

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Электрические машины и электропривод**

**Направление подготовки (специальность) 35.03.06 «Агроинженерия»**

**Профиль образовательной программы Технический сервис в АПК**

**Форма обучения заочная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.Лекция №1Машины постоянного тока.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.Лекция №2Трехфазный асинхронный электродвигатель.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3 Лекция №3Основы электропривода.....</b>	<b>25</b>
<b>2. Методические указания по выполнению лабораторных работ.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 Исследование электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2 Лабораторная работа №ЛР-2 Изучение схемы управления асинхронным электродвигателем с переключением со «звезды» на «треугольник».....</b>	<b>34</b>
<b>2.3 Лабораторная работа №ЛР-3 Схема реверсивного управления асинхронным электродвигателем с торможением противовключением.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4 Лабораторная работа №ЛР-4 Исследование центробежного вентилятора.....</b>	<b>41</b>
<b>2.5 Лабораторная работа №ЛР-5 Исследование механической характеристики шунтового электродвигателя в режиме динамического торможения.....</b>	<b>45</b>

# 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1.1 Лекция № 1 (2часа).

### Тема: «Машины постоянного тока»

#### 1.1.1 Вопросы лекции

1. Классификация электрических машин.
2. Паспортные данные.
3. Устройство, схемы включения и принцип действия машин постоянного тока.
4. Уравнение механической характеристики электродвигателей постоянного тока.
5. Регулирование частоты вращения
6. Режимы работы электродвигателей постоянного тока.

#### 1.1 2 Краткое содержание вопросов

1. Классификация электрических машин постоянного тока.

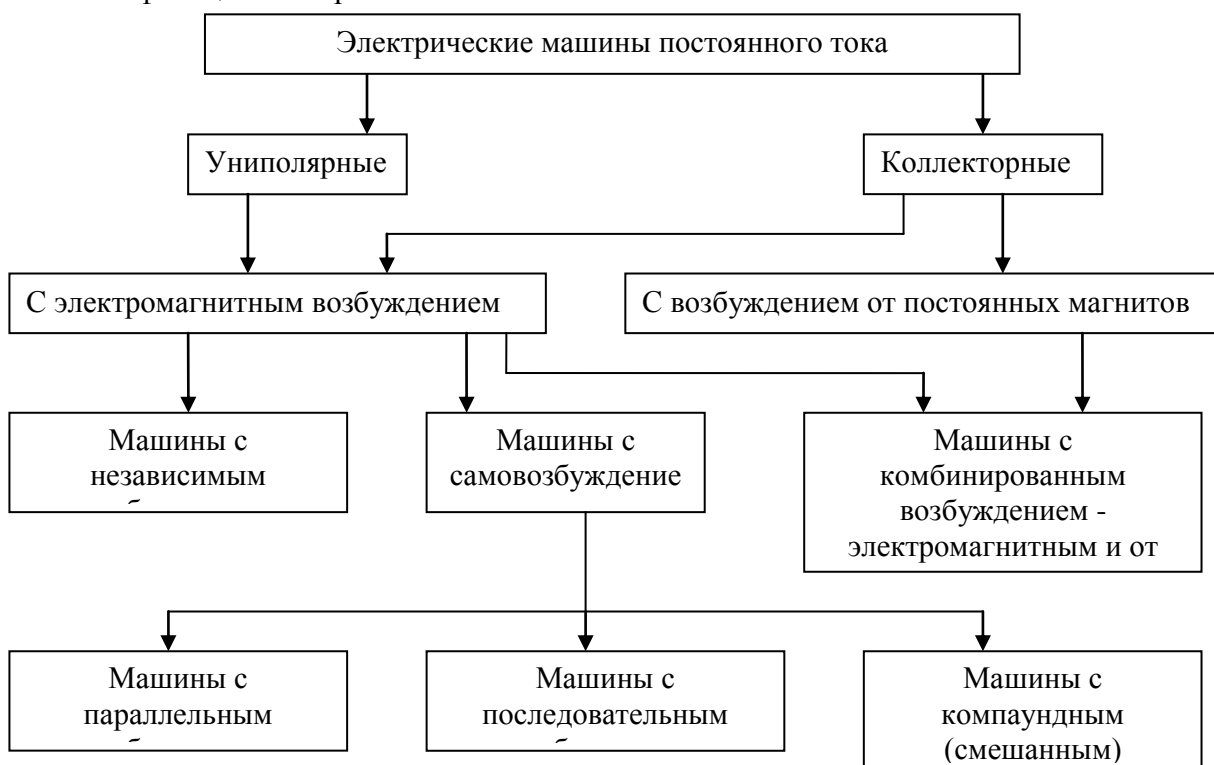


Рис. 1.1. Классификация электрических машин по роду тока, принципу действия и типу возбуждения.

#### 2. Паспортные данные

Каждый электродвигатель имеет закреплённую на его корпусе табличку (паспорт) с приведёнными на нём паспортными данными, включающими тип (марку) электродвигателя и номинальные, т. е. расчётные данные электродвигателя. Они приводятся обычно в следующем составе и последовательности.

1. Прежде всего, на паспорте указывается номинальная мощность электродвигателя, развиваемая на валу, т. е. полезная мощность электродвигателя ( $P_n$ ). Приводится она в киловаттах. Для использования в расчётах её необходимо переводить в ватты, умножив указанную величину на 1000. Для того чтобы подчеркнуть, что номинальная мощность указывается на валу, в её обозначение часто вводится индекс  $_2(P_{2n})$  в отличие от мощности, потребляемой электродвигателем при номинальном режиме из сети ( $P_{1n}$ ).

2. Указывается также число оборотов электродвигателя в минуту при номинальной нагрузке ( $n_n$  об/мин). Эта величина не входит в состав единиц измерения Международной системы единиц измерения (СИ), поэтому для использования в расчётных выражениях её следует переводить в частоту вращения  $\omega_n$ , равную  $\pi n_n/30$  в радианах в секунду 1/с.

3. На паспорте электродвигателя указывается напряжение, на которое рассчитаны обмотки электродвигателя (номинальное напряжение  $U_n$ ). 4. Указывается также номинальный ток электродвигателя ( $I_n$ ) в амперах.

4. На паспорте указывается также режим работы электродвигателя по нагрузке: s1 – длительный; s2 – кратковременный; s3 – повторно кратковременный; и т. д..

5. Указывается также класс изоляции по нагревостойкости: V – допустимая температура 90 °C; A – 105 °C; E – 120 °C; B – 130 °C; F – 155 °C; и т. д.

### 3. Устройство, схемы включения и принцип действия машин постоянного тока.

Принцип действия электрических машин постоянного тока основан на явлении электромагнитной индукции и возникновении электромагнитной силы, действующей на проводник с током в магнитном поле. Одну часть машины, где создаётся основной магнитный поток (поток возбуждения), называют индуктором, а другую часть, представляющую собой совокупность проводников (обмотку), пересекающихся потоком возбуждения, и в которой индуцируется ЭДС, — якорем. Кроме того, одна из указанных частей машины подвижная (ротор), а другая — неподвижная (статор).

Принцип работы машины постоянного тока рассмотрим на примере модели генератора в виде одного витка, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$  в магнитном поле неподвижных постоянных магнитов N—S (рис. 1.2). При вращении витка в его проводниках, находящихся в магнитном поле, индуцируются ЭДС  $e$ , направление которых определяют по правилу правой руки. Согласно этому правилу ладонь правой руки располагают в магнитном поле так, чтобы в нее входили магнитные силовые линии, имеющие направление от полюса N к полюсу S, а отогнутый большой палец показывал направление движения проводника. Тогда остальные вытянутые пальцы укажут направление ЭДС. Таким образом, для указанного на рисунке 2.2, а — положения витка в верхнем проводнике витка ЭДС  $e$  направлена «к нам», а в нижнем — «от нас». При этом направление ЭДС в проводнике не меняется, пока он находится под полюсом данной полярности. Значение же ЭДС при вращении витка изменяется. Когда плоскость витка перпендикулярна к магнитным силовым линиям, то в его проводниках ЭДС не наводится, так как они не пересекают магнитные силовые линии, а лишь скользят по ним. Затем при повороте витка ЭДС в проводниках увеличивается и достигает максимального значения, когда проводники находятся точно под серединой полюса.

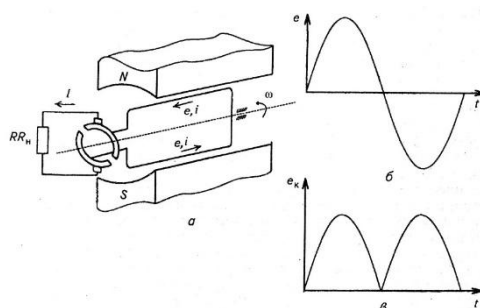


Рис. 1.2. Простейшая модель генератора постоянного тока (а) и кривые ЭДС в сторонах витка (б) и на щетках (в)

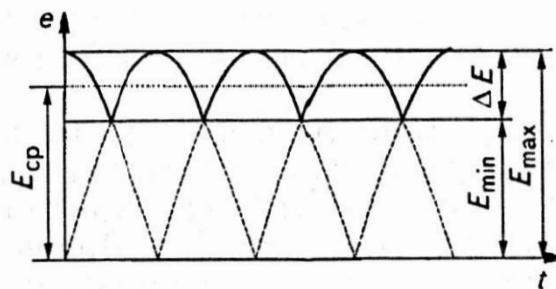


Рис. 1.3. Кривая ЭДС на зажимах генератора с двумя витками на якоре:  
 $e$  — мгновенное значение ЭДС;  $E_{\min}$ ;  $E_{\max}$ ;  $E_{\text{cp}}$  — соответственно максимальное, минимальное и среднее значение ЭДС

При дальнейшем повороте витка ЭДС в проводниках уменьшается и снова становится равной нулю.

Далее каждый проводник попадает под полюс другой полярности и направление ЭДС изменяется на противоположное. Следовательно, в витке индуцируется переменная ЭДС, изменяющаяся по синусоидальному закону (рис. 1.2, б). Чтобы выпрямить ЭДС, надо начало и конец витка подсоединить к двум полукольцам, вращающимся вместе с витком. Снимаемая щетками с полуколец ЭДС  $e_k$  постоянна по знаку, так как к каждой щетке поочередно подходят стороны витка с постоянным знаком ЭДС. При этом ток  $I$  во внешней цепи с сопротивлением нагрузки  $R_n$  протекает только в одном направлении (от верхнего полукольца к нижнему) и, следовательно, является постоянным.

Кривая ЭДС, снимаемая со щеток, представлена на рисунке 1.2, в. ЭДС постоянна по знаку, но меняется по амплитуде (пульсирует). Для уменьшения пульсаций используют несколько витков, смещенных в пространстве под углом один относительно другого и подсоединенных к соответствующим частям кольца.

На рисунке 1.3 показана кривая ЭДС, снимаемая с двух витков. Они смещены в пространстве и присоединены к четырем равным частям разрезанного кольца. Эти части изолированы одна относительно другой. При большем числе витков части кольца в виде пластин образуют механический выпрямитель, называемый коллектором.

Таким образом, главная особенность машин постоянного тока — наличие коллектора и скользящего контакта (щеток) между обмоткой якоря и внешней цепью. В генераторах коллектор служит механическим выпрямителем, а в двигателях, когда якорь подключают к источнику постоянного тока, коллектор выполняет роль преобразователя частоты. В этом случае он связывает сеть постоянного тока с обмоткой, по проводникам которой протекает переменный ток. Машины постоянного тока с коллектором называют коллекторными машинами постоянного тока.

Двухполюсная машина постоянного тока приведена на рисунке 1.4, а. Машина имеет обмотку возбуждения, расположенную на полюсах N и S статора. По обмотке пропускают постоянный ток возбуждения, который создает магнитный поток возбуждения  $\Phi_0$ . На роторе находится обмотка, в которой при вращении наводится ЭДС. Таким образом, ротор машины постоянного тока служит якорем, а полюса (индуктор) находятся на статоре.

При вращении якоря проводники обмотки перемещаются от одного полюса к другому и ЭДС, наводимая в них, будет переменной. Однако под каждым полюсом всегда остается постоянное число витков, с которых с помощью коллектора и щеточного контакта снимается выпрямленная ЭДС. Обмотку якоря выполняют замкнутой и симметричной (рис. 1.4, б), а щеточные контакты делят ее на параллельные ветви. При отсутствии внешней нагрузки ток  $i_a$  в параллельных ветвях отсутствует, так как ЭДС, индуцируемые в них, взаимно компенсируются. ЭДС в проводниках обмотки, распо-

женных на линии, перпендикулярной к оси полюсов, не наводится, так как витки скользят по силовым линиям магнитного поля. Эту линию называют геометрической нейтралью машины.

При подключении нагрузки в обмотке якоря появляется ток, протекающий по каждой из параллельных ветвей.

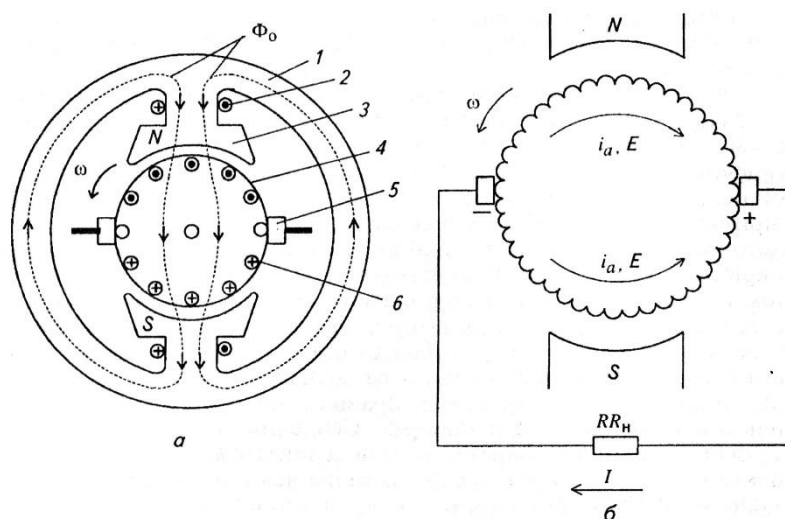


Рис. 1.4. Электромагнитная схема двухполюсного генератора постоянного тока (а) и эквивалентная схема обмотки якоря (б):

1 — корпус (станина, ярмо); 2 — обмотка возбуждения; 3 — главный полюс; 4 — якорь; 5 — щетка (показана условно на якоре); 6 — обмотка якоря

Устройство. По конструктивному выполнению машина постоянного тока (рис. 1.5) подобна обращенной синхронной машине, у которой обмотка якоря расположена на роторе, а обмотка возбуждения — на статоре.

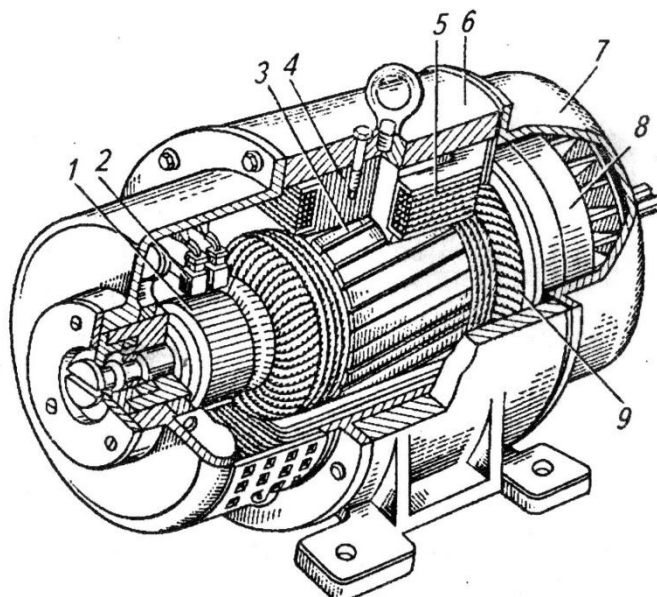


Рис. 1.5. Устройство машины постоянного тока: 1 — коллектор; 2 — щетки; 3 — сердечник якоря; 4 — главный полюс; 5 — катушки обмотки возбуждения; 6 — корпус (станина); 7 — подшипниковый щит; 8 — вентилятор; 9 — обмотка якоря

Основное отличие заключается в том, что машина постоянного тока имеет на якоре коллектор, а на статоре кроме главных полюсов с обмоткой возбуждения добавочные полюсы, которые служат для уменьшения искрения под щетками.

**Статор.** На статоре расположены главные полюсы с катушками обмотки возбуждения и добавочные полюсы (на рис. 1.5. не показаны) с соответствующими катушками. Полюсы крепят болтами к стальному корпусу, который является частью магнитной цепи машины. Главные полюсы выполняют шихтованными (из стальных штампованных листов), а добавочные — массивными или также шихтованными.

По станине и полюсам замыкается постоянный магнитный поток, поэтому выполнение полюсов массивными или из листов определяется в основном удобствами технологии. (стальные листы спрессовывают под давлением и скрепляют заклепками и нажимными щечками, установленными по краям каждого полюса. Шихтованными должны быть только наконечники главных полюсов, так как при вращении зубчатого якоря из-за пульсации магнитного потока в воздушном зазоре в них возникают вихревые токи и потери мощности. Однако по условиям технологии обычно выполняют шихтованным весь полюс. Полюсы крепят к станине болтами; резьбу для болтов нарезают непосредственно в шихтованном сердечнике полюсалибо в массивных стальных стержнях, которые вставляют в выштампованные отверстия в полюсах.

Катушки главных и добавочных полюсов изготавливают из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения. Катушки машин малой мощности выполняют из тонкой проволоки; последовательные катушки обмоток возбуждения и добавочных полюсов — из полосовой меди. Расположенную на полюсе обмотку иногда разбивают на несколько катушек (секций) для лучшего ее охлаждения. При секционном выполнении катушек между отдельными секциями устанавливают дистанционные шайбы из изоляционного материала, посредством которых образуются вентиляционные каналы.

**Якорь.** Сердечник якоря, так же как в синхронной машине, собирают из изолированных листов электротехнической стали. Обмотку якоря изготавливают из провода круглого или прямоугольного сечения; обычно она состоит из отдельных, заранее намотанных якорных катушек, которые обматывают изоляционными лентами и укладывают в пазы сердечника якоря. Обмотку выполняют двухслойной; в каждом пазу укладывают две стороны различных якорных катушек — одну поверх другой. Каждая якорная катушка включает в себя несколько секций, концы которых припаивают к соответствующим коллекторным пластинам; секции могут быть одно- и многовитковыми.

