактивной мощности, а *большую* – компенсировать на шинах присоединения предприятия к ЭС.

Согласно «Правилам пользования электрической и тепловой энергией», предусматривается нормирование потребления реактивной мощности непосредственно в именованных единицах, т. е. наряду с нормированием потребления активной мощности нормируется и реактивная.

Учитывая необходимость постоянного поддержания оптимальных режимов в ЭС, реактивная мощность предприятий нормируется для периода максимальной активной нагрузки энергосистемы  $Q_{\text{э.ОПТ.акт1}}$  и для периода минимальной нагрузки  $Q_{\text{э.ОПТ.акт2}}$ . Значения  $Q_{\text{э.ОПТ.акт1}}$  и  $Q_{\text{э.ОПТ.акт2}}$  рассчитываются энергоснабжающей организацией по специальной методике и на каждый квартал указываются в договоре с предприятием на пользование электрической энергией.

Оптимальное значение потребляемой из сетей энергосистемы реактивной мощности  $Q_{Э.ОПГ.акт1}$ , задаваемое потребителю, определяет для него суммарную установленную мощность компенсирующих устройств.

#### **6.4. Описание лабораторной установки (рис. 6.1)**

Лабораторная установка позволяет моделировать 16 типовых графиков нагрузки потребителей электроэнергии:

- угледобывающий завод (вариант 1);
- нефтеперерабатывающий завод (вариант 2);
- торфоперерабатывающий завод (вариант 3);
- завод черной металлургии (вариант 4);
- завод цветной металлургии (вариант 5);
- химический завод (вариант 6);
- завод тяжелого машиностроения (вариант 7);
- ремонтно-механический завод (вариант 8);
- станкостроительный завод (вариант 9);
- автомобильный завод (вариант 10);
- деревообрабатывающий завод (вариант 11);
- целлюлозно-бумажный комбинат (вариант 12);
- комбинат легкой промышленности (вариант 13);
- прядильно-ткацкая фабрика (вариант 14);
- кирпичный завод (вариант 15);
- пищевой комбинат (вариант 16).

Номер варианта устанавливается соответствующими кнопками в правой нижней части панели. Включение лабораторной установки осуществляется трехфазным автоматическим выключателем  $QF$ , расположенным в левой нижней части стенда. Кнопки «СТАРТ» и «СТОП» позволяют запускать и останавливать программное устройство по требованию, а кнопка «СБРОС» дает возможность возвращать процесс в исходное положение.

После нажатия кнопки «СТАРТ» программное устройство начинает автоматически обрабатывать заданный график нагрузки, при этом каждая ступень графика выдерживается в течение 30 секунд, а затем следует переход на следующую ступень. Следовательно, весь суточный график моделируется за 12 минут. Ряд красных сигнальных ламп, расположенных вверху панели, позволяет видеть, какой шаг (ступень) графика нагрузки обрабатывается в данный момент моделью.

В левой части панели установлены измерительные приборы активной ( $W$ ) и реактивной ( $VA$ ) мощностей, по показаниям которых определяют нагрузку на каждом шаге графика. Вольтметр ( $V$ ) и амперметр ( $A$ ) показывают напряжение ( $U$ ) на нагрузке и полный ее ток ( $I$ ).

## 6.5. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования:

- проверка работоспособности стенда;
- снятие характеристик  $P=f(t)$  и  $Q=f(t)$  для построения суточных графиков активной и реактивной мощностей;
- построение годового графика активной нагрузки по продолжительности  $P_{год.}=f(t)$  по суточному графику;
- определение годовых затрат потребителя на электроэнергию по одно- и двухставочному тарифам.

## 6.6. Проверка работоспособности стенда (рис. 6.1)

Для этого необходимо проделать следующее:

- Включить автомат  $QF$  на лицевой панели. Кнопками выбора варианта установить номер варианта по заданию преподавателя.
- Нажать кнопку «СТАРТ», приведя в действие программное устройство. При этом начинается последовательная отработка графика нагрузки, начиная с первого шага (часа) до двадцать четвертого. Номер обрабатываемого шага графика контролировать сигнальными лампами в верхней части панели.