**Коллектор.** Обычно коллектор выполняют в виде цилиндра, собранного из клинообразных пластин твердотянутой меди; между пластинами располагают изоляционные прокладки из слюды или миканита. Узкие края коллекторных пластин имеют форму ласточкина хвоста; после сборки коллектора их зажимают между корпусом и нажимным фланцем и изолируют манжетами из миканита. Секции обмотки якоря впаивают в прорези, имеющиеся в выступающей части коллекторных пластин.

В машинах малой и средней мощности широко применяют коллекторы, в которых медные пластины и миканитовые прокладки запрессованы в пластмассу. Поверхность собранного коллектора обтачивают на токарном станке и тщательно шлифуют. Чтобы миканитовые прокладки при срабатывании коллектора не выступали над пластинами и не вызывали вибрации щеток, их профрезеруют на 0,8...1,5 мм ниже поверхности коллектора.

**Щеточный аппарат.** По цилиндрической части коллектора скользят щетки, установленные в щеткодержателях. Щетки представляют собой прямоугольные бруски, изготовленные путем прессовки и термической обработки из материалов, составленных на основе графита. Они предназначены для соединения коллектора с внешней цепью и прижимаются к поверхности коллектора пружинами.

При вращении якоря щетки сохраняют неизменное положение относительно полюсов машины. Щеткодержатели укрепляют на щеточных пальцах и изолируют от них. Щеточные пальцы, в свою очередь, крепят либо к подшипниковому щиту, либо к

траверсе, которая позволяет при необходимости поворачивать всю систему щеток относительно полюсов машины. В машинах малой мощности часто применяют трубчатые щеткодержатели, устанавливаемые непосредственно в подшипниковом щите.

В зависимости от состава, способа изготовления и физических свойств все щетки делят на шесть основных групп: угольно-графитные, графитные, электрографитированные, медно-графитные, бронзо-графитные и серебряно-графитные. Для каждой машины следует применять щетки только установленной марки, которая выбирается заводом-изготовителем исходя из условий работы машины.

#### 4. Уравнение механической характеристики электродвигателей постоянного тока.

По характеристикам двигателя определяют его рабочие свойства, что дает возможность оценить пригодность двигателя для тех или иных условий работы. К основным характеристикам двигателя постоянного тока относят рабочие и механические характеристики.

Механические характеристики представляют собой зависимости угловой скорости  $\omega$  или частоты вращения от вращающего момента  $\omega = f(M)$  при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$ .

Рассмотрим указанные характеристики двигателей постоянного тока с разными схемами возбуждения.

Двигатель с параллельным возбуждением. Схема включения двигателя показана на рисунке 1.5. Обмотка возбуждения двигателя подключена параллельно обмотке якоря, причем ее питание, по существу, независимое. Для регулирования тока возбуждения в цепь обмотки включен регулировочный реостат  $RR_b$ . Пусковой реостат  $RR_n$  включен последовательно с якорем.

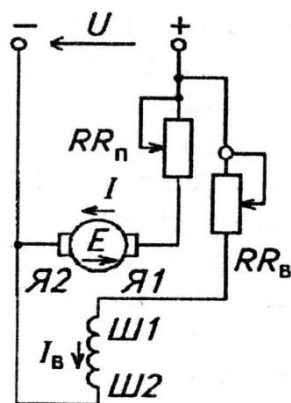


Рис. 1.6. Схема включения двигателя с параллельным возбуждением

Механическая характеристика двигателя  $\omega = f(M)$  или  $n = f\{M\}$  может быть получена из выражения

$$\omega = \frac{U - IR_a}{C\Phi} = \frac{U}{C\Phi} - \frac{IR_a}{C\Phi} \quad (1.1)$$

Так как  $M = C\Phi I$ , то, подставляя в выражение (1.1) значение тока якоря  $I = M/(C\Phi)$ , получим

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{MR_a}{C\Phi^2} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (1.2)$$

где  $\omega_0 = U/(C\Phi)$  — скорость вращения в режиме

идеального холостого хода (без учета момента  $M_0$ , соответствующего потерям мощности при холостом ходе);  $\Delta\omega$  — изменение скорости, вызванное изменением нагрузки на валу двигателя.



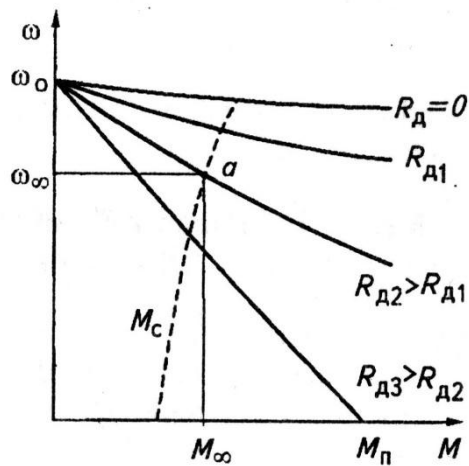


Рис.1.7. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением

При неизменном магнитном потоке механическая характеристика двигателя представляет собой прямую линию (рис. 1.7). Если в цепи якоря отсутствуют дополнительные сопротивления, то механическую характеристику двигателя называют естественной. При включении в цепь якоря дополнительного резистора с сопротивлением  $R_d$  может быть получено семейство искусственных характеристик. Естественная механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением весьма жесткая: при изменении нагрузки на валу двигателя его скорость изменяется незначительно.

При работе двигателя на определенной скорости  $\omega_\infty$  он развивает момент  $M_\infty$ , равный моменту сопротивления  $M_c$  механизма, приводимого двигателем во вращение. Таким образом, режим работы двигателя и нагрузки определяют по точке  $a$  пересечения механических характеристик двигателя  $M = f(\omega)$  и нагрузки  $M_c = f(\omega)$ . При этом должна обеспечиваться устойчивая работа двигателя с нагрузкой, т. е. при малых кратковременных изменениях момента нагрузки или других возмущениях, приводящих к изменению скорости, система двигатель — нагрузка должна возвращаться к исходному установившемуся режиму. Устойчивость обеспечивается, если  $dM/d\omega < dM_c/d\omega$ . Это условие называют критерием устойчивости работы двигателя. Поэтому при выборе двигателя для той или иной нагрузки следует оценивать устойчивость работы его по указанному критерию.

Двигатель с последовательным возбуждением. Схема включения двигателя показана на рисунке 1.8.

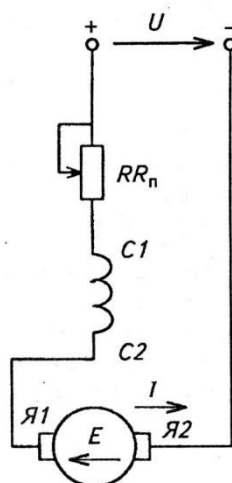


Рис. 1.8. Схема включения двигателя с последовательным возбуждением

Поскольку обмотки двигателя включены последовательно, токи возбуждения и якоря равны между собой:  $I_b = I$ , то магнитный поток в двигателе будет зависеть от нагрузки. При  $I < 0,8I_{ном}$  магнитная система двигателя не насыщена и магнитный поток пропорционален току:  $\Phi = K_\Phi I$ , где  $K_\Phi$  — коэффициент пропорциональности. Следовательно, с учетом этого в диапазоне указанных токов нагрузки скоростная характеристика двигателя

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{I(R_a + R_b)}{C\Phi} = \frac{U}{CK_\Phi I} - \frac{R_a + R_b}{CK_\Phi} \quad (1.3)$$

будет иметь гиперболический вид.

Зависимость тока от электромагнитного момента в диапазоне токов  $I < 0,8I_{ном}$  представляют выражением

$$I = \sqrt{M / CK_\Phi} \quad (1.4)$$

Подставив выражение (1.4) в формулу (1.3), получим уравнение механической характеристики двигателя

$$\omega = \frac{U}{CK_\Phi \sqrt{M / CK_\Phi}} - \frac{R_a + R_b}{CK_\Phi} \quad (1.5)$$

Как следует из уравнения (1.5), механическая характеристика имеет форму гиперболы. Изменяя сопротивление цепи якоря, можно кроме естественной характеристики 1 (рис. 1.9) получить и искусственные характеристики (кривая 2). Таким образом, механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением имеют гиперболический характер, являясь весьма мягкими. Скорость вращения двигателя существенно изменяется при изменениях нагрузки на валу. При малых нагрузках  $I < 0,25I_{ном}$  угловая скорость двигателя резко возрастает (двигатель «идет вразнос») до значения, опасного для механической прочности. Поэтому работа двигателя при нагрузке на валу менее  $0,25 P_{2ном}$  недопустима. Двигатели применяют для привода механизмов только при наличии между ними жестких передач (зубчатых, червячных, глухих муфт). Нельзя использовать ременные передачи, так как ремень во время работы может оборваться или соскочить со шкива.

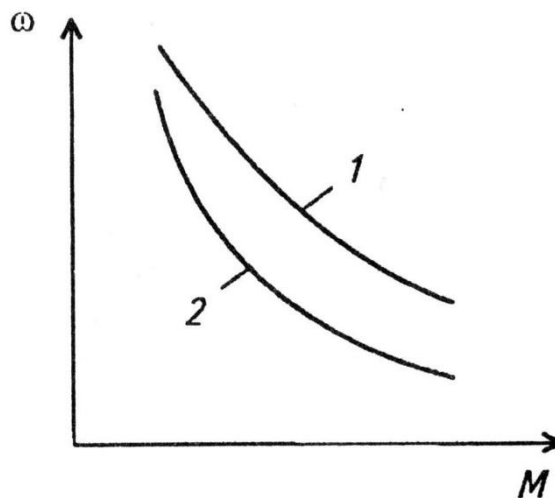


Рис. 1.9. Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением

Двигатели с последовательным возбуждением имеют определенные преимущества перед двигателями с параллельным возбуждением. Так, при одном и том же пусковом токе двигатель с последовательным возбуждением имеет больший пусковой момент: у двигателя с последовательным возбуждением момент пропорционален квадрату тока якоря  $M \propto I^2$ , а у двигателя с параллельным возбуждением момент пропорционален току  $M \propto I$ . Поскольку угловая скорость двигателя с последовательным возбуждением в соответствии с уравнением (1.5)  $\omega \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$ , а у двигателя с параллельным возбуждением  $\omega =$

$\text{const}$ , то мощность на валу двигателей соответственно будет  $P_2 = M\omega \propto M \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} \propto \sqrt{M}$  и  $P_2 \propto M$ . Следовательно, при изменении нагрузочного

момента на валу в широких пределах мощность  $P_2$ , а следовательно,  $P_1$  и ток  $I$  у двигателя с последовательным возбуждением будут изменяться в меньших пределах, чем у двигателя с параллельным возбуждением. В связи с этим перегрузки для двигателя с последовательным возбуждением менее опасны. Двигатели применяют для электропривода механизмов с тяжелыми условиями пуска и изменением момента в широких пределах (тяговые двигатели на транспорте, крановые двигатели).

Двигатели со смешанным возбуждением. Схема включения двигателя приведена на рисунке 1.10.

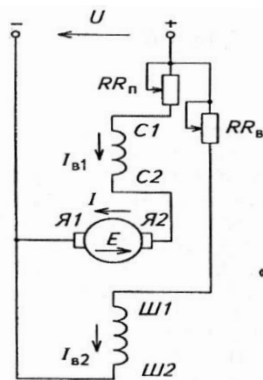


Рис. 1.10. Схема включения двигателя со смешанным возбуждением

Магнитный поток в двигателе создается совместным действием двух обмоток: параллельной и последовательной. Одна из обмоток является основной, а другая — дополнительной. В зависимости от условий работы двигателя основной обмоткой может быть как параллельная, так и последовательная. При этом на ее долю приходится не менее 75 % МДС двигателя.

Если основной обмоткой является последовательная, то она всегда включается с параллельной согласно, так чтобы магнитные потоки обмоток складывались. Если основной является параллельная обмотка, то обмотки включаются встречно.

Механические характеристики двигателя при согласном включении обмоток приведены на рисунке 1.11. В зависимости от соотношений МДС параллельной и последовательной обмоток характеристики могут иметь вид характеристики двигателя с параллельным (кривая 1) или последовательным (кривая 2) возбуждением. Достоинство двигателя со смешанным возбуждением с последовательной основной обмоткой заключается в том, что он, обладая всеми положительными свойствами двигателя с последовательным возбуждением, может работать и на холостом ходу.

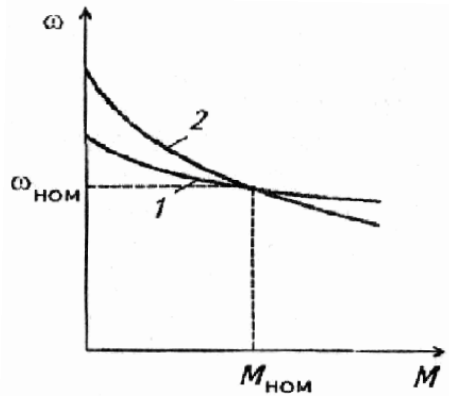


Рис. 1.11. Механическая характеристика двигателя со смешанным возбуждением

## 5. Регулирование частоты вращения

Угловая скорость вращения якоря двигателя имеет вид

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{I \sum R_a}{C\Phi} \quad (1.6)$$

Аналогично получим выражение для частоты вращения двигателя

$$n = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{I \sum R_a}{C_e\Phi} \quad (1.7)$$

Из формулы (1.7) следует три возможных способа регулирования частоты вращения: изменением сопротивления в цепи якоря ( $\sum R_a$ ); магнитного потока ( $\Phi$ ); питающего напряжения ( $U$ ).

Изменение сопротивления цепи якоря. Частоту вращения этим способом регулируют преимущественно у двигателей с параллельным и независимым возбуждением. Для этого в цепь якоря двигателя вводят дополнительный реостат  $RR_d$ , секции сопротивлений которого рассчитаны на продолжительную работу под током. Тогда частота вращения будет изменяться в соответствии с выражением

$$n = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{I \sum R_a + R_d}{C_e\Phi} = n_0 - \Delta n \quad (1.8)$$

где  $R_d$  — сопротивление дополнительного реостата;  $n_0 = U/(C_e\Phi)$  — частота вращения при идеальном холостом ходе;  $\Delta n$  — изменение частоты вращения, обусловленное изменением нагрузки на валу.

При неизменном моменте сопротивления нагрузки на валу  $M_c$  будет неизменным и электромагнитный момент  $M$ , а следовательно, и ток  $I$  цепи якоря. Тогда с увеличением сопротивления  $R_d$  частота вращения двигателя будет уменьшаться (рис. 2.12, а). При данном способе регулирования можно только уменьшать частоту вращения по сравнению с ее значением при работе двигателя на естественной механической характеристике. Диапазон регулирования незначителен ( $n_{\max}/n_{\min} = 3:1$ ), особенно при малых нагрузках на валу. Кроме того, способ регулирования не экономичен, так как сопровождается большими потерями мощности в сопротивлении  $R_d$ , особенно при малых частотах вращения.

Из выражения (1.8) следует, что

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{I \sum R_a + R_d}{U} = \frac{I^2 \sum R_a + R_d}{IU} = \frac{\Delta P_{эл}}{P_l} \quad (1.9)$$

Откуда

$$\Delta P_{эл} = P_l \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1.10)$$

Следовательно, чем меньше  $\eta$ , тем больше электрические потери мощности.

Изменение магнитного потока. Этот способ регулирования частоты вращения наиболее распространен и экономичен. В двигателях с параллельным и независимым возбуждением магнитный поток изменяют путем изменения сопротивления регулировочного реостата в цепи обмотки возбуждения. В двигателях с последовательным возбуждением регулировочным реостатом шунтируют обмотку возбуждения.

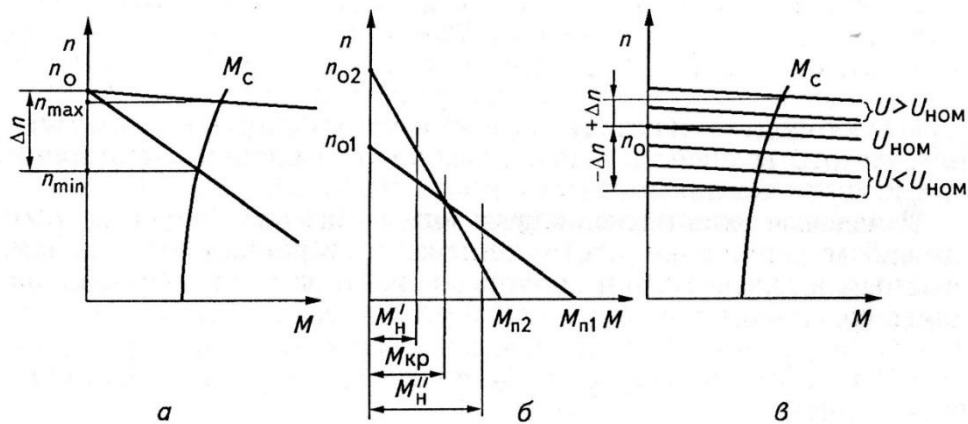


Рис. 1.12. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока изменением сопротивления цепи якоря (а), магнитного потока (б) и значения питающего напряжения (в)

Механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением, практически линейна и может быть построена по двум точкам:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M \sum R_a}{C_e \Phi^2} \quad (1.11)$$

В режиме холостого хода двигателя (первая точка) момент

$M \approx 0$ , а частота вращения  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ . При пуске двигателя (вторая точка)  $\eta = 0$ , а

момент  $M_{п} = C_e \Phi I_{пуск}$ , где  $I_{пуск} = U / \sum R_a$ .

На рисунке 1.12, б показаны две механические характеристики двигателя при разных значениях магнитного потока. С уменьшением потока частота вращения  $n_0$  увеличивается, а пусковой момент  $M_{п}$  уменьшается. Характеристики пересекаются при некотором значении момента  $M_{кр}$ . Из рисунка следует, что при значении нагрузочного момента  $M'_H < M_{кр}$  с уменьшением магнитного потока увеличивается частота вращения двигателя, а при  $M''_H > M_{кр}$  снижается и частота вращения. Обычно у двигателей средней и большой мощности при уменьшении магнитного потока частота вращения увеличивается, а у двигателей малой мощности и микродвигателей, наоборот, уменьшается.

При данном способе регулирования можно изменять частоту вращения только в сторону ее повышения относительно номинального значения. Диапазон регулирования обычно 2 : 1, но может быть и выше. При неизменном моменте нагрузки из-за уменьшения магнитного потока в процессе регулирования увеличивается ток якоря, что отрицательно сказывается на работе двигателя. Преимущество способа заключается в том, что при регулировании отсутствуют потери мощности.

Изменение питающего напряжения. Благодаря этому способу можно регулировать частоту вращения в широких пределах. Действительно, при изменении напряжения на зажимах двигателя частота вращения

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I \sum R_a}{C_e \Phi} = n_0 - \Delta n \quad (1.12)$$

будет изменяться лишь за счет изменения составляющей  $n_0$ , а составляющая  $\Delta n$ , обусловленная постоянной нагрузкой на валу двигателя, остается неизменной. Поэтому механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением будут представлять собой семейство параллельных прямых (рис. 1.12, в). Обычно при регулировании «вниз» уменьшаются напряжение и частота вращения вала двигателя.

Преимущества способа: отсутствие дополнительных потерь мощности, связанных с регулированием в большом диапазоне (10:1, 100:1 и выше); возможность регулирования частоты вращения при малых нагрузках. Недостаток способа — необходимость применения специальных устройств для регулирования напряжения.

## 6. Режимы работы электродвигателей постоянного тока.

Электрические двигатели, как правило, используют не только для вращения механизмов, но и для их торможения. Электрическое торможение позволяет быстро остановить механизм или уменьшить его частоту вращения без применения механических тормозов.

Различают три вида электрического торможения двигателей постоянного тока: 1) рекуперативное торможение — генераторное торможение с отдачей электрической энергии в сеть; 2) динамическое или реостатное торможение — генераторное торможение с гашением выработанной энергии в реостате, подключенном к обмотке якоря; 3) электромагнитное торможение — торможение противотоком.

Во всех указанных режимах электромагнитный момент  $M$  воздействует на якорь в направлении, противоположном  $n$ , т. е. является тормозным.

Рекуперативное торможение. Двигатель с параллельным возбуждением переходит в режим рекуперативного торможения при увеличении его частоты вращения  $n$  выше  $n_0 = U/C_e \Phi$ . В этом случае ЭДС машины становится больше напряжения сети и ток, согласно выражению  $I_a = (E - U)/\sum R_a$ , изменяет свое направление, т. е. двигатель переходит в генераторный режим. В этом режиме машина создает тормозной момент, а выработанная электрическая энергия отдается в сеть и может быть полезно использована.

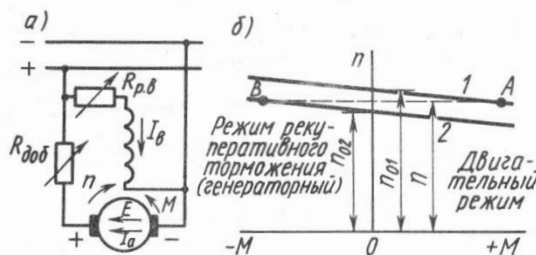


Рис. 1.13. Схема (а) и механические характеристики машины постоянного тока в двигательном и генераторном режимах (б)

В машине с параллельным возбуждением (рис. 1.13 а) механические характеристики генераторного режима являются продолжением механических характеристик двигательного режима в область отрицательных моментов (рис. 1.13, б). Поэтому переход из двигательного режима в генераторный может происходить автоматически, если под действием внешнего момента якорь будет вращаться с частотой  $p > p_0$ . Можно перевести машину в генераторный режим и принудительно, если перевести ее на работу с характеристики 1 на характеристику 2, уменьшив  $p_0$  путем увеличения магнитного потока (тока возбуждения) или снижения напряжения, подводимого к двигателю. В этом случае некоторой частоте вращения  $p$  соответствует на характеристике 1 двигательный режим (точка А), а на характеристике 2—режим рекуперативного торможения (точка В).

Двигатели с последовательным возбуждением не могут переходить в режим рекуперативного торможения. При необходимости рекуперативного торможения схему двигателей в тормозном режиме изменяют, превращая двигатели в генераторы с независимым возбуждением.

Двигатели со смешанным возбуждением могут автоматически переходить в генераторный режим, что обусловило их применение в троллейбусах, трамваях и других устройствах с частыми остановками, где двигатель должен обладать мягкой механической характеристикой.

Динамическое торможение. При этом виде торможения двигателя с параллельным возбуждением обмотку якоря отключают от сети и присоединяют к ней реостат  $R_d$  (рис. 1.14, а). При этом машина работает как генератор с независимым возбуждением, создает тормозной момент, но выработанная электрическая энергия бесполезно гасится в реостате. Регулирование тока  $I_a = E / \sum R_a + R_d$ , т. е. тормозного момента  $M$ , осуществляют путем изменения сопротивления  $R_d$ , подключенного к обмотке якоря или ЭДС  $E$  (воздействуют на ток возбуждения). При  $n = 0$  тормозной момент  $M$  равен нулю, следовательно, машина не может быть заторможена в неподвижном состоянии.

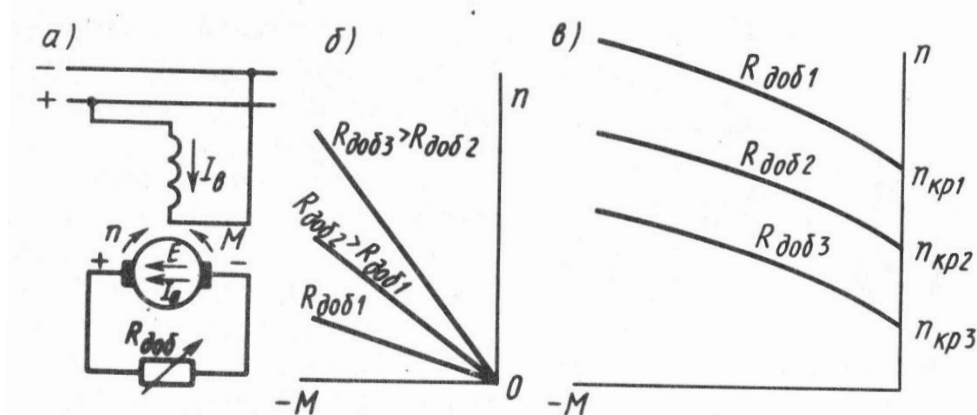


Рис. 1.14. Схема (а) и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением в режиме динамического торможения (б, в)

Двигатель с последовательным возбуждением может работать в режиме динамического торможения при независимом возбуждении и при самовозбуждении. При независимом возбуждении обмотку возбуждения отключают от обмотки якоря и подключают к питающей сети последовательно с резистором, сопротивление которого выбирают так, чтобы ток возбуждения не превышал номинального значения. При этом механические характеристики двигателя линейные (рис. 1.14, б). При самовозбуждении при переводе машины в генераторный режим необходимо переключить провода, подводящие ток к обмотке возбуждения (рис. 1.15, а, б). Последнее необходимо для того,

чтобы при изменении направления тока в якоре (при переходе с двигательного режима в генераторный) направление тока в обмотке возбуждения оставалось неизменным и создаваемая этой обмоткой МДС  $F_{\text{в}}$  совпадала по направлению с МДС  $F_{\text{ост}}$  от остаточного магнетизма. В противном случае генераторы с самовозбуждением размагничиваются.

Механические характеристики двигателя при самовозбуждении нелинейны (рис. 1.14, в). Самовозбуждение возможно только при частоте вращения, большей некоторого критического значения  $n_{\text{кр}}$ , при котором вольт-амперная характеристика сопротивления цепи якоря располагается по касательной к зависимости  $E = f(I_a)$ , т.е. при увеличении  $R_d$  оно возможно при более высоких частотах вращения ( $n_{\text{кр1}} > n_{\text{кр2}} > n_{\text{кр3}}$ ).

Двигатель со смешанным возбуждением также может работать в режиме динамического торможения.

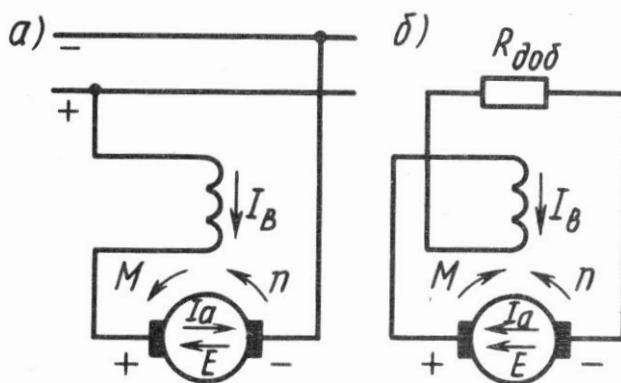


Рис. 1.15. Схемы машины с последовательным возбуждением в режимах двигательном(а) и динамического торможения (б)

Электромагнитное торможение. В этом режиме изменяют направление электромагнитного момента  $M$ , сохраняя неизменным направление тока из сети, т. е. момент делают тормозным. Последнее осуществляют так же, как и при изменении направления вращения двигателя — путем переключения проводов, подводящих ток к обмотке якоря (рис. 1.16, а) или к обмотке возбуждения. Чтобы ограничить значение тока в этом режиме, в цепь обмотки якоря вводят добавочное сопротивление  $R_d$ . Регулирование тока  $I_a = \frac{U + E}{R_a + R_d}$ , т. е. тормозного момента  $M$ , осуществляют путем изменения сопротивления  $R_d$  или ЭДС  $E$  (тока возбуждения  $I_B$ ). Механические характеристики в этом режиме для двигателей с параллельным и последовательным возбуждением показаны на рис. 1.16, б, в.

С энергетической точки зрения электромагнитное торможение является наиболее невыгодным, поскольку машина потребляет как механическую, так и электрическую энергию, которые гасятся в обмотке якоря и во включенном в ее цепь реостате.



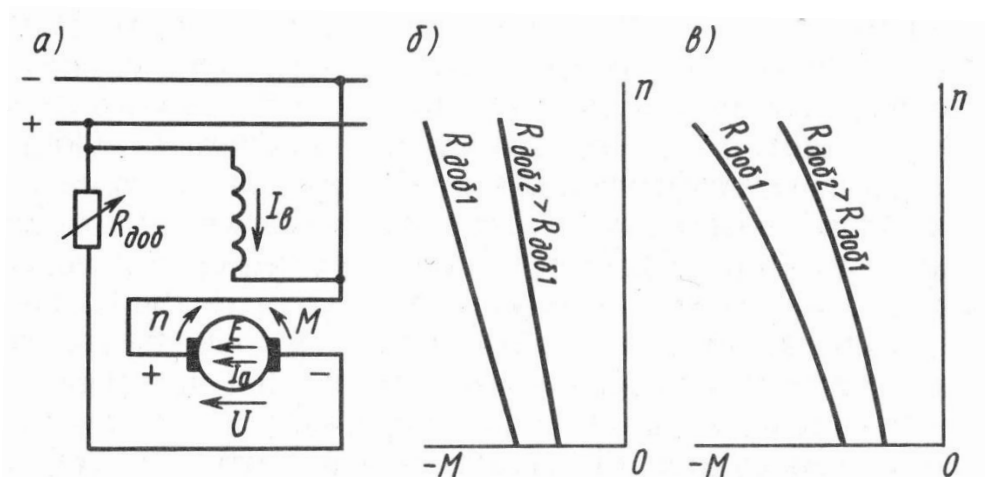


Рис. 1.16. Схема (а) и механические характеристики двигателей в режиме электромагнитного торможения (б, в)

Однако при этом способе можно получать большие тормозные моменты при низких частотах вращения и даже при  $n = 0$ , поскольку в этом случае ток  $I_a = U / \sum R_a + R_d$ .

## 1.2 Лекция № 2(2часа).

Тема: «Трёхфазный асинхронный электродвигатель»

### 1.2.1. Вопросы лекции

1. Устройство и принцип действия трёхфазного асинхронного электродвигателя.
2. Уравнение механической характеристики
3. Выражение механической характеристики через каталожные данные
4. Построение механической характеристики по каталожным данным

### 1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. Устройство и принцип действия трёхфазного асинхронного электродвигателя.

Устройство. Конструктивно асинхронный двигатель состоит из неподвижного статора и размещенного внутри его вращающегося ротора (рис. 2.1). Их поверхности разделены равномерным воздушным зазором 0,2...1,5 мм.

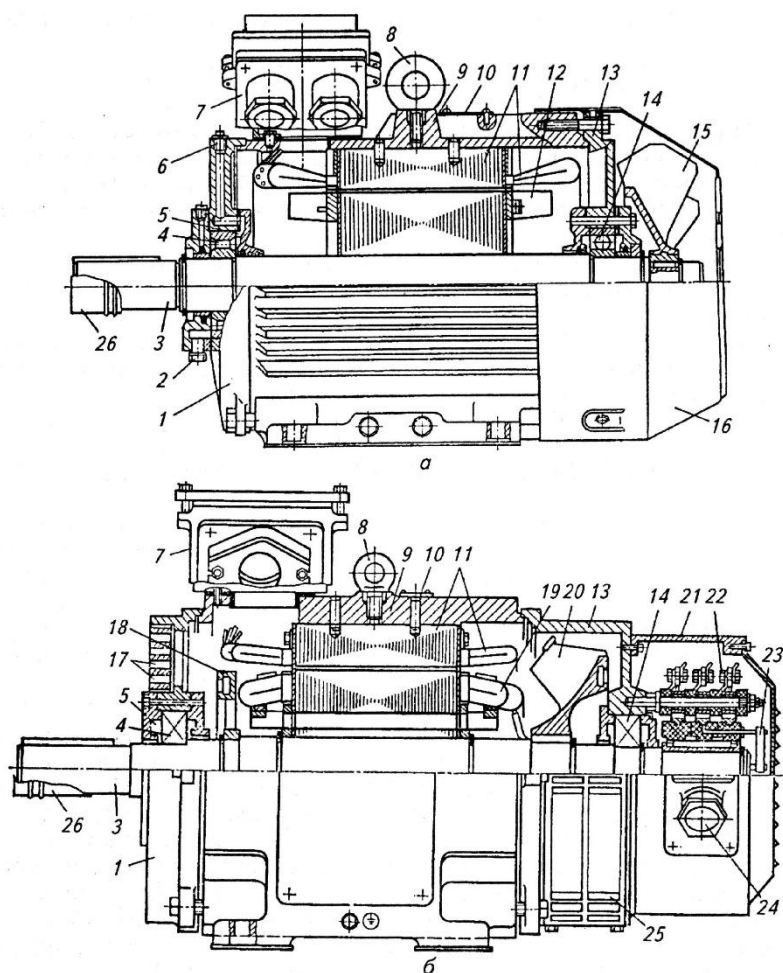


Рис. 2.1. Схемы асинхронных двигателей серии 4А:

а — короткозамкнутый степени защиты IP44 сельскохозяйственного исполнения (4А...СУ1);

б — с контактными кольцами степени защиты IP23 (4АНК...); 1 и 13 — подшипниковые щиты; 2 — торцевое окно в щите; 3 — вал; 4 — роликовый подшипник; 5 — камера для смазки; 6 — масленка; 7 — коробка выводов; 8 — рым; 9 — корпус (станина); 10 — паспортная табличка; 11 — статор; 12 и 19 — короткозамкнутый и фазный роторы; 14 — упорный шариковый подшипник; 15 — центробежный вентилятор наружного обдува; 16 — кожух вентилятора; 17 — пробки для смены смазки; 18 — балансировочное кольцо; 20 — центробежный вентилятор; 21 — короб с контактными кольцами; 22 — токосъем; 23 — токопровод к контактному кольцу; 24 — штуцер; 25 — отверстия (жалюзи) для выхода охлаждающего воздуха; 26 — упаковочная бумага

Статор состоит из корпуса (станины), внутри которого встроен сердечник с обмоткой. Сердечник в виде полого цилиндра собирают из отдельных изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,35...0,5 мм, которые скрепляют скобами, шпильками или сварным швом. Листы имеют кольцевую форму с пазами по окружности внутреннего диаметра, что позволяет создать на внутренней поверхности сердечника при его сборке продольные пазы. В пазы сердечника укладывают обмотку. Последняя состоит из отдельных секций (катушек). Начала и концы обмоток фаз трехфазного двигателя обозначают буквами русского алфавита соответственно С1—С4, С2—С5 и С3—С6 и выводят на клеммы коробки выводов. Выводных концов может быть 6 или 3, а схема соединения обмоток — звезда или треугольник. У двигателей, разработанных после

01.01.1987 г. (серии 5А, RA), начала и концы обмоток фаз статора обозначают буквами латинского алфавита U1 – U2; V1 – V2; W1 – W2.

Роторы асинхронных двигателей бывают двух видов: с коротко-замкнутой и фазной обмотками. В зависимости от этого и сами асинхронные двигатели называют двигателями с коротко-замкнутым или фазным ротором.

Сердечник ротора выполняют из неизолированных листов электротехнической стали. В них выштамповывают паз для обмотки и отверстие для вала. В фазных роторах в пазы укладывают обмотку, аналогичную статорной обмотке и образующую такое же число полюсов. Концы этой обмотки обычно соединяют в звезду, а начала выводят на три медных контактных кольца, на которые накладывают щетки. При таком исполнении ротора можно через щеточные контакты включать в цепь ротора трехфазный реостат для изменения силы тока и момента двигателя при пуске или для регулирования частоты вращения. Наиболее распространены ко-роткозамкнутые роторы. В таком роторе обмотка выполнена в виде так называемой «беличьей клетки». Ее выполняют путем заливки под давлением в пазы алюминиевых сплавов. При этом одновременно отливают стержни (проводники), лежащие в пазах, короткозамыкающие их кольца и лопасти для вентиляции.

На корпусе двигателя прикреплена табличка, на которой приведены номинальные данные двигателя, в том числе указаны схема соединения обмоток статора и соответствующее ей номинальное напряжение питающей сети, например схема Д/У, номинальное напряжение 220/380 В. Последнее означает, что при напряжении сети 220 В обмотку статора соединяют треугольником, а при напряжении 380 В — звездой.

Принцип действия. Асинхронные машины — это электрические машины переменного тока, у которых в установившемся режиме работы магнитное поле, участвующее в процессе преобразования энергии, и проводники пересекающиеся этим полем, имеют разные частоты вращения.

Асинхронные машины преимущественно используют в качестве электрических двигателей. Асинхронные электродвигатели служат для привода различных механизмов, преобразуя электрическую энергию в механическую. Их преимущества — простота конструкции, технологичность изготовления, высокая надежность при эксплуатации и др.

В качестве генераторов электрической энергии асинхронные машины не получили распространения из-за сложности их возбуждения и регулирования напряжения. Генераторный режим асинхронных машин используют в основном для их торможения, когда они нормально работают двигателями, например в крановых механизмах.

Принцип действия асинхронных машин, как и других электрических машин, основан на явлении электромагнитной индукции и возникновении электромагнитных сил. В асинхронных машинах основное магнитное поле создается МДС обмотки статора. Обмотку статора, например трехфазного асинхронного двигателя, выполняют в частном случае в виде трех катушек, смещенных в пространстве одна относительно другой на  $120^\circ$  и соединенных звездой или треугольником. При питании обмотки от сети трехфазного синусоидального тока возникает вращающееся магнитное поле с частотой вращения

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.1)$$

Где  $f_1$  - частота питающего напряжения;  $p$  - число пар полюсов магнитного поля, определяемое числом катушек обмотки.

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники ротора и в соответствии с явлением электромагнитной индукции индуцирует в них ЭДС  $E_2$ , направление которой определяют по правилу правой руки (рис. 2.2.).

Под действием ЭДС  $E_2$  в короткозамкнутой обмотке ротора будут протекать токи  $I_2$ , которые вследствие индуктивности обмотки отстают от ЭДС  $E_2$  на некоторый угол  $\psi_2$ . На проводники ротора с током  $I_2$ , находящиеся в магнитном вращающемся поле статора,

будут действовать электромагнитные силы  $F$ , направление которых определяют по правилу левой руки. Образованная от сил, приложенных ко всем проводникам, результирующая пара сил создает электромагнитный вращающий момент, увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем, т. е.

$$M = C_M \Phi_m I_2 \cos \psi_2 \quad (2.2)$$

где  $C_M$  — коэффициент;  $\Phi_m$  — амплитудное значение магнитного потока вращающегося поля статора;  $I_2 \cos \psi_2$  — активная составляющая тока ротора.

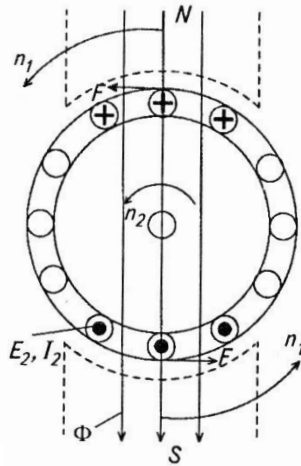


Рис. 2.2. К принципу действия асинхронного двигателя.

Ротор приходит во вращение, и его установившаяся частота вращения  $n_2$  будет определяться из условия равновесия электромагнитного момента  $M$  и тормозного момента, создаваемого силами трения, и приводимым во вращение рабочим механизмом.

Частота вращения ротора  $n_2$  принципиально всегда меньше частоты вращения магнитного поля  $n_1$ , так как при  $n_1 = n_2$  проводники ротора не будут пересекаться магнитным полем, в них не будут индуцироваться ЭДС, токи и не создается электромагнитный вращающий момент. Таким образом, работоспособность асинхронного двигателя возможна только в случае, когда  $n_2 \neq n_1$ . Это и определило название машин - асинхронные, т.е. имеющие несинхронное (несовпадающее) вращение магнитного поля статора и ротора. Частоту вращения магнитного поля  $n_1$  называют синхронной частотой вращения.

Скольжение. Разность частот вращения магнитного поля и ротора, выраженная в долях или процентах от частоты вращения магнитного поля, называют скольжением:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; S\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Из выражения (2.3) частоту вращения ротора определяют как

$$n_2 = n_1 (1 - S); n_2 = n_1 \left(1 - \frac{S\%}{100}\right) \quad (2.4)$$

При неподвижном роторе, например в момент пуска, скольжение  $S = 1$ , а при номинальной нагрузке двигателя  $S_{ном} = 0,025 \dots 0,07$ . Скольжение, равное  $S = 0$ , в двигательном режиме недостижимо, но принципиально двигательный режим соответствует диапазону скольжений  $0 \leq S \leq 1$ .

При вращении ротора с помощью приводного двигателя с  $n_2 > n_1$  асинхронная машина переходит в генераторный режим и  $S < 0$ .

Асинхронная машина может быть использована также в режиме электромагнитного тормоза. В этом случае направления вращения ротора и магнитного поля противоположны, т. е.  $S > 1$ .

## 2. Уравнение механической характеристики

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость частоты вращения ротора от вращающего момента:  $n_2 = f(M)$  или наоборот:  $M = f(n_2)$ . Иногда ее представляют как зависимость момента от скольжения  $M = f(s)$ .

Механическую характеристику в виде графической зависимости  $M = f(s)$  можно получить из круговой диаграммы или в виде аналитической зависимости из рассмотрения, например, Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя. Из указанной схемы электромагнитная мощность, передаваемая со статора на ротор,

$$P_{эм} = m_1 I_2' \frac{R_2'}{s} \quad (2.5)$$

Приведенный ток ротора

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{R_1 + R_2'/s + j(X_1 + X_2')}} \quad (2.6)$$

Подставив выражение (2.6) в уравнение (2.5), получим

$$P_{эм} = \frac{m_1 U_1^2 R_2'/s}{\sqrt{R_1 + R_2'/s + j(X_1 + X_2')}} \quad (2.7)$$

и электромагнитный момент

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1^2 R_2'/s}{\omega_1 \left[ \sqrt{R_1 + R_2'/s + j(X_1 + X_2')} \right]} \quad (2.8)$$

Эта характеристика расписывается уравнением Клосса.

Из этой формулы видно, что момент зависит от конструктивных параметров двигателя, частоты и напряжения сети. Каждому значению скольжения (частоте вращения ротора) соответствует свое значение вращающего момента. И наоборот: каждому значению момента нагрузки соответствует своя частота вращения ротора. Изменить характеристику, согласно формуле Клосса, можно, например, изменяя напряжение сети.

Поскольку в выражении (2.8) все величины, кроме скольжения  $s$ , постоянны, то оно и будет являться аналитической зависимостью  $M = f(s)$ , т. е. механической характеристикой асинхронной машины. Графически характеристика показана на рисунке 2.4.

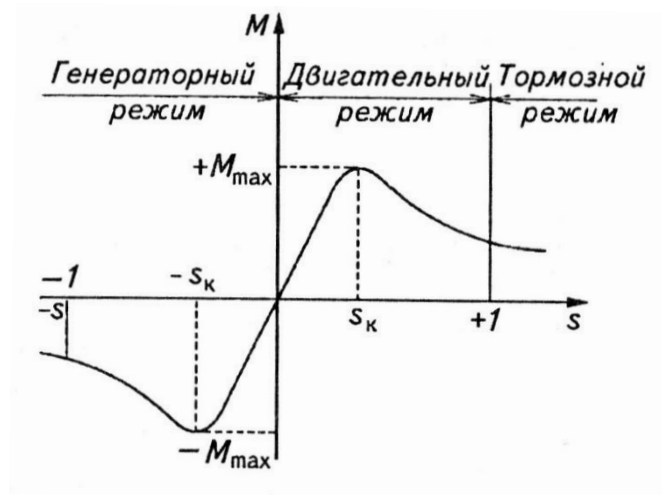


Рис.2.4. Механическая характеристика асинхронной машины

Вид кривой  $M=f(s)$  объясняют так. Как уже отмечалось, электромагнитный момент пропорционален магнитному потоку  $\Phi_r$  и активной составляющей тока ротора  $I_2 \cos \Psi_2$  по выражению (2.2). При постоянном значении напряжения  $U_1$  величина потока  $\Phi_r$  также постоянная, поэтому характер изменения момента будет определяться изменением  $I_2 \cos \Psi_2$ . При скольжении  $s=0$  ток в роторе  $I_2 = 0$  и момент  $M = 0$ . С ростом скольжения ток  $I_2$  увеличивается [см. выражение (2.6.)],  $\cos \Psi_2$  уменьшается из-за повышения частоты тока в роторе  $f_2 = f_1 s$ , следовательно, из-за увеличения индуктивного сопротивления  $X_2 = 2\pi f_2 L_2$ . При скольжении  $s < s_k$  увеличение тока  $I_2$  преобладает над уменьшением  $\cos \Psi_2$  и момент  $M$  возрастает, а при  $s > s_k$  — наоборот, и момент снижается. Таким образом, при скольжении  $s_k$ , называемом критическим скольжением, момент имеет максимальное значение  $M_{\max}$ .

Для определения критического скольжения необходимо взять первую производную от выражения (2.8) и приравнять ее к нулю:  $dM/ds = 0$ . Решая полученное уравнение относительно  $s$ , получим

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_1 + X_2'}} \quad (2.9)$$

или, пренебрегая сопротивлением  $R_1$  из-за его малости ( $R_1 \ll X_1 + X_2'$ ), получим упрощенное выражение критического скольжения

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{X_1 + X_2'} \quad (2.10)$$

Подставив выражение (2.9) в формулу (2.8), определим максимальный момент

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_1 + X_2'} \right]} \quad (2.11)$$

или приближенно с учетом  $R_1 = 0$

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 (X_1 + X_2')} \quad (2.12)$$

Знак «+» относится к двигательному режиму, а знак «-» - к генераторному.

На механической характеристике асинхронного двигателя (рис. 2.5) можно отметить следующие характерные точки: точка А ( $s=1$ ,  $M_{\Pi}$ ) соответствует режиму работы с неподвижным ротором, где  $M_{\Pi}$  — пусковой момент двигателя; точка В ( $s_k$ ,  $M_{\max}$ ); точка С ( $s_{\text{ном}}$ ,  $M_{\text{ном}}$ ), где  $M_{\text{ном}}$  — номинальный момент двигателя, который он развивает при номинальной нагрузке на валу. В каталожных данных на асинхронные двигатели приведены кратности указанных моментов относительно номинального значения, например, для двигателей серии АИР кратность пускового момента  $K_{\Pi} = M_{\Pi}/M_{\text{ном}} = 1,3 \dots 2,3$ ; кратность максимального момента  $K_M = M_{\max}/M_{\text{ном}} = 1,9 \dots 3,0$ .

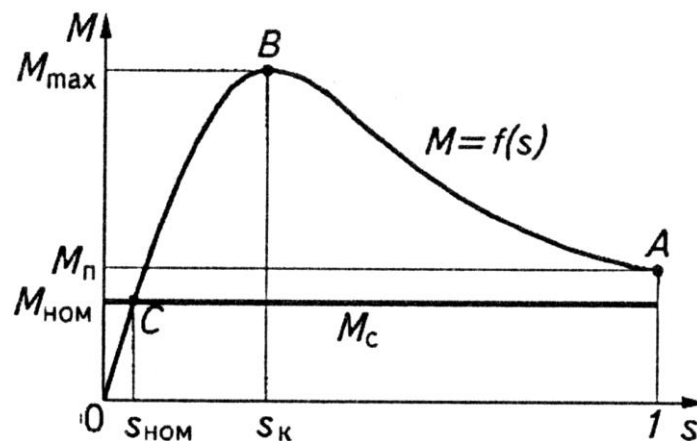


Рис. 2.5. Механическая характеристика асинхронного двигателя

#### 4. Выражение механической характеристики через каталожные данные

Квадратичная зависимость момента асинхронных двигателей от напряжения  $M \propto U_1^2$  является их недостатком, так как при незначительном снижении напряжения момент существенно изменяется. Момент при изменении напряжения

$$M = M_{\text{ном}} \left( \frac{U_1}{U_{1\text{ном}}} \right)^2 \quad (2.13)$$

Если, например, напряжение снизится на 30%, т.е.  $U_1 = 0,7U_{1\text{ном}}$ , то

$$M = M_{\text{ном}} (0,7)^2 = 0,49M_{\text{ном}} \quad (2.14)$$

т. е. изменится более чем в 2 раза.

Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения показаны на рисунке 2.6, а. Изменение напряжения влияет не только на значения моментов, но и на значение частоты вращения двигателя. При снижении напряжения критическое скольжение в соответствии с выражением (2.9) остается неизменным, а скольжение, характеризующее режим работы двигателя, увеличивается ( $s_2 > s_1$ ). При некотором критическом напряжении  $U_{1\text{кр}}$  скольжение двигателя станет равным критическому значению, а развиваемый момент  $M_1 = M_{\max} = M_c$ .

Тогда

$$U_{1кр} \approx \frac{1}{m_1} \sqrt{2\omega_1 \left( X_1 + X'_2 \right) M_c} \quad (2.15)$$

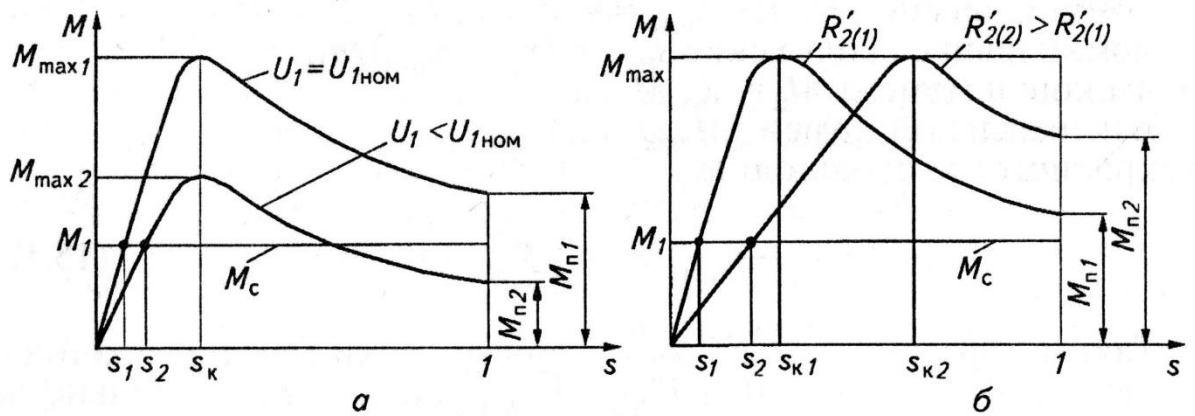


Рис. 2.6. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении: а – напряжения; б – активного сопротивления цепи ротора.

При дальнейшем незначительном снижении напряжения двигатель не в состоянии будет преодолеть момент сопротивления рабочей машины  $M_c$  и остановится. Такой исход режима называют иногда «опрокидыванием» двигателя.

Вид механической характеристики двигателя определяет также значение активного сопротивления цепи ротора  $R'_2$ . Как следует из выражений (2.11) и (2.9), максимальный момент двигателя не зависит от величины сопротивления  $R'_2$ , а критическое скольжение пропорционально этому сопротивлению. Следовательно, если в двигателе увеличить сопротивление  $R'_2$ , то его характеристики в области скольжений  $0 \leq s \leq s_k$  будут более пологими (рис. 2.6, б). Влияние активного сопротивления цепи ротора сказывается также на значениях пускового момента и скольжении установившегося режима работы. С увеличением  $R'_2$  пусковой момент и скольжение увеличиваются. Однако при этом возрастают электрические потери мощности в роторе и снижается коэффициент полезного действия двигателя.

Пуск двигателя возможен, если его пусковой момент  $M_n$  больше момента  $M_c$ , равного сумме моментов холостого хода двигателя и сопротивления рабочей машины, приводимой во вращение. Под действием пускового момента ротор двигателя начинает вращаться, его частота вращения растет, а момент изменяется в соответствии с механической характеристикой. Установившийся режим наступает, когда момент двигателя уравнивается противодействующим моментом, например в точке С (см. рис. 2.5). При этом  $M_{ном} = M_c$  и двигатель имеет частоту вращения со скольжением  $s_{ном}$ .

Если при кратковременных нарушениях равновесия  $M_{ном} = M_c$  из-за изменения напряжения питающей сети или момента сопротивления  $M_c$  двигатель способен восстанавливать установившуюся частоту вращения, то он характеризуется устойчивостью работы. Из механической характеристики (см. рис. 2.5) следует, что устойчивая работа двигателя будет на участке ОВ. Действительно, при работе на этом участке всякое изменение, например, момента  $M_c$  сопровождается появлением избыточного момента  $M_{изб} = M - M_c$  на валу двигателя, после чего вновь восстанавливается установившийся режим работы с  $M_{изб} = 0$  и постоянной частотой вращения. Если, например,  $M_c > M$ , то избыточный момент будет тормозным. Это приведет к увеличению скольжения и в соответствии с механической характеристикой к увеличению момента двигателя до значения, когда  $M = M_c$ .

Таким образом, устойчивая работа асинхронного двигателя с нагрузкой  $M_c = \text{const}$  будет при скольжениях  $s < s_k$  и моментах  $M \ll M_{max}$ . Работа двигателя на участке АВ



неустойчива и поэтому не может быть осуществлена. Отношение  $K_M = M_{\text{тах}}/M_{\text{ном}}$  называют перегрузочной способностью двигателя.

5. Построение механической характеристики асинхронного двигателя по каталожным данным.

Для построения механической характеристики асинхронного двигателя используют приближенные аналитические выражения механической характеристики, приняв в выражении (3.8) сопротивление обмотки статора равным  $R_1 = 0$ . Упрощенное выражение для характеристики может быть записано в виде

$$\frac{M}{M_{\text{мах}}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \quad (2.16)$$

В каталожных данных асинхронных двигателей приведены номинальные мощность  $P_{\text{ном}}$  и частота вращения  $n_{\text{ном}}$ , а также кратности  $K_M = M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}}$  и  $K_P = M_P/M_{\text{ном}}$ . Используя эти данные, можно найти:

- номинальный момент  $M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}}$ ;
- номинальное скольжение  $s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{\text{ном}})/n_1$ ;
- пусковой момент  $M_P = K_P M_{\text{ном}}$ ;
- максимальный момент  $M_{\text{мах}} = K_M M_{\text{ном}}$ ;
- критическое скольжение

$$s_K = s_{\text{ном}} \left( K_M + \sqrt{K_M^2 - 1} \right) \quad (2.17)$$

Таким образом, находят характерные точки механической характеристики: А ( $s = 1$ ,  $M_P$ ); В ( $s_K$ ,  $M_{\text{мах}}$ ); С ( $s_{\text{ном}}$ ,  $M_{\text{ном}}$ ). Реально на участке АВ механической характеристики (см. рис. 2.5) имеется одна характерная точка с минимальным моментом. В каталогах для указанной точки приведена кратность  $K_{\text{мин}} = M_{\text{мин}}/M_{\text{ном}}$ .

Подставив в выражение любое значение скольжения из диапазона  $0 \leq s \leq 1$ , находят соответствующий ему момент двигателя, что даёт возможность построить механическую характеристику  $M=f(s)$ .

Расчёты существенно упрощаются, если момент определять в относительных единицах  $M_* = M/M_{\text{мах}}$ . Тогда уравнение механической характеристики принимает вид

$$M_* = 2 / \left( \frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} \right) \quad (2.18)$$

### 1.3. Лекция № 3 (2 часа).

Тема: «Основы электропривода»

#### 1.3.1. Вопросы лекции

1. Понятие и определения электропривода
2. Историческое развитие электропривода. Направления развития электропривода.
3. Классификация электроприводов
4. Основное уравнение движения электропривода
5. Механические характеристики

### 1.3.2. Краткое содержание вопросов

#### 1. Понятие и определения электропривода

Любое производственное устройство или механизм с приводом рабочих органов от электродвигателя (рис. 1) состоит:

- из рабочей машины;
- электродвигателя;
- передаточного механизма или трансмиссии;
- устройства управления;
- устройства преобразования параметров напряжения, подаваемого на зажимы электродвигателя.

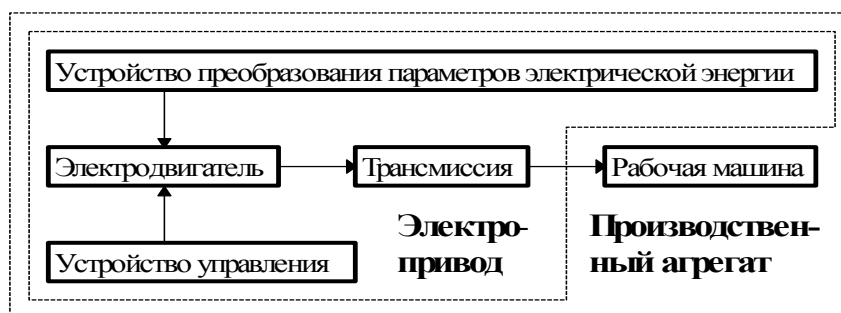


Рис. 1: Структурная схема электрифицированного производственного агрегата

Электрическая энергия из питающей электрической сети поступает на зажимы электродвигателя в общем случае через преобразователь, с помощью которого параметры подводимой энергии (напряжение, частота) приводятся в соответствие с теми параметрами, на которые рассчитан электродвигатель. Электродвигатель преобразует электрическую энергию в необходимую для действия рабочей машины механическую энергию. Последняя с вала электродвигателя поступает на приводной вал машины через трансмиссию, в которую могут входить муфты, валы, ремни, шестерни и другие элементы трансмиссии. Благодаря этому рабочая машина осуществляет технологический процесс, т. е. целенаправленно воздействует своими рабочими органами на перерабатываемый продукт. Управление технологическим процессом осуществляется устройством управления, воздействующим на поток электрической энергии от сети к электродвигателю. В простейшем случае воздействие осуществляется с помощью силовых контактов контакторов или магнитных пускателей.

Определение электрического привода как технического устройства дано в ГОСТ 16593-79 «Электроприводы. Термины и определения». Электрическим приводом называется электромеханическое устройство, предназначенное для приведения в движение рабочих органов машин и управления их технологическими процессами, состоящее из передаточного устройства, электродвигательного устройства, преобразовательного устройства и управляющего устройства.

Мощность, развиваемая рабочими органами во всех случаях, несмотря на их многообразие, характеризуется произведением силы и скорости воздействия рабочих органов на перерабатываемый продукт

$$P_{PO} = F_{PO} v_{PO} \quad (1)$$

или, если рабочий орган вращающийся, произведением вращающего момента, приложенному к нему, и частоты вращения

$$P_{PO} = M_{PO} \omega_{PO} \quad (2)$$

Иногда она равна, а чаще всего больше полезной мощности, необходимой для требуемого по технологическим условиям изменения внутренней энергии перерабатываемого или перемещаемого продукта,

$$P_{\Pi} = P_{PO} \eta_{PO}, \quad (3)$$

Мощность на приводном валу рабочей машины превосходит мощность рабочего органа на величину потерь мощности  $\Delta P_M$  внутри машины

$$P_M = M_{CM} \omega_M = P_{PO} + \Delta P_M = P_{PO} / \eta_M = P_{\Pi} / \eta_{PO} \eta_M. \quad (4)$$

Аналогично, мощность на валу электродвигателя

$$P_2 = M_{CD} \omega_D = P_M + \Delta P_{TP} = P_M / \eta_{TP} = P_{\Pi} / \eta_{PO} \eta_M \eta_{TP} \quad (5)$$

а мощность на зажимах

$$P_1 = mUI \cos \varphi = P_2 + \Delta P_D = P_2 / \eta_D = P_{\Pi} / \eta_{PO} \eta_M \eta_{TP} \eta_D, \quad (6)$$

где  $\eta_{PO}$ ,  $\eta_M$ ,  $\eta_{TP}$  и  $\eta_D \rightarrow$  соответственно коэффициент полезного действия рабочего органа, передаточной части машины, трансмиссии и электродвигателя;

$\Delta P_M$ ,  $\Delta P_{TP}$  и  $\Delta P_D \rightarrow$  потери мощности внутри машины, в трансмиссии и в электродвигателе;

$M_{CM}$  и  $M_{CD} \rightarrow$  моменты сопротивления рабочей машины на приводном валу машины и на валу электродвигателя;

$m$ ,  $U$ ,  $I$  и  $\cos \varphi \rightarrow$  число фаз, напряжение, ток и коэффициент мощности электродвигателя.

## 2. Историческое развитие электропривода

Одной из самых ранних вех в зарождении электропривода следует считать осуществление в 1821 году Фарадеем вращения электромагнита вокруг прямолинейного проводника с током, что по существу явилось созданием прообраза электродвигателя.

Уже вскоре после этого в 1835 году русский академик Якоби построил первый электродвигатель постоянного тока и применил его для привода гребных колёс лодки, которая при испытаниях перемещалась по Неве со скоростью 2,5 км/час.

Однако поистине революционное значение в становлении электропривода явилось изобретение русским инженером Доливо-Добровольским в 1891 году бесколлекторного асинхронного двигателя и создание для него системы переменного трёхфазного тока. Вследствие своей простоты и вытекающей из этого высокой надёжности трёхфазного асинхронного двигателя он получил преимущественное распространение для привода машин как в промышленности, так и в сельском хозяйстве. Именно с момента создания асинхронного электродвигателя начался интенсивный перевод технологических машин на электропривод, и его постоянное совершенствование. В процессе повышения технического уровня электропривода чётко просматривается ряд этапов, характеризующих степень его совершенства.

На первом этапе, когда электрический привод пришёл на смену паровому приводу, чаще всего путём простой замены паровой машины электрическим двигателем, преимущественное распространение получил общетрансмиссионный электропривод. При этом один электрический двигатель приводил в движение все рабочие машины предприятия или группу рабочих машин, а распределение механической энергии осуществлялось с помощью различного рода механических трансмиссий, проходящих по этажам и цехам предприятия.

Трансмиссионный электропривод из-за громоздкости и неудобств, связанных с размещением машин, был сравнительно быстро вытеснен одиночным электроприводом отдельных рабочих машин, при котором для каждой рабочей машины устанавливался свой электродвигатель. В связи с этим исчезали внешние цеховые трансмиссии, однако оставались трансмиссии внутри машин от приводного вала до рабочих органов. В настоящее время он широко используется в сельском хозяйстве. Одиночный электропривод совершенствуется в направлении упрощения трансмиссии и

конструктивного сближения с рабочей машиной, преобразуясь из простого одиночного в индивидуальный одиночный электропривод.

Если в трансмиссионном электроприводе один электродвигатель обслуживает группу машин, то в одиночном - группу рабочих органов машины. Это общее свойство позволяет объединить их под одним общим названием - групповой электропривод. Групповым электроприводом называется электропривод, при котором один электродвигатель приводит в движение несколько рабочих машин или несколько рабочих органов одной машины. Главным недостатком группового электропривода является невозможность управления технологическим процессом с помощью системы управления электроприводом. Для пуска в ход, останова и регулирования частоты вращения отдельных машин и рабочих органов требуются специальные механические устройства - управляемые муфты, коробки передач, фрикционы и т. п..

Рост единичной мощности технологических установок, необходимость автоматизации рабочих процессов машин и технологических линий, стремление к упрощению кинематики машин привели к замене группового электропривода индивидуальным. Индивидуальным электроприводом называется электропривод, при котором каждый рабочий орган машины приводится в движение отдельным электрическим двигателем. В зависимости от наличия трансмиссии между электродвигателем и рабочим органом индивидуальный электропривод подразделяется на простой индивидуальный и более совершенный особо индивидуальный.

### 3. Классификация электроприводов

В соответствии с ГОСТ - 16593 ЭП классифицируются по следующим характеристикам:

По количеству и связи исполнительных; рабочих органов.

1. Индивидуальный, в котором рабочий исполнительный орган приводится одним самостоятельным двигателем, приводом.
2. Групповой, в котором один двигатель приводит в действие исполнительные органы РМ или несколько органов одной РМ.
3. Взаимосвязанный, в котором два или несколько ЭМП или ЭП электрически или механически связаны между собой с целью поддержания заданного соотношения или равенства скоростей, или нагрузок, или положения исполнительных органов РМ.
4. Многодвигательный, в котором взаимосвязанные ЭП, ЭМП обеспечивают работу сложного механизма или работу на общий вал.
5. Электрический вал, взаимосвязанный ЭП, в котором для постоянства скоростей РМ, не имеющих механических связей, используется электрическая связь двух или нескольких ЭМП.

По типу управления и задаче управления.

1. Автоматизированный ЭП, управляемый путем автоматического регулирования параметров и величин.
2. Программно-управляемый ЭП, функционирующий через посредство специализированной управляющей вычислительной машины в соответствии с заданной программой.
3. Следящий ЭП, автоматически отрабатывающий перемещение исполнительного органа РМ с заданной точностью в соответствии с произвольно меняющимся сигналом управления.
4. Позиционный ЭП, автоматически регулирующий положение исполнительного органа РМ.
5. Адаптивный ЭП, автоматически избирающий структуру или параметры устройства управления с целью установления оптимального режима работы.

По характеру движения.

1. ЭП с вращательным движением.
2. Линейный ЭП с линейными двигателями.

3. Дискретный ЭП с ЭМП, подвижные части которого в установившемся режиме находятся в состоянии дискретного движения.

По наличию и характеру передаточного устройства.

1. Редукторный ЭП с редуктором или мультипликатором.

2. Электрогидравлический с передаточным гидравлическим устройством.

3. Магнетогидродинамический ЭП с преобразованием электрической энергии в энергию движения токопроводящей жидкости.

По роду тока.

1. Переменного тока.

2. Постоянного тока.

По степени важности выполняемых операций.

1. Главный ЭП, обеспечивающий главное движение или главную операцию (в многодвигательных ЭП).

2. Вспомогательный ЭП.

Ниже приведена классификационная схема электроприводов по признаку сближения с рабочей машиной

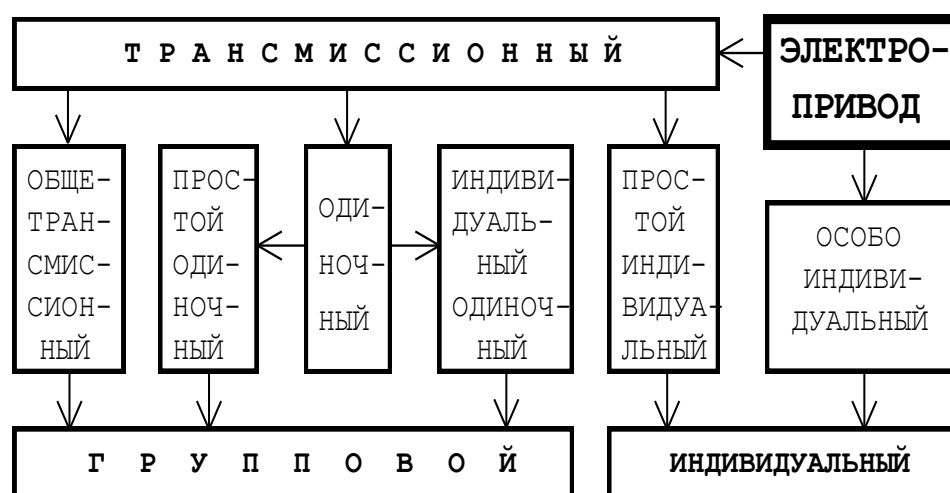


Рис. 6.2: Классификационная схема электропривода по степени сближения с рабочей машиной.

#### 4. Основное уравнение движения электропривода

В соответствии с законом Ньютона разность действующей на тело и противодействующей сил равна динамической силе, равной, в свою очередь, произведению массы тела на ускорение

$$F_d - F_c = F_{\text{дин}} = ma = m \frac{dv}{dt}. \quad (7)$$

Если тело с массой  $m$  совершает вращательное движение по радиусу  $r$ , то

$v = \omega r$ , а  $a = \varepsilon r$ , где  $\varepsilon$  - угловое ускорение, равное  $\frac{d\omega}{dt}$ . Тогда для вращательного движения, умножив левую и правую части уравнения на  $r$ , получим

$$M_d - M_c = M_{\text{дин}} = J\varepsilon = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (8)$$

где  $J$  - момент инерции,  $\text{кгм}^2$ .

Применительно к системе электропривода под моментом инерции понимается суммарный момент инерции всех движущихся частей электропривода, приведённый к

валу электродвигателя.  $M_d$  - момент вращающий, развиваемый электродвигателем на валу,  $M_c$  - статический момент сопротивления рабочей машины на этом же валу. Как момент электродвигателя, так и момент рабочей машины в общем случае зависят от частоты вращения, т.е. являются функциями частоты вращения. Обозначив наличие такой зависимости, получим уравнение в окончательном виде

$$M_d(\omega) - M_c(\omega) = M_{\text{дин}}(\omega) = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (9)$$

Данное уравнение называется основным уравнением движения электропривода, в которое входят две переменные величины: частота вращения и время. Анализируя уравнение, не трудно заметить, что система электропривода находится в состоянии равномерного движения (ускорение равно нулю) при равенстве моментов электродвигателя и рабочей машины. При этом частота вращения имеет постоянное (установившееся) значение. И наоборот, система находится в переходном состоянии от одной установившейся частоты вращения к другой частоте вращения, если момент электродвигателя больше момента сопротивления рабочей машины (ускорение) или если момент сопротивления больше момента электродвигателя (замедление).

Решение данного дифференциального уравнения относительно переменных (частоты вращения и времени) позволит получить зависимость частоты вращения от времени  $\omega = f(t)$ . Эта зависимость называется кривой разбега. Если выразить время в явном виде, то это зависимость времени, необходимого для разбега системы электропривода от начальной частоты вращения до  $\omega$ . Она является ключевой для решения многих вопросов при выборе электродвигателя к той или иной рабочей машине.

Во-первых, она необходима для расчёта длительности переходных периодов в технологических процессах, связанных с частыми пусками, остановками, реверсированием и регулированием частоты вращения рабочих органов машин, реализующим эти процессы. Во-вторых, для оценки степени перегрева электродвигателя за счёт дополнительного выделения тепла в переходных режимах. В-третьих, для определения порогов срабатывания (уставок) защитных и пусковых аппаратов, устанавливаемые одни для защиты цепей электродвигателя и питающей электрической сети от перегрузки, другие - для переключения ступеней пусковых и регулирующих реостатов в цепях электродвигателя.

## 5. Механические характеристики

Как уже было показано выше в основное уравнение движения электропривода входят зависимости моментов электродвигателя и рабочей машины от частоты вращения. Эти зависимости называются механическими характеристиками. Соответственно, механической характеристикой электродвигателя называется зависимость вращающего момента, развиваемого электродвигателем на его валу от частоты вращения

$M_d = f(\omega)$  или  $M_d(\omega)$ . Механической характеристикой рабочей машины называется зависимость момента сопротивления на валу рабочей машины от частоты вращения вала машины  $M_{cm} = f_m(\omega_m)$  или  $M_{cm}(\omega_m)$ . Например,  $M_{cm} = 54 + 6\omega$ . Решить основное уравнение движения электропривода можно лишь тогда, когда будут известны эти характеристики.

Механические характеристики могут быть заданы математическим выражением, таблицей или графиком. Например, на рисунке 4а приведен график одной из таких характеристик. В каждой точке характеристика имеет свой наклон к оси  $\omega$ . Чем круче характеристика, тем она считается жёстче. Жёсткостью характеристики в данной точке (обозначается символом  $\beta$ ) называется тангенс угла наклона характеристики в этой точке к оси  $\omega$ , равный производной характеристики в данной точке по  $\omega$

$$\beta = \operatorname{tg} \alpha = dM/d\omega \approx \Delta M / \Delta \omega \quad (7)$$

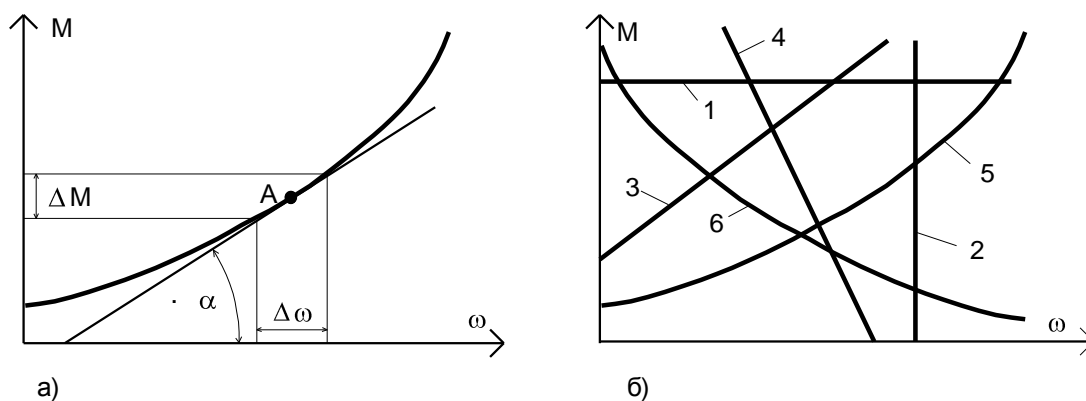


Рис. 6.4: Механические характеристики некоторых рабочих машин и электродвигателей.

Вид механических характеристик зависит от типов конкретно рассматриваемых электродвигателей и конкретно рассматриваемых рабочих машин. Например, на рисунке 4б показаны возможные виды таких характеристик. Характеристики 1, 2, 3 и 4 – прямолинейные. Их жёсткость во всех точках одинакова. Характеристики 3 и 5 – возрастающие, а характеристики 4 и 6 – падающие. Жёсткость первых из них больше нуля, а вторых – меньше нуля. Промежуточное положение среди них занимает механическая характеристика 1. Это абсолютно мягкая характеристика, жёсткость которой равна нулю. В противовес её характеристика 2 – абсолютно жёсткая (жёсткость равна бесконечности). Такой характеристикой обладает синхронный электродвигатель.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### 2.1. Лабораторная работа №1 (2 часа).

**Тема:** «Исследование электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения»

**2.1.1 Цель работы:** Научиться производить сборку схемы, осуществлять запуск электродвигателя, производить регулирование частоты вращения, изменять устанавливать и измерять параметры режимов работы.

**2.1.2 Задачи работы:** Снять зависимость частоты вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения от напряжения на якоре на холостом ходу.

**2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории

#### 2.1.4 Описание (ход) работы:

Электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения (шунтовой) имеет расположенную на полюсах статора обмотку возбуждения, выполненную из большого количества витков медного изолированного провода, и многосекционную обмотку якоря, уложенную по окружности в пазы железа якоря, набранного из отдельных, изолированных друг от друга листов электротехнической стали. Секции соединены между собой последовательно. Точки соединения секций выведены на пластины коллектора. Подвод тока к коллектору производится через угольные, графитовые или медно-

графитовые щётки. Условное графическое обозначение, маркировка выводов и подключение к сети шунтового ЭД осуществляется следующим образом:

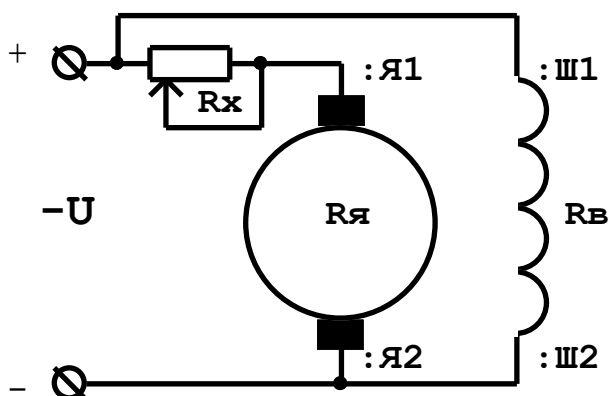


Рис. 1: Схема включения электродвигателя.

Под действием приложенного напряжения через обмотку возбуждения протекает ток возбуждения  $I_b = U/R_b$ , который создают между полюсами статора магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий обмотку якоря. В обмотке якоря под действием этого же напряжения возникает пусковой ток  $I_{яп} = U/(R_я + R_x)$ . В результате взаимодействия тока и магнитного потока образуется пусковой вращающий момент  $M_{п} = k\Phi I_{яп}$ , где  $k$ - конструктивный коэффициент машины, учитывающий размеры, число витков и тип обмотки. При этом якорь стронется с места и начнёт увеличивать частоту вращения  $\omega$ .

Пересечение витками обмотки якоря силовых линий магнитного поля вызовет наведение в обмотке электродвижущей силы  $E = k\Phi\omega$ , направленной навстречу приложенному к обмотке напряжению. Поэтому ток якоря и, следовательно, вращающий момент уменьшатся соответственно до  $I_я = (U - E)/(R_я + R_x)$  и  $M = k\Phi I_я$ . Уменьшение будет происходить до тех пор пока развиваемый электродвигателем момент не сравняется с моментом сопротивления рабочей машины, связанной с валом электродвигателя.

Механическая характеристика электродвигателя  $M = f(\omega)$  или  $\omega = f(M)$  описывается уравнением прямой линии

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_я + R_x}{(k\Phi)^2} M, \quad (1)$$

Анализ уравнения показывает, что на холостом ходу, угловая частота прямо пропорциональна приложенному напряжению. Дополнительная литература

Лекция по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения».

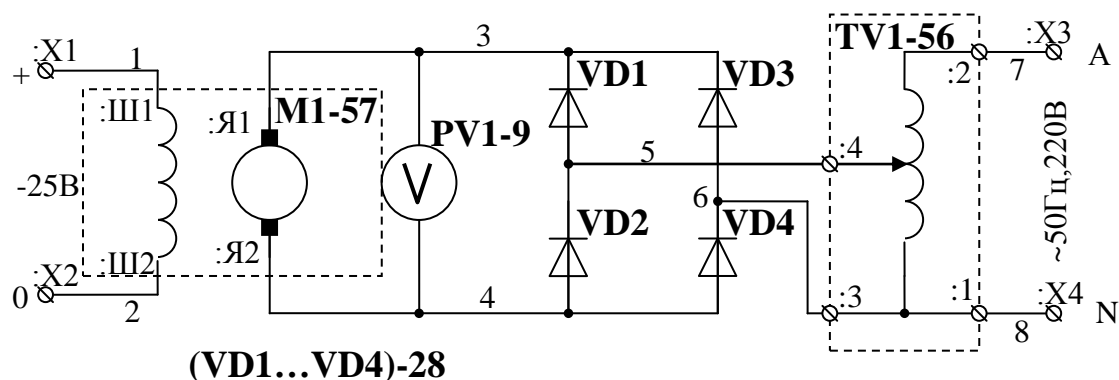
Порядок выполнения задания

Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования

Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии



Собираем электрическую схему:



**Рис.2: Принципиальная схема установки для испытания электродвигателя.**

Заготавливаем таблицу записи наблюдений:

**Данные опытов и расчётов**

**Таблица 2**

Исполнитель									
U, В	10	15	20	25	30	35	40	45	50
n, об/мин									
$\omega$ , 1/с									

Записываем действия при определении параметров точек экспериментальной зависимости, заданных второй строкой таблицы 2:

- Устанавливаем заданное напряжение;
- Измеряем тахометром скорость вращения вала электродвигателя в оборотах в минуту;
- Рассчитываем и заносим в таблицу частоту вращения;

Осуществляем запуск электродвигателя в следующей последовательности:

- Подадим напряжение постоянного тока 25 вольт на клеммы обмотки возбуждения.
- Установим движок автотрансформатора TV1 в нулевое положение (против часовой стрелки до упора, что соответствует нижнему положению движка автотрансформатора на схеме).
- Подадим напряжение 220 вольт на вход автотрансформатора.
- Медленно увеличиваем напряжение на выходе автотрансформатора, следя за тем, чтобы электродвигатель начал вращаться (неподвижность якоря при напряжении 10 и более вольт может свидетельствовать об аварийном режиме: отсутствии тока в обмотке возбуждения или замыкании или обрыве цепи якоря).

- Доводим напряжение до 20...30 вольт

Работу выполняет очередной студент и передаёт установку с вращающимся электродвигателем студенту, осуществляющему измерение параметров первой точки экспериментальной кривой.

Снимаем данные и заполняем ячейки таблицы

Каждый из ответственных за точку зависимости, заносит показания в таблицу, проводит расчёты, и результаты также заносит в таблицу. Все остальные студенты переносят эти данные в тетради.

### **Строим график экспериментальной зависимости**

Старший по работе на доске, а все остальные студенты у себя в тетрадах, заготавливают оси координат. Каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске. Старший на доске, а все остальные студенты у себя в тетрадах проводят аппроксимирующую линию.

Продолжаем полученную прямую до пересечения с осью координат и определяем напряжение трогания.

**Оцениваем, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими данными**

## **2.2. Лабораторная работа №2 (2 часа).**

**Тема: «Изучение схемы управления асинхронным электродвигателем с переключением со «звезды» на «треугольник»**

**2.2.1 Цель работы:** Изучить схему управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия пневматического реле времени, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

**2.2.2 Задачи работы:** Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

**2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории.

### **2.2.4 Описание (ход) работы:**

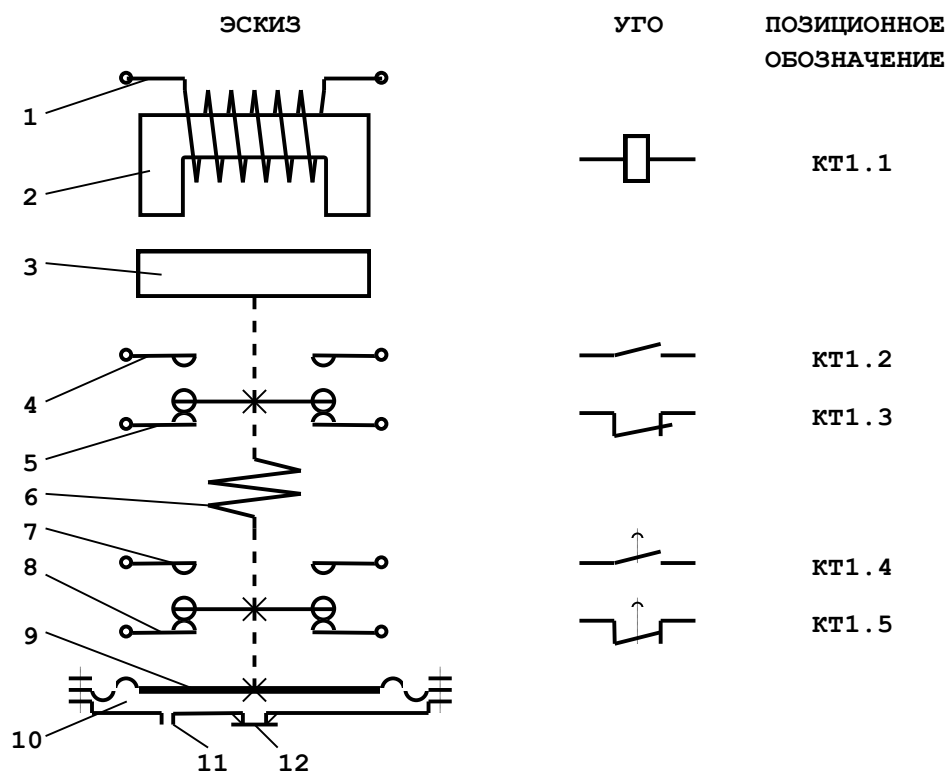
Переключение электродвигателя со звезды на треугольник производится, во-первых, при запуске электродвигателя с целью разгрузки маломощной электрической сети от повышенного пускового тока. При этом напряжение на обмотках при соединении их «звездой» по сравнению с соединением «треугольником» снижается в  $\sqrt{3}$  раз, во столько же раз снижается и фазный пусковой ток. Линейный же ток, что особенно важно для стабильности напряжения в питающей сети, снижается в три раза. К сожалению, поскольку момент пропорционален квадрату напряжения, в три раза снижается и пусковой момент. Поэтому данный способ запуска применим только для рабочих машин с малым моментом трогания.

Во-вторых, обратное переключение электродвигателя с треугольника на звезду производится с целью повышения коэффициента мощности при малой (не превышающей 30%) степени загрузки электродвигателя. В этом случае, хотя момент электродвигателя и снижается в три раза, но его оказывается достаточно для преодоления пониженного (при недогрузке) момента сопротивления рабочей машины.

Ниже приведена схема для управления электродвигателем с возможностью переключения со звезды на треугольник или наоборот. Она состоит из реверсивного магнитного пускателя KM1-KM2, переключателя режима работы SA1, трёхкнопочного поста управления SB1...SB3 и приборов для контроля параметров электродвигателя. В схеме задействовано пневматическое реле времени KT1. Ниже приведен эскиз, раскрывающий устройство и принцип действия реле.

Оно состоит из катушки 1 медного изолированного провода, намотанной на неподвижный сердечник 2, взаимодействующий с подвижным сердечником 3. Сердечник механически связан с контактами 4 и 5 и через пружину 6 с контактами 7, 8 и мембраной 9, перекрывающей замкнутую полость 10. Полость связана с атмосферой через отверстие малого диаметра 11 и клапан 12.

При подаче напряжения на катушку (входной сигнал) подвижный сердечник притягивается к неподвижному и через механическую связь без выдержки времени замыкает контакты КТ1.2 и размыкает контакты КТ1.3. Одновременно под действием пружины по мере заполнения воздухом полости 10 через отверстие 11 начинается перемещение мембраны 9. Когда она переместится на достаточное расстояние, замкнутся контакты КТ1.4 и одновременно разомкнутся контакты КТ1.5. Возврат этих контактов при снятии напряжения с катушки осуществляется без выдержки времени, так как воздух из полости выходит через клапан 12 свободно и не препятствует перемещению мембраны.



**Рис. 1: Схема устройства реле времени.**

**Дополнительная литература - Лекция по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения асинхронного электродвигателя».**

Порядок выполнения задания

#### **Технические данные оборудования:**

Старший по работе заготавливает таблицу на доске и распределяет задания. Ответственные за работу заносят технические данные в таблицу на доске, а все остальные студенты в свои тетради.

#### **Схема управления электродвигателем**

Схема изображена на плакате и рис. 2. Работает она следующим образом.

С помощью автоматического выключателя QF1 напряжение подаётся на обмотки электродвигателя и схему управления. Однако ток через обмотки электродвигателя, обмотки магнитных пускателей и реле времени не течёт поскольку разомкнуты силовые контакты КМ1.1 и КМ2.1 магнитных пускателей, а также блокировочные контакты КМ1.3, КМ2.3. Разомкнуты также контакты SB1.2, SB2.2 кнопок и контакты КТ1.2, КТ1.4 реле времени КТ1. Если переключатель SA1 находится в положении «РУЧНОЙ», то обмотка КТ1.1 реле времени КТ1 запитана быть не может и реле времени на работу схемы

влияния не оказывает. В этом случае переключение со звезды на треугольник и наоборот осуществляется оператором.

При нажатии на кнопку SB1 «ЗВЕЗДА» размыкается контакт SB1.1 предотвращая включение катушки KM2.2 магнитного пускателя KM2 и замыкается контакт SB1.2. Начинает протекать ток по цепи: фаза C сети – катушка KM1.2, размыкающий контакт с выдержкой времени при размыкании KT1.5 реле времени KT1 – размыкающий контакт KM2.4 магнитного пускателя KM2 – размыкающий контакт SB2.1 кнопки SB2 – замыкающий контакт SB1.2 кнопки SB1 – размыкающий контакт кнопки SB3 – фаза A сети. Магнитный пускатель KM1 срабатывает. Замыкаются его силовые контакты KM1.1, запитывающие обмотки электродвигателя M1 по схеме «звезда», размыкается контакт KM1.4, предотвращая включение катушки KM2.2, и замыкается контакт KM1.3, резервируя цепь питания катушки KM1.2 на случай, когда контакты SB1.1 при отпускании кнопки SB1 разомкнутся.

Электродвигатель будет работать по схеме «звезда» до тех пор, пока не будет нажата кнопка SB2 «ТРЕУГОЛЬНИК». В этом случае замкнутся контакты SB2.2, подготавливая цепь питания катушки KM2.2, и разомкнутся контакты SB2.1. Катушка KM1.2 потеряет питание, магнитный пускатель KM1 разомкнёт свои силовые контакты KM1.1 (электродвигатель на мгновение обесточится) разомкнёт блокировочные контакты KM1.3, разблокировав контакты SB1.2, и замкнёт контакты KM1.4. При этом запитается катушка KM2.2 магнитного пускателя KM2 по цепи: фаза C – катушка KM2.2 – контакты KM1.4 магнитного пускателя KM1 – контакты SB1.1 – контакты SB2.2 нажатой кнопки SB2 – кнопка SB3 – фаза A. Магнитный пускатель KM2 сработает: замкнёт свои силовые контакты KM2.1, переключив обмотки ещё вращающегося по инерции электродвигателя M1 в треугольник; заблокирует контактами KM2.3 замыкающие контакты SB2.2 на случай отпускания кнопки SB2; разомкнёт контакты KM2.4, предотвращая возможность одновременного срабатывания обоих пускателей.

Отключение электродвигателя, независимо от того работает он в «звезду» или в «треугольник» осуществляется путём нажатия на кнопку SB3. При размыкании контакта этой кнопки теряет питание или катушка KM1.2, или катушка KM2.2 – электродвигатель отключается. При этом отпускание кнопки SB3 не приводит к повторному включению пускателей поскольку успевают разомкнуться блокировочные контакты KM1.3 или KM2.3 (в зависимости от того какой пускатель был включён)

Если же переключатель SA1 находится в положении «АВТОМАТИЧЕСКИЙ», подготовлена цепь питания катушки KT1.1 реле времени. В этом случае при нажатии на кнопку SB1 электродвигатель запускается в звезду, как и в предыдущем случае, но одновременно с включением катушки магнитного пускателя KM1 запитывается катушка KT1.1 реле времени KT1 по цепи: фаза C – катушка KT1.1 реле времени KT1 – контакт 1-3 переключателя SA1 – контакт кнопки SB3 – фаза A сети. Реле KT1 сработает и своими замыкающими контактами KT1.2 дополнительно заблокирует замыкающий контакт SB1.2 с тем, чтобы катушка реле не потеряла питание ни при отпускании кнопки SB1, ни при отключении магнитного пускателя KM1. Через несколько секунд после того как электродвигатель развернется, разомкнётся контакт с выдержкой времени при размыкании KT1.5. Катушка KM1.2 магнитного пускателя KM1 потеряет питание. Электродвигатель отключится, но одновременно с этим через замкнувшиеся теперь контакты KM1.4 будет подано напряжение на обмотку KM2.2 магнитного пускателя KM2 по цепи: фаза C – катушка KM2.2 – контакты KM1.4 магнитного пускателя KM1 – контакты SB1.1 – контакты KT1.4 реле времени KT1 – кнопка SB3 – фаза A. Магнитный пускатель KM2 сработает: замкнёт свои силовые контакты KM2.1, переключив обмотки ещё вращающегося по инерции электродвигателя M1 в треугольник; заблокирует контактами KM2.3 замыкающие контакты SB2.2, разомкнёт контакты KM2.4, предотвращая возможность одновременного срабатывания обоих пускателей.

Таким образом, в автоматическом режиме оператору не нужно отслеживать окончание запуска электродвигателя на соединении в «звезду» и не нужно нажимать

кнопку SB2 для перевода электродвигателя на «треугольник». Эти функции взяло на себя реле времени. Отключение электродвигателя, как и в ручном режиме, осуществляется нажатием на кнопку SB3.

Соберём электрическую схему.

Сидоров – собирает узел 1; Козлов – узел 2 и так далее.

Расположение выводов элементов реле времени на панели соответствует расположению выводов на эскизе реле (рис.1). Одновременно схема перечерчивается всеми студентами в тетради.

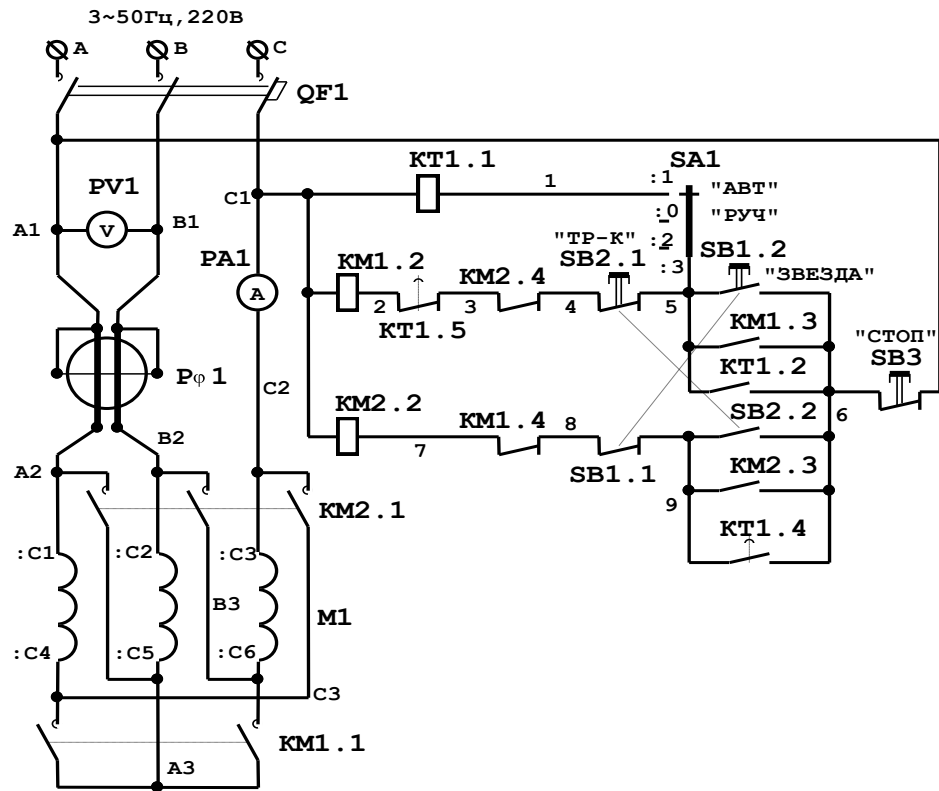


Рис.2: Принципиальная схема управления асинхронным электродвигателем с переключением со звезды на треугольник

### Таблица записи наблюдений

Старший по работе заготавливает таблицу на доске, распределяются задания.

### Данные опытов и расчётов

Таблица 2

Исполнитель	Схема соединения	Опытные данные			Расчётные данные	
		U, В	I, А	Cosφ	S <sub>1</sub> , ВА	P <sub>1</sub> , Вт
Сидоров	«Звезда»					
Козлов	«Треугольник»					

### 4.4 Осуществим испытание схемы

1. Устанавливаем SA1 в положение «РУЧ» объясняем, что произойдёт в схеме при включении QF1, подаём напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Объясняем, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB1; убеждаем присутствующих в достоверности сказанного. Снимаем и записываем показания приборов в таблицу на доске.

3.Объясняем, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB2; убеждаем присутствующих в достоверности сказанного. Снимаем и записываем показания приборов в таблицу на доске.

### 2.3.Лабораторная работа №3 (2часа).

**Тема:** «Схема реверсивного управления асинхронным электродвигателем с торможением противовключением»

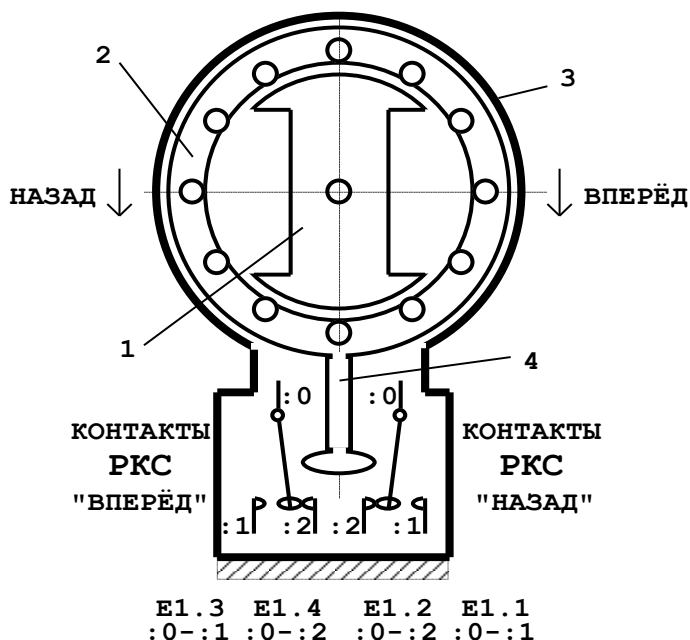
**2.3.1 Цель работы:** Изучить схему реверсивного управления 3-х фазным асинхронным электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле контроля скорости, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

**2.3.2 Задачи работы:**Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

**2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории

#### 2.3.4 Описание (ход) работы:

На практике часто применяется способ быстрой остановки электродвигателя путем переключения электродвигателя на ходу на обратное вращение. После переключения электродвигателя магнитное поле начинает вращаться в обратном направлении, а ротор продолжает по инерции вращаться, быстро снижая частоту вращения до нуля. В этот момент напряжение с клемм электродвигателя нужно снять, иначе электродвигатель начнет вращение в обратном направлении. Вручную этот момент зафиксировать не удастся, поэтому применяют специальное реле контроля скорости (РКС).



**Рис.1:** Схема устройства реле контроля скорости.

Реле состоит из постоянного магнита 1, вращающегося вокруг оси и соединенного с валом электродвигателя. Постоянный магнит помещен в цилиндр 2, представляющий собой устройство в виде беличьей клетки. Цилиндр укреплен на подшипниках в корпусе 3

и может поворачиваться на определенный угол до упора, при этом рычагом 4 переключаются контакты.

Если ротор электродвигателя вращается вперед вместе с ним вращается и электромагнит 1, который своим магнитным полем увлекает за собой цилиндр 2 и он поворачивается в сторону вращения, переключая контакты E1.3 и E1.4. При вращении ротора в обратном направлении переключаются контакты E1.1 и E1.2.

Схема управления электродвигателя с применением РКС приведена на плакате и рис. 2.

Работает схема следующим образом. При подаче напряжения на схему с помощью автоматического выключателя QF1 ток в цепи не протекает, так как разомкнуты контакты KM1.3 и KM2.3, E1.1 и E1.3, SB1 и SB2. Нажимаем кнопку SB1. Начинает протекать ток по цепи: фаза С, катушка KM1.1, контакты KM2.4, E1.2, SB1, SB3, фаза А. Срабатывает магнитный пускатель KM1, включает электродвигатель M1 на вращение “вперед”, блокирует кнопку SB1 и размыкает цепь питания катушки KM2.1, чем предотвращается одновременное включение магнитных пускателей. Как только электродвигатель начал вращаться вперед, контакты РКС E1.4 размыкаются, а E1.3 замыкаются.

Нажимаем кнопку SB3. Отключается магнитный пускатель KM1. Как только его контакт KM1.4 замыкается, получает питание катушка KM2.1 по цепи: фаза С-KM2.1-KM1.4-E1.3-фаза А. Магнитный пускатель KM2 срабатывает, включает электродвигатель на обратное вращение, что приводит к резкому торможению ротора. Когда частота вращения станет равной нулю, контакты РКС E1.3 разомкнутся пускатель KM2 отключится, отключив электродвигатель. Через мгновение замкнутся контакты E1.4, но ток через катушку KM2.1 уже не пойдет, так как успели разомкнуться контакты KM2.3.

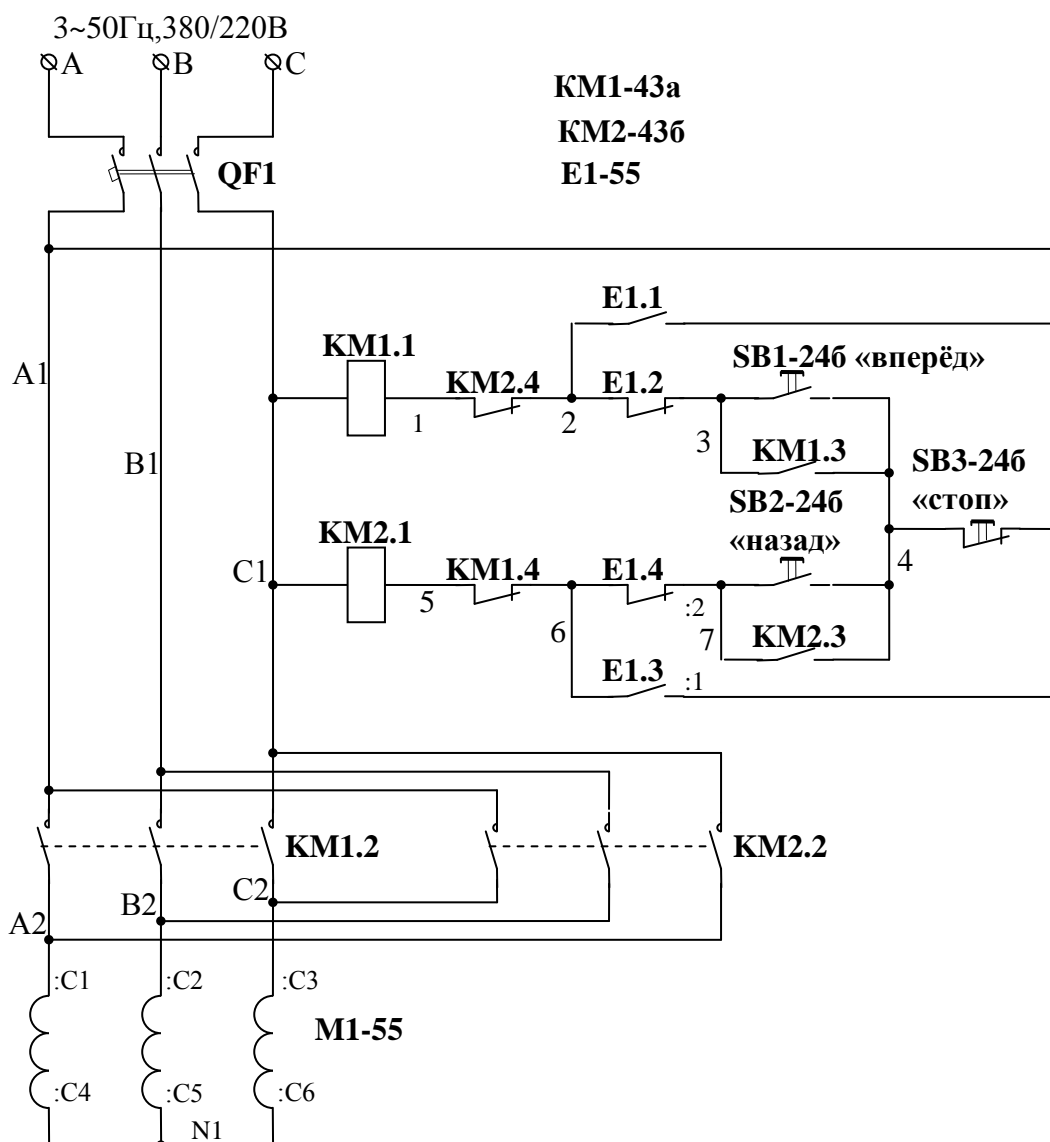
Аналогично работает схема и при нажатии кнопки SB2 «назад».

### **Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования**

Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии

### **Собираем электрическую схему:**

Сидоров – собирает узел 1; Козлов – узел 2 и так далее. Во время сборки схема перечерчивается в тетради.



**Рис. 2: Схема управления электродвигателем.**

### **Осуществляем испытание схемы**

1. Сидоров – объясняет, что произойдёт в схеме при включении QF1. подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Козлов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB1 и показывает работу схемы при данном воздействии.

3. Скворцов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB2, демонстрирует сказанное.

4. Сорокин – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB3, демонстрирует сказанное

5. Воронин – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB2, демонстрирует сказанное.

7. Эйлер - демонстрирует работу схемы после нажатия кнопки SB3, предварительно объяснив ожидаемую реакцию схемы.

Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя



## 2.4. Лабораторная работа №4 (2 часа).

### Тема: «Исследование центробежного вентилятора»

**2.4.1 Цель работы:** Ознакомиться с устройством и принципом действия центробежного вентилятора, научиться снимать и строить характеристики вентилятора.

**2.4.2 Задачи работы:** Снять зависимость мощности на валу вентилятора  $P_B$ , момента на валу вентилятора  $M_B$ , напора  $H$ , расхода  $Q$  и коэффициента полезного действия вентилятора  $\eta_B$  от частоты вращения  $\omega$ , а также зависимости  $M_B, H, Q, \eta_B = f(\omega)$ , а также мощности вентилятора  $P_B$  от расхода  $P_B = f(Q)$ .

**2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории.

#### 2.4.4 Описание (ход) работы:

Центробежный вентилятор совершает работу по перемещению воздушной массы. Эта работа идёт на увеличение кинетической энергии потока воздуха. Если через поперечное сечение  $S$  нагнетающего трубопровода вентилятора перемещается воздух со скоростью  $v$ , то расход  $Q$  воздуха, равный объёму воздуха, прошедшего через поперечное сечение трубопровода за одну секунду,

$$Q = S v \quad (\text{м}^3/\text{с}), \quad (1)$$

а масса

$$m = Q \rho = S v \rho \quad (\text{кг/с}), \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха, равная  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

Так как до входа во всасывающий патрубок вентилятора скорость воздуха была равна нулю, а на выходе  $v$ , то следовательно, прошедшей массе воздуха было сообщено  $W_k$  джоулей кинетической энергии, равное в данном случае (время равно 1 секунде) мощности передачи энергии

$$P = \frac{m v^2}{2} = \frac{S v \rho v^2}{2} = Q \frac{\rho v^2}{2} \quad (\text{Вт}). \quad (3)$$

С другой стороны, если в потоке воздуха выделить сечение  $S$  (Смотри рис. 1), то эта мощность по преодолению сил инерции потока воздуха будет равна произведению скорости перемещения сечения на силу, приложенную к сечению

$$P = v F_{\text{дин}} = v S H_{\text{дин}} = Q H_{\text{дин}}, \quad (4)$$

где  $H_{\text{дин}}$  - динамический напор, Па.

Сравнивая (3) и (4), получим уравнение для определения динамического (скоростного) напора

$$H_{\text{дин}} = \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

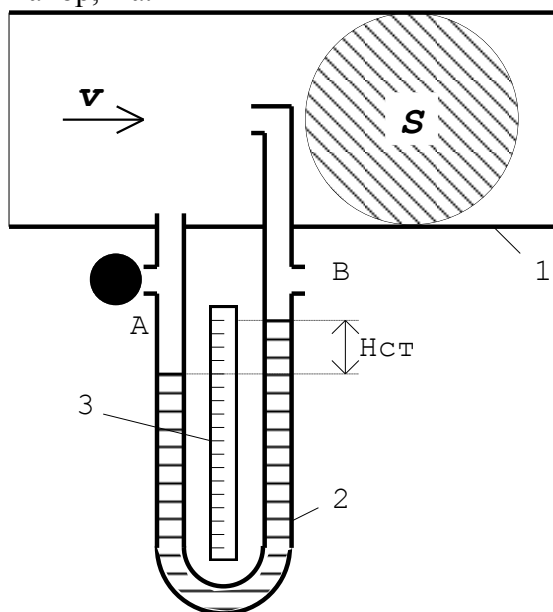
Его можно измерить с помощью трубки Пито, изображённой на рисунке 1, и по его величине подсчитать скорость воздушного потока

$$v = \sqrt{\frac{2 H_{\text{дин}}}{\rho}}, \quad (6)$$

подсчитать расход по выражению (1) и мощность по выражению (4). Однако следует иметь в виду, что мощность расходуется не только на сообщение кинетической энергии потоку, но и на преодоление потерь напора в напорном трубопроводе. Поэтому в уравнении (4) вместо динамического напора необходимо подставлять полный напор

$$P = Q H = Q (H_{\text{дин}} + H_{\text{ст}}), \quad (7)$$

где  $H_{\text{ст}}$  – статический напор, Па.



**Рис. 1: Схема измерения напоров.** (1-трубопровод, 2- трубка Пито, 3- мерная линейка, А и В- отверстия для рассоединения концов трубки)

Если закрыть пальцами отверстия А и В одновременно, то разность уровней в трубках покажет динамический напор в мм водяного столба (1 мм водяного столба равен 9,8 Па). При закрытом отверстии А (как показано на рисунке) измеряется статический напор, а при закрытом отверстии В – полный. При этом, если повышение уровня происходит в сторону открытого отверстия, то напор положителен, а в сторону закрытого – отрицателен.

#### Задание

Снять зависимость мощности на валу вентилятора  $P_B$ , момента на валу вентилятора  $M_B$ , напора  $H$ , расхода  $Q$  и коэффициента полезного действия вентилятора  $\eta_B$  от частоты вращения  $\omega$ , а также мощности вентилятора  $P_B$  от расхода  $Q$ .

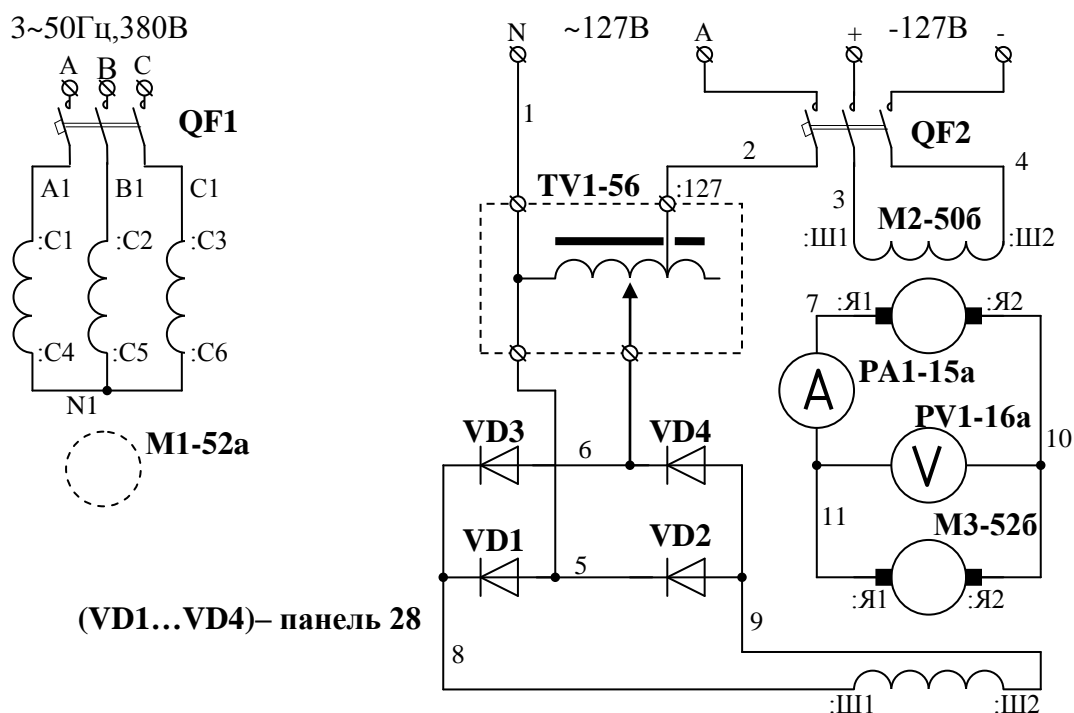
#### Порядок выполнения задания

Знакомимся с составом и основными техническими данными электрооборудования, используемого в лабораторной работе

Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии

**Собираем электрическую схему:**

Сидоров – узел 1; Козлов – узел 2 и так далее. Во время сборки перечертить схему в тетради.



**Рис. 2: Принципиальная схема установки для испытания вентилятора.**

**Заготавливаем таблицу записи наблюдений:**

**Данные опытов и расчётов**

**Таблица 1**

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>О п ы т н ы е   д а н н ы е</b>											
Сечение, %	100	100	100	100	100	100	100	75	50	25	0
U, В	70	90	110	130	150	165	180	180	180	180	180
I, А											
n, об/мин											
M <sub>ш</sub> , мм											
H <sub>дин</sub> , мм в. ст.											
H <sub>ст</sub> , мм в. ст.											
H, мм в. ст.											
<b>Р а с ч ё т н ы е   д а н н ы е</b>											
$\omega = \pi n / 30$ , 1/с											
M, Нм											
H <sub>дин</sub> , Па											
H <sub>ст</sub> , Па											
H, Па											
v, м/с											
Q, м <sup>3</sup> /с											
P <sub>1</sub> =UI, Вт											
P <sub>2</sub> =P <sub>в</sub> =M $\omega$ , Вт											
P <sub>вп</sub> =QH, Вт											

$\eta_d = P_2/P_1$											
$\eta_B = P_{вп}/P_2$											
$\eta_{в\gamma} = \eta_d \eta_B$											

**Записываем действия при определении параметров точки экспериментальной зависимости, заданной третьей и четвёртой строками таблицы 2:**

- а). Устанавливаем заданное напряжение и сечение трубопровода;
- б). Измеряем тахометром скорость вращения вала электродвигателя в оборотах в минуту, момент в мм шкалы, ток якоря электродвигателя  $I$  в амперах и напоры в мм водяного столба;
- в). Рассчитываем и заносим в таблицу на доске: частоту вращения, момент  $\{M=15,8\sin(M_{ш}/135)\}$  и напоры в Паскалях. Кроме того, по вышеприведённым формулам находим скорость воздуха, расход, мощности и коэффициенты полезного действия.

**Измеряем диаметр и рассчитаем сечение напорного трубопровода ( $D=?$   
 $S=\pi D^2/4$ )**

Работу выполняет очередной студент.

Старший распределяет точки экспериментальной зависимости по исполнителям и записывает фамилии исполнителей в строку таблицы

**Осуществляем запуск электродвигателя в следующей последовательности:**

А) Устанавливаем движок автотрансформатора TV1 в нулевое положение (против часовой стрелки до упора, что соответствует левому положению движка автотрансформатора на схеме).

Б) С помощью QF1 подаём напряжение 380 В на зажимы асинхронного электродвигателя. Проверяем направление вращения электродвигателя. Если оно не по стрелке, меняем фазировку напряжения на зажимах электродвигателя.

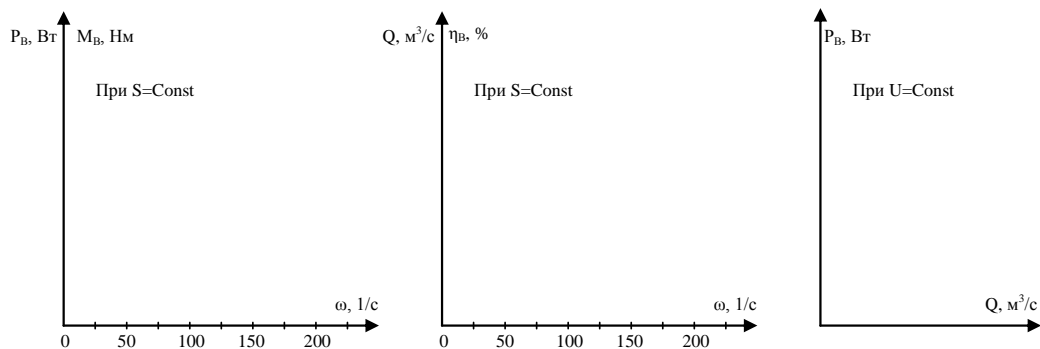
В) С помощью QF2 подаём напряжение 127 вольт на вход автотрансформатора и выпрямленное напряжение 127 вольт на обмотку возбуждения электродвигателя М3. Так как напряжение на выходе автотрансформатора равно нулю, равно нулю и напряжение на обмотке возбуждения генератора М2. Следовательно, на выходных зажимах якоря генератора М2 напряжение, подаваемое и на якорь электродвигателя М3, также равно нулю и электродвигатель не вращается.

Г) Медленно увеличиваем напряжение на выходе автотрансформатора, следя за тем, чтобы электродвигатель начал вращаться (неподвижность якоря при напряжении 10 и более вольт может свидетельствовать об аварийном режиме: отсутствии тока в обмотке возбуждения; замыкании или обрыве цепи якоря).

Д) Доводим напряжение до 30...50 вольт.

Работу выполняет очередной студент и передаёт установку с вращающимся электродвигателем студенту, осуществляющему измерение параметров первой точки экспериментальной зависимости.

**По опытным и расчётным данным строим графики**



**Рис. 3: Графики искомых зависимостей**

Старший по работе заготавливает оси координат на доске, все остальные студенты в тетрадях.

Нанести каждую точку зависимости на поле графика

(кроме того, каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске)

Провести на графике аппроксимирующие линии

(ведущий это делает на доске)

Оцениваем, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими данными.

## **2.5 Лабораторная работа №5 (2 часа).**

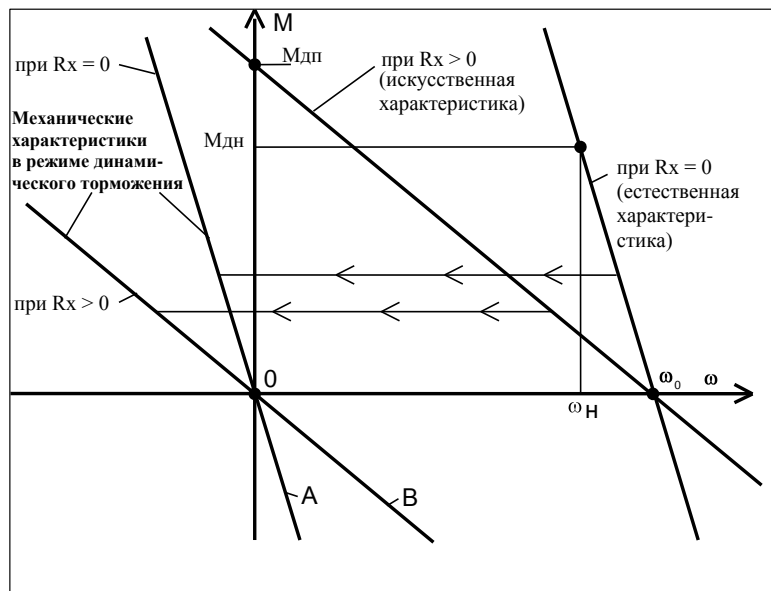
**Тема: «Исследование механической характеристики шунтового электродвигателя в режиме динамического торможения»**

**2.5.1 Цель работы:** Научиться осуществлять перевод электродвигателя в режим динамического торможения, снимать и строить механические характеристики в этом режиме.

**2.5.2 Задачи работы:** Построить график зависимости электродвижущей силы от частоты вращения  $E = f(\omega)$  и механическую характеристику электродвигателя  $M = f(\omega)$  в режиме динамического торможения. (Согласно теоретическим положениям, изложенным выше, ожидаемый вид характеристик – прямая линия, проходящая через начало координат).

**2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории

**2.5.4 Описание (ход) работы:** Для перевода в режим динамического торможения якорь электродвигателя отключается от сети постоянного тока и замыкается на сопротивление  $R_x$  или накоротко. Напряжение на обмотке возбуждения, а следовательно, и магнитный поток остаются неизменными.



**Рис. 1: Механические характеристики шунтового электродвигателя в режиме динамического торможения.**

$$\omega_0 = \frac{U}{k \Phi}$$

В результате частота идеального холостого хода станет равной нулю, а наклон характеристики, определяемый коэффициентом при втором члене

$$\omega = \frac{U}{k \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{\Phi^2} M$$

механической характеристики, останется неизменным.

Таким образом, характеристика, не изменяя наклона, переместится параллельно самой себе, как показано на рисунке, в начало координат и будет описываться уравнением прямой линии, проходящей через начало координат

$$\omega = - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{\Phi^2} M \quad (1)$$

Две такие характеристики А и В (для  $R_{\text{х}} = 0$  и для  $R_{\text{х}}$  отличным от нуля) приведены на рисунке 1.

#### **Порядок выполнения задания**

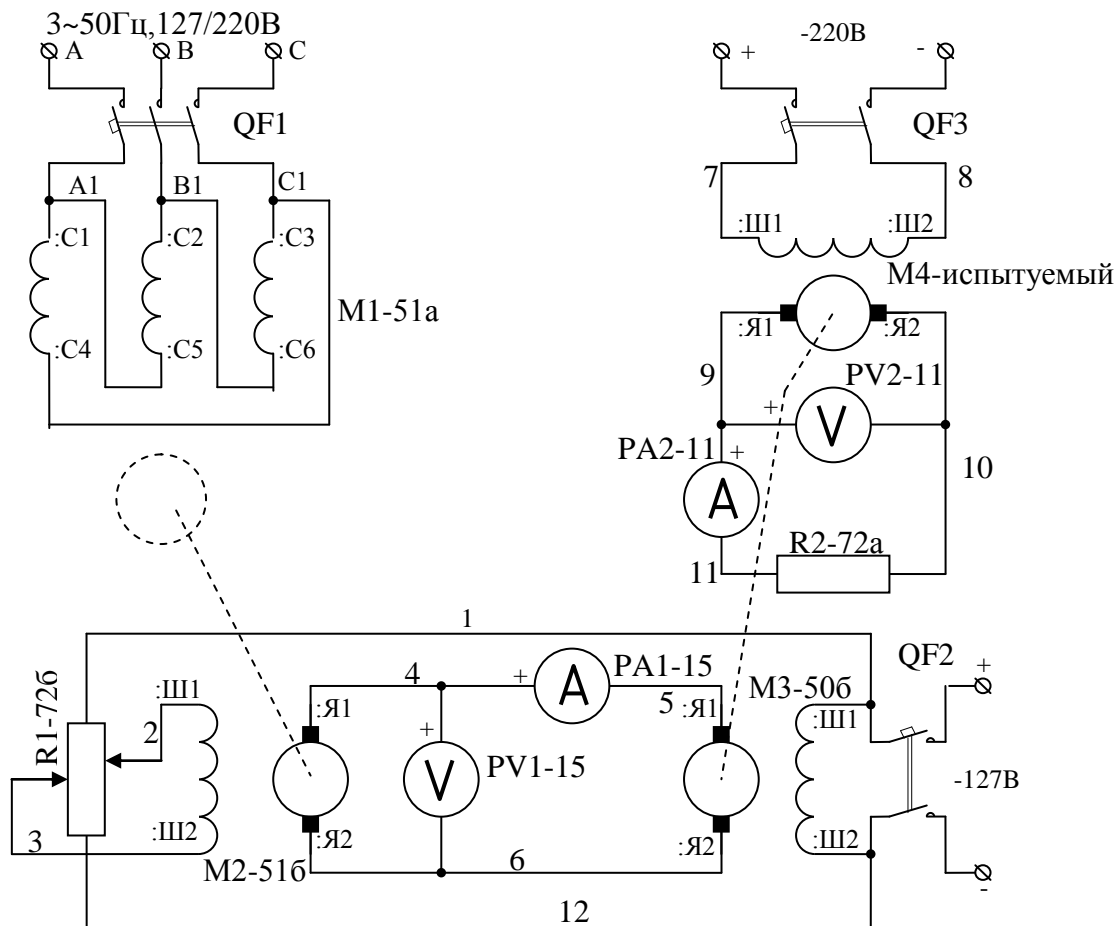
**Знакомимся с основными техническими данными используемого в экспериментальной установке оборудования и его размещением на стенде**

Знакомство осуществить по перечню элементов универсального лабораторного стенда, составленному на вводном занятии

#### **Описываем и собираем схему экспериментальной установки**

Схема изображена на рис. 2. Якорь испытуемого электродвигателя М4 замкнут через амперметр РА2 на резистор R2. На обмотку возбуждения подано постоянное напряжение 220 В. Электродвигатель в режиме торможения приводится во вращение электродвигателем постоянного тока параллельного возбуждения М3 (балансирная машина). Двигатель способен за счёт изменения напряжения на его якоре изменять частоту вращения, как в прямом, так и в обратном направлениях. Регулируемое напряжение на якорь этого электродвигателя подаётся от мотор-генераторной установки (асинхронный электродвигатель М1 – генератор постоянного тока с независимым возбуждением М2). Электродвигатель М1 вращает якорь генератора М2 с постоянной скоростью, а напряжение на выходе генератора изменяется за счёт изменения напряжения на его обмотке возбуждения с помощью двухдвижкового потенциометра R1.

Если левый движок потенциометра располагается выше правого, то на клемме Ш1 минус, а на клемме Ш2 плюс и наоборот, если левый движок ниже правого, то минус на клемме Ш2, а плюс на клемме Ш1. Напряжение снимается с участка потенциометра, расположенного между движками. Поэтому чем больше раздвинуты движки, тем выше напряжение. Таким образом, изменяется полярность и величина напряжения на якоре генератора М2 и на якоре М3, а следовательно, направление и величина частоты вращения электродвигателя М3 и испытуемого электродвигателя М4.



**Рис. 2: Принципиальная схема установки для снятия механической характеристики шунтового электродвигателя в режиме динамического торможения.**

Собрать электрическую схему. Сидоров собирает узел А1; Козлов – узел А2 и так далее.

#### **Записываем порядок запуска установки**

- а) Подаём напряжение на обмотки возбуждения машин постоянного тока с помощью автоматических выключателей QF2 и QF3.
- б) Устанавливаем напряжение на обмотке возбуждения генератора М2 равным нулю для чего движки потенциометра R1 располагаем напротив друг друга.
- в) С помощью QF1 запускаем асинхронный электродвигатель М1.
- г) Плавно раздвигая движки потенциометра R1, убеждаемся, что растёт напряжение на выходе якоря генератора М2, а следовательно, и на входе машины М3. Якорь электродвигателя М3, а следовательно, и якорь генератора М4 начинают вращаться. Напряжение и ток на выходе генератора М4 растут.

#### **Действия по снятию параметров характеристики**

- а) Устанавливаем заданную для данной точки величину тока  $I_1$ , раздвигая движки потенциометра R1;

б) Измеряем и заносим в таблицу на доске с учётом знака ток  $I_2$ , напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , количество делений шкалы, на которое отклонилась стрелка указателя момента  $M_{ш}$ , и число оборотов вала электродвигателя в минуту.

#### Действия по расчёту параметров характеристики

а) Рассчитываем и заносим в таблицу на доске частоту вращения, момент в ньютонметрах (в расчётной формуле момента аргумент синуса берётся в радианах), э.д.с. ( $E_4$ ) испытуемого электродвигателя, мощность на его валу  $P_{M4}$ , на зажимах  $P_{Э4}$  и на нагрев якоря  $\Delta P_{Я4}$ .

б) Проверяем баланс мощностей ( $P_{M4}=P_{Э4}+\Delta P_{Я4}$ ). Если равенство не соблюдается, определяем и заносим в таблицу процент расхождения результатов ПР. Среднее значение мощностей в правой и левой частях уравнения  $(P_{M4}+P_{Э4}+\Delta P_{Я4})/2$  принимаем за истинное, находим абсолютное значение разности  $\Delta B=(P_{M4}-P_{Э4}-\Delta P_{Я4})$  и далее её относительное значение, выраженное в процентах,

$$ПР = \frac{\Delta B}{P_{cp}} 100\% \quad (2)$$

**Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных по снятию реостатной механической характеристики в режиме динамического торможения**

Распределяются исполнители.

**Таблица 1**

Опытные данные									
$R_2$ , Ом	11,4								
$I_1$ , А									
$U_1$ , В									
$I_2$ , А									
$U_2$ , В									
Расчётные данные									
$M=15,8 \cdot \sin(M_{ш}/135)$ , Нм									
$\omega=\pi n/30$ , 1/с									
$E_4=U_2+I_2 R_{Я4}$ , В									
$P_{M4}=M\omega$ , Вт									
$P_{Э4}=I_{Я4} U_{Я4}$ , Вт									
$\Delta P_4=I_{Я4}^2 R_{Я4}$ , Вт									
ПР, %									

Работу по пунктам 4.3 и 4.4 выполняет студент, снимающий первую точку характеристики. При этом старший по работе, следит, чтобы величина тока не отклонялась от заданного значения, пока студент не снимет показания остальных приборов, контролирует его действия и записывает эти показания в соответствующие ячейки верхней строки таблицы на доске, а все остальные студенты в тетради. Студент, снимающий первую точку характеристики, садится и выполняет действия по пункту 4.5. К работе приступает студент, снимающий следующую точку характеристики. И далее в таком же порядке снимаются все остальные точки характеристики. По окончании опытов установка отключается в порядке обратном описанному выше.



Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных по снятию естественной механической характеристики в режиме динамического торможения

**Таблица 2**

Опытные данные									
R <sub>2</sub> , Ом	0								
I <sub>1</sub> , А	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
U <sub>1</sub> , В									
I <sub>2</sub> , А									
U <sub>2</sub> , В									
Расчётные данные									
M=15,8*Sin(M <sub>ш</sub> /135), Нм									
ω=πn/30, 1/с									
E <sub>4</sub> =U <sub>2</sub> +I <sub>2</sub> R <sub>я4</sub> , В									
P <sub>М4</sub> =Mω, Вт									
P <sub>Э4</sub> =I <sub>4</sub> U <sub>4</sub> , Вт									
ΔP <sub>4</sub> =I <sup>2</sup> R <sub>я4</sub> , Вт									
ПР, %									

Распределяются исполнители. Реостат R2 замыкается накоротко, и далее выполняются действия в порядке, описанном выше.

#### **Строим графики механических характеристик**

Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях заготавливают оси координат с учётом, что на поле графика должны быть размещены обе снятые характеристики. Для первой характеристики каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске. Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях проводят аппроксимирующие линии

В таком же порядке строится вторая характеристика.

#### **Строим графики зависимости ЭДС от частоты вращения.**

В том же порядке

#### **Оцениваем соответствие опытных и теоретических данных.**

Сделать заключение, насколько экспериментальные характеристики соответствуют теоретическим предположениям.