## 6.7. Исследование суточных графиков нагрузок потребителей электроэнергии

1. Фиксировать показания измерительных приборов для каждого шага графика нагрузки:

- величину напряжения ( $U$ ) на шинах главной понижающей подстанции (ГПП), кВ;
  - величину потребляемого предприятием тока ( $I$ ) на шинах ГПП, А;
  - потребляемую предприятием активную мощность ( $W$ ), МВт;
  - потребляемую предприятием реактивную мощность ( $VA$ ), МВар.
- Полученные данные заносить в табл. 6.1.

Таблица 6.1

$t$ , час	$U$ , кВ	$I$ , А	$P$ , МВт	$Q$ , МВар
1				
2				
...				
24				

2. По окончании опыта нажать кнопку «СТОП» и выключить автомат  $QF$ .

3. По данным табл. 6.1 построить суточные графики активной  $P = f(t)$  и реактивной  $Q = f(t)$  мощностей.

4. По суточным графикам нагрузки определить следующие показатели:

– среднесуточную активную  $P_{\text{ср}}$  и реактивную  $Q_{\text{ср}}$  нагрузки из выражения (6.1);

– среднесменные  $P_{\text{ср. см}}$ ,  $Q_{\text{ср. см}}$  нагрузки за наиболее загруженную смену по выражению 6.1;

– максимальную активную  $P_{\text{макс}}$  и реактивную  $Q_{\text{макс}}$  нагрузки;

– коэффициент сменности  $\alpha$  согласно формулы 6.9;

– коэффициенты заполнения активного  $K_{з,а}$  и реактивного  $K_{з,р}$  графиков нагрузки по формуле 6.2;

– коэффициент использования установленной мощности потребителей  $K_{и}$  за наиболее загруженную смену по выражению 6.3.

Величину установленной мощности всех электроприемников предприятия принять по следующему выражению  $P_{\text{уст}} = 3 \cdot P_{\text{м}}$ ;

– коэффициент максимума нагрузки  $K_{\text{м}}$ , используя формулу 6.4;

– средний за сутки коэффициент мощности  $\cos \varphi$  по выражению 6.5;

– среднеквадратичные или эффективные значения активной  $P_{\text{э}}$ , реактивной  $Q_{\text{э}}$  и полной  $S_{\text{э}}$  нагрузок суточного графика (формула 6.6);

– коэффициент формы суточного графика  $k_{\text{ф}}$  по активной  $P_{\text{э}}$ , реактивной  $Q_{\text{э}}$  и полной  $S_{\text{э}}$  мощностей, используя выражение 6.7.

### **6.8. Построение и исследование годового графика активной нагрузки по продолжительности**

По суточному графику активной нагрузки построить годовой график активной нагрузки по продолжительности. Для этого на суточном графике нагрузки выделяется максимальная нагрузка и время ее действия в часах. Это время умножается на 365 (число дней в году) и величина максимальной нагрузки с найденной продолжительностью откладывается на годовом графике. Пример типового графика нагрузки по продолжительности приведен на рис. 6.2. Аналогично определяются следующие в порядке убывания значения нагрузок и их продолжительность из суточного графика и откладываются на годовом.

Площадь годового графика в соответствующем масштабе выражает количество потребленной предприятием электроэнергией за год. По годовому графику нагрузки можно найти число часов использования максимума нагрузки (6.8).

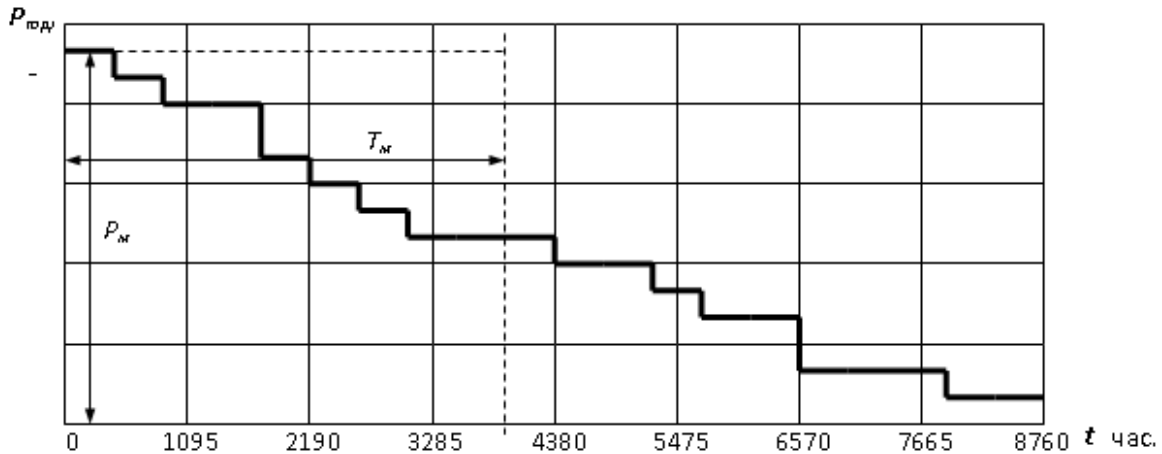


Рис. 6.2. Годовой график нагрузки по продолжительности

### 6.9. Расчет годовых затрат на электроэнергию различными потребителями

Определить годовые затраты промышленного предприятия на электроэнергию при оплате:

– по одноставочному тарифу по выражению 6.10.

Принять тарифную ставку за 1 кВт·ч потребленной электроэнергии, при оплате по одноставочному тарифу, равной  $b = 1,0$  руб/кВт·ч.

– по двухставочному тарифу, используя формулу 6.11.

При оплате по двухставочному тарифу плата за 1 кВт заявленной (расчетной) мощности предприятия равна  $a = 100$  руб. за кВт/месяц; стоимость 1 кВт·ч активной энергии по счетчику составляет  $b = 0,6$  руб/кВт·ч.

### 6.10. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Мнемосхема стенда с краткими пояснениями.
3. Таблица опытных данных и характеристики  $P = f(t)$  и  $Q = f(t)$ .
4. Параметры и коэффициенты, характеризующие работу предприятий, потребляющих электроэнергию.
5. Годовой график по продолжительности для активной нагрузки  $P_{год} = f(t)$ .
6. Годовые затраты на электроэнергию по одно- и двухставочному ( $C_{э,д}$ ) тарифам.
7. Краткие выводы.

## **6.11. Контрольные вопросы**

6.11.1. С какой целью снимаются графики нагрузок на предприятиях, потребителей электроэнергии?

6.11.2. Объяснить понятие расчетной нагрузки.

6.11.3. Что такое коэффициент использования и для чего он находится?

6.11.4. Дать определение времени использования максимума нагрузки; указать, какое значение имеет этот показатель в системах электроснабжения предприятий.

6.11.5. Какая смена считается наиболее загруженной?

6.11.6. Что характеризует каждый из коэффициентов графиков нагрузок?

## **Список литературы**

1. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984.– 205 с.

2. Мельников М.А. Внутрицеховое электроснабжение: учебное пособие. – Томск. Изд. ИПФ, 2002. – 143 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1 СИСТЕМА «ТИРИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ» КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ СХЕМЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....	3
Лабораторная работа № 2 ШАГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....	28
Лабораторная работа № 3 СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....	51
Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ .....	78
Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДДЕРЖАНИЯ УРОВНЯ И ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОЙ СРЕДЫ .....	99
Лабораторная работа № 6 ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК ОБЪЕКТОВ КАК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....	116

Учебное издание

ГУСЕВ Николай Владимирович  
ДЕМЕНТЬЕВ Юрий Николаевич  
СЕМЕНОВ Сергей Михайлович

# ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Научный редактор  
*доктор технических наук,*  
*профессор Р.Ф. Бекишев*

Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 29.10.2010. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 6,74.

Заказ 1792-10. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru