

Некоммерческое акционерное общество

Алматинский институт энергетики и связи

Кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ

для студентов всех форм обучения специальности

050718 – «Электроэнергетика»

Алматы 2009

СОСТАВИТЕЛИ: Ю.А. Цыба, Н.К. Алмуратова. Электромеханические преобразователи энергии. Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов всех форм обучения специальности 050718- «Электроэнергетика». – Алматы: АИЭС, 2009. – 37с.

Методические указания содержат необходимые технические сведения о стендах, программу выполнения работ, методику подготовки, проведения экспериментов и анализа полученных результатов и контрольные вопросы. Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения специальности 050718 – «Электроэнергетика».

Лабораторная работа №1. Исследование режимов работы шагового двигателя

Цель работы: Ознакомление с устройством, принципом действия и режимами работы шагового двигателя и исследование его характеристик.

1.1 Основные сведения о стенде и установленном оборудовании

Монтажная панель лабораторного стенда приведена на рисунке 1.1. При этом сборка комплектующего оборудования выполнена таким образом, что для монтажа исследуемой схемы требуется минимальное количество проводников.

На панели стенда смонтированы: шаговый двигатель (ШД) с электромагнитным тормозом, который создает тормозной момент на валу двигателя в пределах от 0,1 до $1,0 \times 10^{-2}$ Нм. и ЛАТР в качестве регулятора тормоза, элементы управления и измерительные приборы.

На стенде также установлены: блок управления шаговым двигателем с системой импульсного питания. Для контроля величины управляющих импульсов, установлен вольтметр $V_{п}$, а для измерения тормозного момента на валу двигателя датчик момента M_t . Скорость вращения и угол поворота ротора двигателя измеряется электронным тахометром. Переключателем П1 подаётся напряжение на систему импульсного питания ШД, а включателем В1 напряжение питания тормоза. Включатель В2 осуществляет переключение обмоток ШД на напряжения $U_{п} = 7В$ и $U_{п}^1 = 10В$.

1.2 Программа работы

1.2.1 Ознакомиться с назначением и техническими характеристиками элементов комплектующих лабораторный стенд.

1.2.2 Собрать схему исследований по рисунку 1.2.

1.2.3 Ознакомиться с работой двигателя в шаговом и непрерывном режимах, определить шаг ротора шагового двигателя.

1.2.4 Снять предельную механическую характеристику шагового двигателя $f = f(M)_{max}$.

1.2.5 Снять предельную динамическую характеристику приемистости шагового двигателя $f_{пр} = f(M)_{max}$.

1.3 Порядок и методика выполнения работы

1.3.1 Проверить отсутствие напряжения на стенде, состояние измерительных приборов, клемм и соединительных проводников.

1.3.2 Собрать электрическую схему, представленную на рисунке 1.2, и проверить её работоспособность в шаговом и непрерывном режимах работы двигателя. Для этого включить переключатель П1, а включателем В2 подключить обмотки ШД на напряжения при положении $U_{п} = 7В$ или при $U_{п}^1 = 10В$.

С помощью блока управления ШД установить квазистатический (шаговый) или установившийся (непрерывный) режим работы, выбрать направление вращения ШД. При шаговом режиме количеству шагов можно задать любое значение, но желательно от 9 до 999. При выборе непрерывного режима частоту переключения напряжения (частоту подачи

импульсов управления), исходя из возможности данного ШД, следует выбрать в пределах 700 – 1900Гц.

Шаг ротора двигателя может быть определен в шаговом или в непрерывном режиме работе из выражения

$$\alpha = \frac{\beta}{k} \cdot x = \frac{n360^\circ}{60f},$$

где β – значение угла поворота вала ротора ШД в шаговом режиме;

k – количество заданных шагов;

n – скорость вращения ротора ШД;

f – частота импульсов управления.

Значения β и n записываются по показаниям электронного тахометра.

1.3.3 Для снятия предельной механической характеристики ШД в схеме (рисунок 1.2) включают выключатель В₁ с тем, чтобы иметь возможность регулятором тормоза устанавливать значения тормозного момента на валу ротора ШД в пределах от (75 до 120) × 10⁻³ Нм, контролируемые по показаниям датчика момента М_Т.

Предельная механическая характеристика представляет собой зависимость частоты подачи управляющих импульсов от максимального момента (M)_{max} на валу ротора, при котором происходит выпадение двигателя из синхронизма. Поэтому для каждого заданного значения частоты импульсов управления, выбранного в установившемся режиме путём вращения по часовой стрелке ручкой регулятора тормоза, увеличивают тормозной момент на валу ротора до тех пор, пока ШД не выйдет из синхронизма, т.е. пока ШД не остановится. При этом значения максимального тормозного момента (M)_{max} снимают по показаниям датчика момента М_Т для частот, находящихся в пределах диапазона от 700 – 1900Гц, через каждые 200Гц.

Результаты измерений М_Т, значения f и n заносят в таблицу 1.1. При больших тормозных моментах, т.е. при М_Т > 100 × 10⁻³ Нм, ШД не следует долго испытывать, так как электромагнитный тормоз перегревается.

Т а б л и ц а 1.1 – Данные для построения зависимости $f=f(M)_{max}$

| Результаты измерения | | | |
|----------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| n | f , Гц | M_T , 10 ⁻³ Нм | V_n , В |
| | от 700 до 1900 | | При $U_n = 7В$ |

| | | | |
|--|----------------|--|----------------------------|
| | Через 200 Гц | | |
| | от 700 до 1900 | | При $U_{\pi} = 10\text{В}$ |
| | Через 200 Гц | | |

Предельная механическая характеристика снимается при двух положениях выключателя B_2 , т. е. при напряжении на обмотках ШД – $U_{\pi} = 7\text{В}$ и $U_{\pi} = 10\text{В}$.

По данным таблицы 1.1 построить предельную механическую характеристику шагового двигателя $f = f(M)_{\max}$.

1.3.4 Для снятия предельной динамической характеристики приемистости блоком управления устанавливается непрерывный режим работы ШД и так же как в пункте 1.3.3 на каждой из заданных частот импульсов управления в пределах диапазона от 700 – 1900 Гц через каждые 200 Гц, увеличивая тормозной момент на валу ротора, выводят двигатель из синхронизма. При этом после остановки двигателя на каждой из этих же частотах импульсов управления путём вращения против часовой стрелки ручкой регулятора тормоза уменьшают тормозной момент на валу ротора M_T до тех пор, пока ШД не войдет в синхронизм, т.е. пока вновь не запустится. В этом случае частоты подачи импульсов управления можно считать частотами приемистости $f_{пр}$ ШД для каждой конкретной величины нагрузки на валу ротора, при которых двигатель запускается без выпадения из синхронизма. Результаты измерений M_T для каждого значения $f_{пр}$ заносят в таблицу 1.2.

Предельная динамическая характеристика приемистости также снимается при двух положениях выключателя B_2 , т. е. при напряжении на обмотках ШД – $U_{\pi} = 7\text{В}$ и $U_{\pi} = 10\text{В}$.

По данным таблицы 1.2 построить предельную динамическую характеристику приемистости шагового двигателя $f_{пр} = f(M)_{\max}$.

Т а б л и ц а 1. 2 – Данные для построения зависимости $f_{пр} = f(M)_{\max}$

| Результаты измерения | | |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| f , Гц | $M_{Tпр}$, 10^{-3} Нм | V_{π} , В |
| от 700 до 1900 | | При $U_{\pi} = 7\text{В}$ |
| Через 200 Гц | | |

| | | |
|----------------|--|-----------------------|
| от 700 до 1900 | | При $U^1_{\pi} = 10В$ |
| Через 200 Гц | | |

1.4 Содержание отчета

1.4.1 Схема исследования ШД в шаговом и непрерывном режимах работы.

1.4.2 Данные для определения шага ротора.

1.4.3 Данные замеров, необходимые для построения предельной механической характеристики.

1.4.4 Данные замеров, необходимые для построения предельной динамической характеристики приемистости.

1.4.5 Полученные в результате выполнения работы предельная механическая характеристика и предельная динамическая характеристика приемистости шагового двигателя.

1.4.6 Выводы.

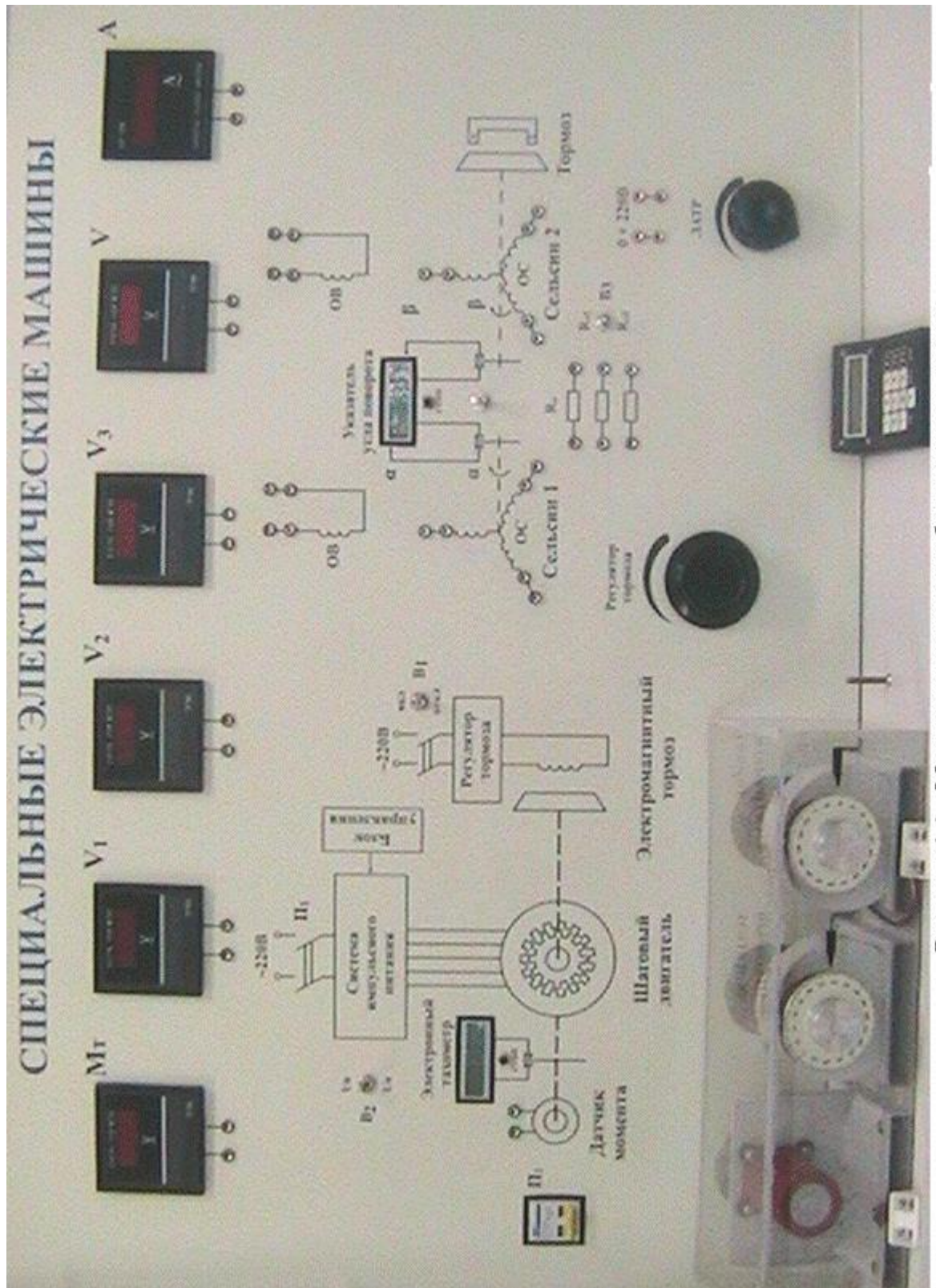


Рисунок 1.1 - Монтажная панель лабораторного стенда

5 Контрольные вопросы

1.5.1 Назначение шаговых двигателей в системах автоматике.

1.5.2 Устройство и принцип действия магнитоэлектрических шаговых двигателей.

1.5.3 Устройство и принцип действия реактивных шаговых двигателей.

1.5.4 Режимы работы шаговых двигателей и их характеристика.

1.5.5 Что характеризует частота приемистости ШД и от чего она зависит?

1.5.6 Предельная механическая характеристика ШД и что она характеризует?

1.5.7 Предельная динамическая характеристика приемистости ШД и что она характеризует?

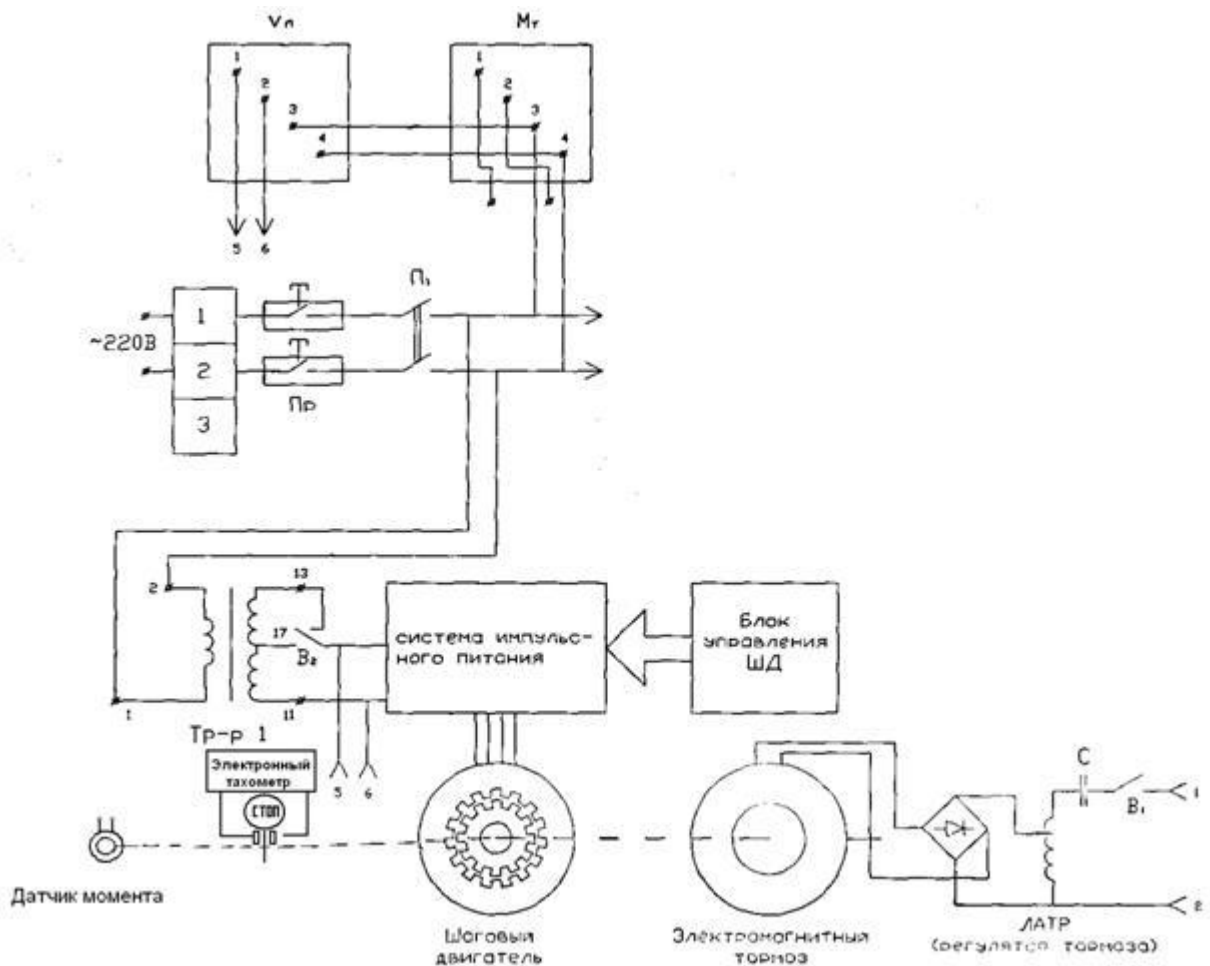
1.5.8 Статическая ошибка в положении ротора и её зависимость от нагрузки и максимального момента.

1.5.9 Зависимость электромагнитного момента от угла рассогласования.

1.5.7 Понятие о четырехтактной и шеститактной разнополярной коммутации ШД.

1.5.8 Понятие о несимметричной трехтактной и шеститактной однополярной коммутации ШД.

1.5.9 Область применения различных типов ШД в системах автоматки.



дования шагового двигателя

Лабораторная работа №2. Исследование механических и скоростных характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Цель работы и основные теоретические положения.

Целью работы является снятие скоростных характеристик

$$\omega = f(I)$$

и последующий расчет механических характеристик $\omega = f(M)$ двигателя постоянного тока независимого возбуждения в различных режимах.

Уравнение механической характеристики двигателя независимого возбуждения, как известно, имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{(k\Phi)^2} \quad (1)$$

1)

где U – напряжение сети;

Φ – магнитный поток двигателя;

M – момент двигателя;

R – полное сопротивление якорной цепи, состоящее из внешнего дополнительного сопротивления обмотки якоря;

k – конструктивный коэффициент якоря.

Из формулы (1) следует, что при изменении параметров U , Φ или R можно менять положение механической характеристики в плоскости ω , M .

Графически уравнение (1) изображается прямой на рис. 1. При неизменном напряжении сети, постоянном магнитном потоке, на различных сопротивлениях якорной цепи механические характеристики проходят через общую точку на оси координат, соответствующую скорости идеального холостого хода ω_0 .

В случае, когда якорь двигателя отключен от сети и включен на внешнее сопротивление, имеет место динамическое торможение. При этом уравнение механической характеристики имеет вид:

$$\omega = -M \frac{R}{(k\Phi)^2} \quad (2)$$

Характеристика динамического торможения при неизменном магнитном потоке двигателя представляет собой прямую, проходящую через начало координат. На рис. 1 во втором квадрате показаны механические характеристики динамического торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных сопротивлениях якорной цепи.

Вначале снимается естественная характеристика двигателя $\omega = f(I)$ при номинальном напряжении, отсутствии внешнего сопротивления в якорной цепи и номинальном токе возбуждения. При переходе из генераторного режима в двигательный ток в якорных цепях испытуемого двигателя и нагрузочного устройства изменяет свое напряжение. При снятии реостатных характеристик двигателя дополнительное сопротивление, вводимое в цепь якоря, должно иметь по заданию такие величины, чтобы в двигательном режиме получить при номинальном токе якоря испытуемого двигателя скорость, равную какой-то части от номинальной (например, $\omega = 0,5U_H$ в двигательном или $\omega = 0,5U_H$ в тормозных режимах). Дополнительное сопротивление может быть определено аналитически, на основании того, что сопротивление якорной цепи двигателя пропорционально перепаду скорости при номинальной нагрузке:

$$\frac{R_g + R_{\delta H}}{R_H} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0},$$

отсюда,

$$R_g = R_H \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right) - R_{\delta H}$$

(3)

где ω - заданная скорость в двигательном режиме при номинальном токе якоря;

$R_{\delta H}$ - внутреннее сопротивление двигателя;

R_H - номинальное сопротивление двигателя.

При определении дополнительного сопротивления $R_{\text{г}}$ для случая, когда в заданной точке двигатель работает в режиме противовключения, необходимо иметь ввиду, что скорость его отрицательная, и, следовательно, согласно (3) при $\omega < 0$

$$\frac{R_{\text{г}} + R_{\delta H}}{R_H} = \frac{|\omega_0| + |\omega|}{|\omega_0|},$$

$$R_{\text{г}} = R_H \left(1 + \left| \frac{\omega}{\omega_0} \right| \right) - R_{\delta H}$$

тогда

На рисунке 1 приведена реостатная характеристика, проходящая при номинальном токе через точку $\omega_2 = -0,5 \omega_n$, находящуюся в IV квадранте.

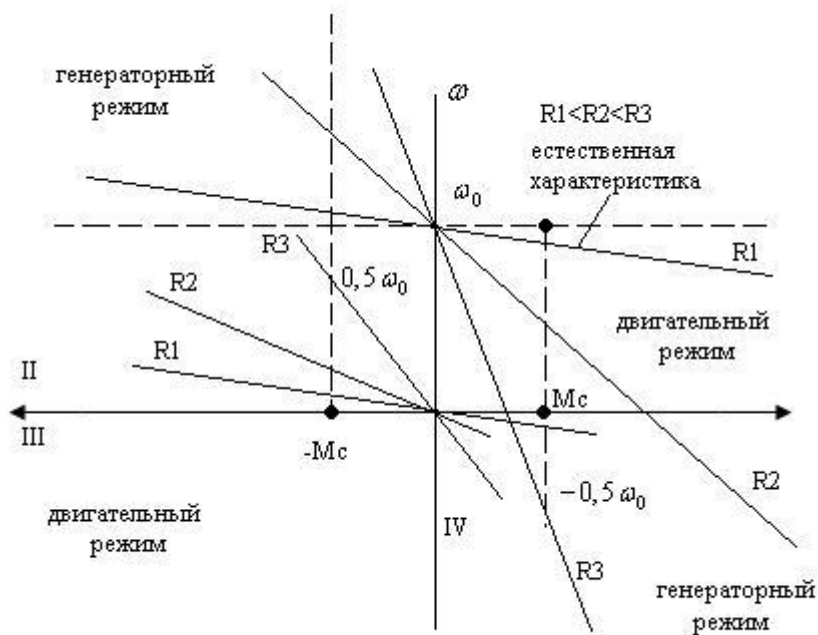


Рисунок 1- реостатная характеристика

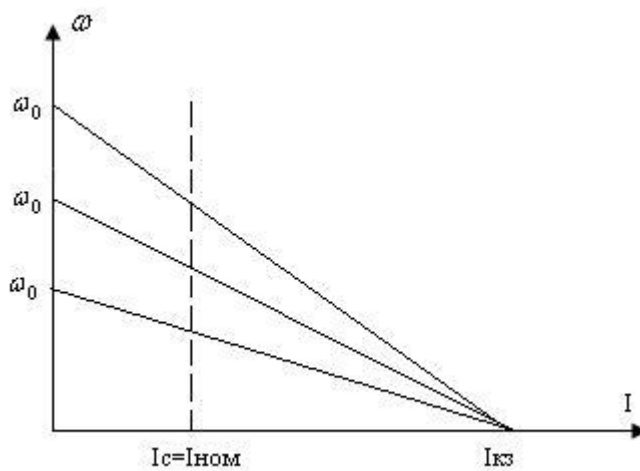


Рисунок 2

Для снятия характеристик в режиме рекуперативного торможения необходимо с помощью нагрузочной машины сообщить испытуемому двигателю скорость, превышающую скорости идеального холостого хода, в том же направлении, в котором он вращается и в двигательном режиме. При этом скорость вращения испытуемого двигателя не должна превышать его скорости идеального холостого хода более чем на 30%. Естественные и реостатные характеристики в двигательном и тормозном режимах для двигателя с независимым возбуждением при неизменном напряжении сети и полном магнитном потоке приведены на рис. 1.

Для снятия характеристик двигателя в режиме динамического торможения якорь испытуемого двигателя отключается от сети и замыкается на дополнительное сопротивление. Обмотка возбуждения испытуемого двигателя присоединяется к сети, ток в ней поддерживается таким же, как и в предыдущем случае. Необходимая величина дополнительного сопротивления в якорной цепи может быть определена графическим путем на основании соотношения

$$\frac{R_T + R_{\delta H}}{R_H} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

откуда

$$R_T = \frac{\omega}{\omega_0} R_H - R_{\delta H} ,$$

где ω - скорость двигателя в тормозном режиме при номинальном токе якоря.

Снятие характеристик динамического торможения удобно начинать со скорости равной нулю. С целью ограничения тока в якорной цепи нагрузочных машин при ее включении необходимо проследить за тем, чтобы нагрузочная машина, соединенная с испытуемым двигателем, имела заданное возбуждение, в то время как питающий ее генератор не должен быть возбужден. После соединения якорной цепи нагрузочных машин следует постепенно увеличить ток возбуждения генератора. При этом нагрузочная машина и связанный с ней испытуемый двигатель начнут вращаться.

Снятие характеристик двигателя при ослабленном потоке $\omega = f(I)$ и последующий расчет $\omega = f(M)$ производится путем уменьшения тока возбуждения двигателя до величины указанной преподавателем. При этом схема опыта остается такой же, как и в случае снятия естественной характеристики. Характеристики $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ для ослабленного потока двигателя приведены на рис.2.

Порядок выполнения работы.

- 1) Ознакомление с электрооборудованием установки.
- 2) Снять и построить естественную характеристику двигателя $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ в генераторном и двигательном режимах при U_n , $I_{вн}$, $R_g=0$.
- 3) Снять и построить реостатные характеристики двигателя $\omega = f(M)$ при $U = U_n$, $I_{в} = I_{вн}$ в двигательном режиме через заданное значение скорости в режиме противовключения.
- 4) Снять и построить характеристики двигателя $\omega = f(I)$ и $\omega = f(M)$ при ослабленном потоке.

Данные испытуемого двигателя:

| | | |
|-----------|-----------------|--------------------|
| Тип: П-21 | $P_n=0.37$ кВт | $U=220$, В |
| | $I_{ан}=1.6$ А | $R=24$, Ом |
| | $I_{вн}=0.15$ А | $P_n=725$, об/мин |

Лабораторная работа №3. Исследование однофазного асинхронного двигателя

Цель работы: Ознакомление с устройством, принципом действия однофазного асинхронного двигателя и исследование его характеристик.

3.1 Основные сведения о стенде и установленном оборудовании

Стенд содержит трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, на валу которого установлен электромагнитный тормоз. В качестве регулятора тормозного момента используется ЛАТР. Величина тормозного момента контролируется прибором МТ. Переключателем П1 на схему подается трехфазное напряжение, а выключателем В1 напряжение питания тормоза.

Для измерения скорости вращения на валу ротора двигателя установлен тахогенератор частоты выходного напряжения, с которого замеряется частотомером. Кроме того, на стенде установлены цифровые вольтметры и амперметр, а также прибор для измерения коэффициента мощности $\cos\varphi$.

При переключении трехфазного асинхронного двигателя в однофазный режим работы используются конденсаторы, которые подключаются к статорной обмотке переключателем на три положения (C^1, C^2, C^3). Монтаж исследуемой схемы осуществляется с помощью изолированных гибких проводников.

Монтажная панель лабораторного стенда приведена на рисунке 3.1., при этом сборка комплектующего оборудования выполнена таким образом, что для монтажа исследуемой схемы требуется минимальное количество проводников.

3.2 Программа работы

3.2.1 Ознакомиться с устройством и принципом действия трёхфазного и однофазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, рассмотреть возможность использования трехфазного двигателя в качестве однофазного.

3.2.2 Ознакомиться с лабораторным стендом и схемами исследования.

3.2.3 Собрать схему согласно рисунку 3.2 и снять механическую

характеристику трехфазного асинхронного двигателя, а также зависимость коэффициента мощности от нагрузки.

3.2.4 Собрать схему согласно рисунку 3.3 и снять механическую

характеристику однофазного асинхронного двигателя, а также зависимость коэффициента мощности от нагрузки при трех значениях рабочего конденсатора включенного в цепь статора.

3.2.5 Проанализировать и сравнить полученные результаты при работе

асинхронного двигателя в качестве трехфазного и в качестве однофазного двигателя.

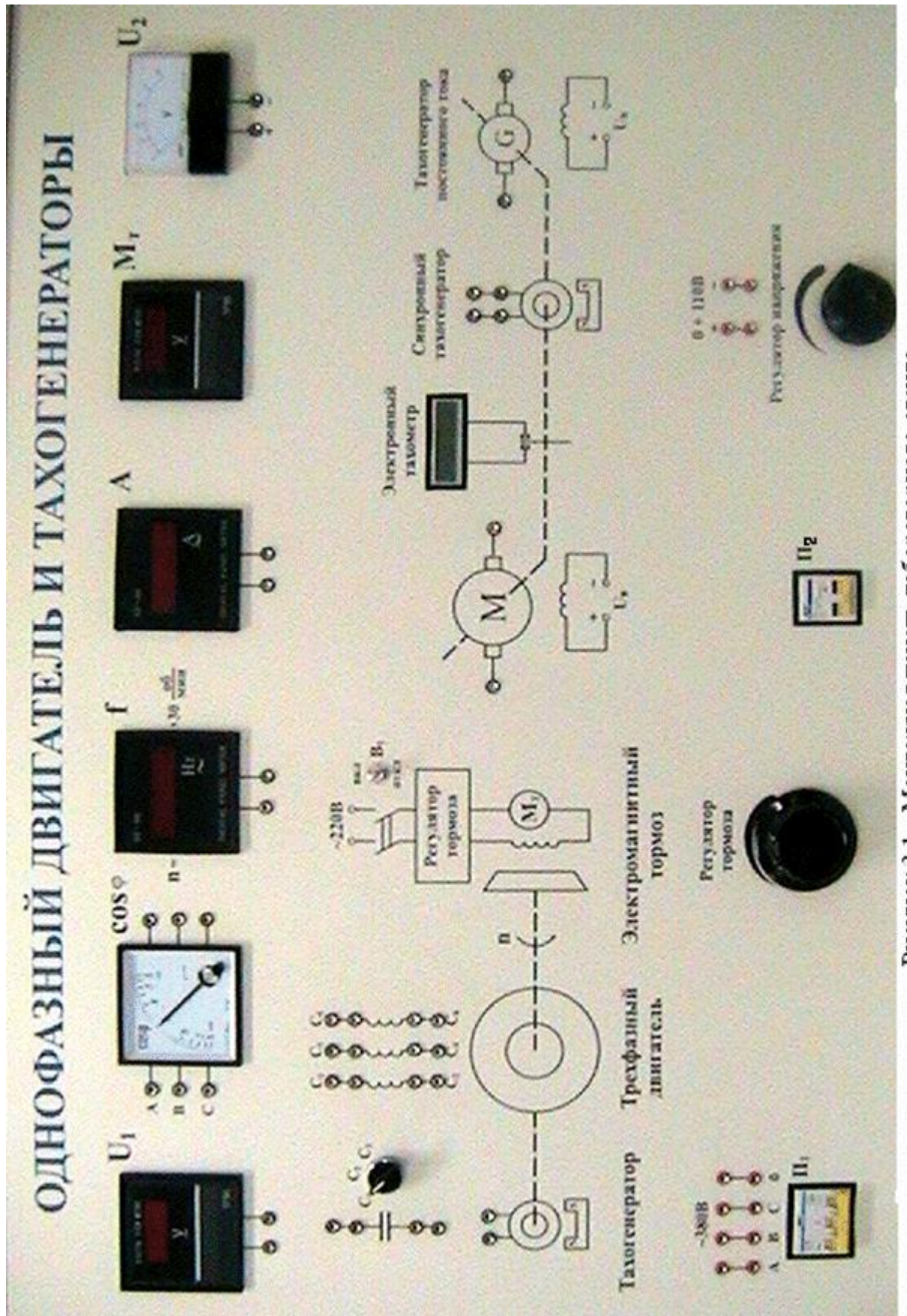


Рисунок 3.1 - Монтажная панель лабораторного стенда

3 Указания к выполнению работы

3.3.1 Проверить отсутствие напряжения на стенде, состояние

измерительных приборов, клемм и соединительных проводников. Ознакомиться с лабораторным стендом и схемами исследования.

3.3.2 Собрать электрическую схему, представленную на рисунке 3.2, и,

включив переключатель П1, подать на двигатель трехфазное напряжение, все остальные переключатели должны быть отключены.

Затем включить переключатель В1 в верхнее положение и с помощью регулятора тормоза путем вращения ручкой по часовой стрелке осуществить увеличение нагрузки на валу двигателя. При этом снимают показания всех приборов и заносят в таблицу 3.1. Показания прибора, измеряющего тормозной момент, необходимо умножить на 0,1 Н м.

По данным таблицы 3.1, выбрав масштаб, построить механическую характеристику асинхронного двигателя и зависимости: $\cos\varphi = f(MT)$; $I = f(MT)$.

Завершив выполнение данного пункта, необходимо отключить переключатели П1 и В1.

Т а б л и ц а 3.1 – Зависимости: $n = f(MT)$; $\cos\varphi = f(MT)$; $I = f(MT)$

| Результаты измерений | | | | | | |
|----------------------|----------------|---|--------|-------|----|------------------|
| № | V ₁ | A | n, | cosφ, | f, | M _т , |
| п\п | B | A | об/мин | о. е. | Гц | Н м |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| до 5 | | | | | | |

3.3.3 Далее для исследования однофазного асинхронного двигателя

необходимо перевести трехфазный двигатель в однофазный режим работы, собрав схему согласно рисунку 3.3. Собранный по данной схеме трехфазный асинхронный двигатель представляет собой однофазный конденсаторный двигатель со вспомогательной обмоткой на статоре. Схема позволяет снимать механическую характеристику $\omega = f(MT)$ однофазного асинхронного двигателя, зависимость $\cos\varphi = f(MT)$ и зависимость $I = f(MT)$.

Установив переключатель рабочих конденсаторов в положение С1 переключателем П1, подать на двигатель однофазное напряжение (рисунок 3.3).

Затем, включив переключатель В₁ в верхнее положение регулятором тормоза, вращая ручкой по часовой стрелке, осуществляют увеличение нагрузки на валу двигателя. При этом снимают показания всех приборов и заносят в таблицу 3.2.

Эксперимент повторяют, устанавливая переключатель рабочих конденсаторов поочерёдно в положение С², и С³. По данным таблицы 3.2 построить в ранее выбранном масштабе механические характеристики однофазного асинхронного двигателя, а также зависимости: $\cos\varphi = f(M_T)$ и $I = f(M_T)$, полученные при разных значениях рабочих конденсаторов.

Т а б л и ц а 3.2 – Зависимости $n = f(M_T)$; $\cos\varphi = f(M_T)$; $I = f(M_T)$

| Результаты измерений | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|--------------------|------|-----------|-------------|-------|----------------------|
| Положение выключателя С ^р | № п\п | V ₁ , В | A, А | n, об/мин | cosφ, о. е. | f, Гц | M _T , Н м |
| С ¹ | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| | 3 | | | | | | |
| С ² | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| | 3 | | | | | | |
| С ³ | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| | 3 | | | | | | |

3.3.4 Определить и сравнить жесткость механической характеристики двигателя при его работе в трёхфазном и однофазном режимах

$$\beta = \frac{\Delta M_T}{\Delta \omega}$$

где β - жесткость характеристики;

ΔM_T - приращение момента торможения;

$\Delta \omega$ - приращение скорости.

Определить влияние величины рабочего конденсатора на жесткость механической характеристики и на величину $\cos\varphi$ однофазного асинхронного двигателя. Сравнить коэффициенты мощности асинхронного двигателя в трехфазном и однофазном режимах работы.

3.4 Содержание отчета

3.4.1 Схема исследования асинхронного двигателя в трехфазном режиме

работы, экспериментальные данные зависимостей $\omega = f(M_T)$ и $\cos\varphi = f(M_T)$ и характеристики этих зависимостей.

3.4.2 Схема исследования асинхронного двигателя в однофазном режиме

работы, экспериментальные данные зависимостей $\omega = f(M_T)$ и $\cos\varphi = f(M_T)$ и характеристики этих зависимостей.

3.4.3 Анализ полученных результатов исследований, выполненный в соответствии с пунктами 3.2.5 и 3.3.4 настоящей методики.

3.5 Контрольные вопросы

3.6.1 Устройство и принцип действия однофазного АД.

3.6.2 Типы однофазных асинхронных двигателей со вспомогательной обмоткой на статоре.

3.6.3 Устройство и принцип действия однофазного асинхронного двигателя с полым ротором.

3.6.4 Из каких условий выбирается величина рабочего конденсатора C_P ?

3.6.5 Рабочие характеристики однофазного асинхронного двигателя.

3.6.6 Регулирование скорости однофазного асинхронного двигателя.

3.6.7 Достоинства и недостатки однофазного асинхронного двигателя.

3.6.8 Область применения однофазных асинхронных двигателей в системах автоматики.

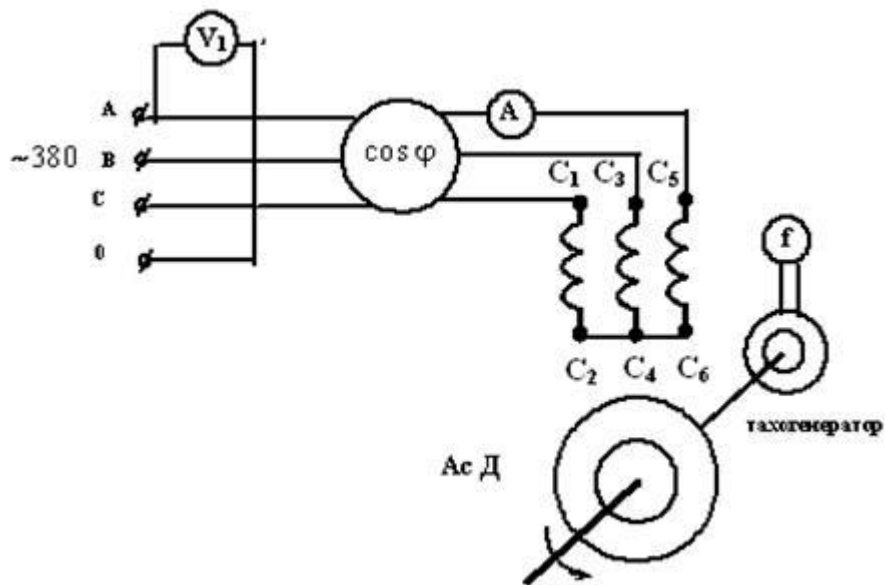


Рисунок 3.2 - Схема исследования трехфазного асинхронного двигателя

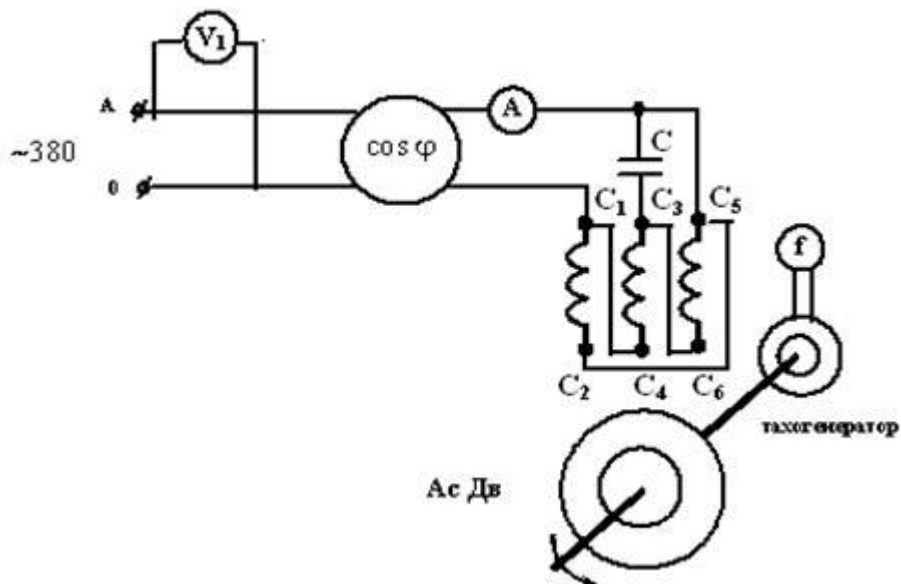


Рисунок 3.3 - Схема исследования однофазного асинхронного двигателя

Лабораторная работа №4. Исследование тахогенераторов

4.1 Цель работы

Ознакомление с устройством, принципом действия синхронного тахогенератора и тахогенератора постоянного тока, расчет их параметров и исследование характеристик.

4.2 Основные сведения о стенде и установленном оборудовании

Монтажная панель лабораторного стенда ранее приводилась на рисунке 3.1, при этом сборка комплектующего оборудования данной лабораторной работы выполнена таким образом, что для монтажа исследуемых схем требуется минимальное количество изолированных гибких проводников.

Стенд содержит приводной электродвигатель постоянного тока, синхронный тахогенератор и тахогенератор постоянного тока, связанные между собой жестким валом на котором установлен цифровой электронный тахометр для измерения скорости вращения. Переключатель П1 подключает к питанию цифровой вольтметр, амперметр и частотомер, а переключатель П2 регулятор напряжения, обмотку возбуждения приводного электродвигателя и обмотку возбуждения тахогенератора постоянного тока. Якорная обмотка приводного электродвигателя подключена к регулятору напряжения, что позволяет изменять скорость его вращения. Частота выходного напряжения синхронного тахогенератора измеряется частотомером, а амплитуда цифровым вольтметром U^1 , величина напряжения на выходе тахогенератора постоянного тока измеряется вольтметром U^2 .

Монтаж исследуемой схемы осуществляется с помощью изолированных гибких проводников.

4.3 Программа работы

4.3.1 Ознакомится с устройством, принципом действия синхронного тахогенератора и тахогенератора постоянного тока, а также с их основными параметрами.

4.3.2 Ознакомиться с лабораторным стендом и схемами исследования синхронного тахогенератора и тахогенератора постоянного тока.

4.3.3 Исследование синхронного тахогенератора.

4.3.3.1 Собрать схему исследования синхронного тахогенератора в соответствии с рисунком 4.1, определить зону его нечувствительности, снять и построить выходные характеристики $U = f(n)$:

- a) в режиме холостого хода $Z^H = \infty$;
- b) в режиме активной нагрузки $R = 1,0$ кОм;
- c) в режиме емкостной нагрузки $C = 0,5$ мкФ.

4.3.3.2 Определить крутизну и линейность синхронного тахогенератора как основных параметров определяющих качество работы тахогенератора.

4.3.3.3 Снять и построить зависимость выходного напряжения тахогенератора от величины нагрузки $U = f(z)$ при $n = 600 \text{ об/мин}$.

a) для активной нагрузки $U = f(R)$;

b) для емкостной нагрузки $U = f(X^c)$.

4.3.4 Исследование тахогенератора постоянного тока.

4.3.4.1 Собрать схему исследования тахогенератора постоянного тока по рисунку 4.2, определить зону его нечувствительности, снять и построить выходные характеристики $U = f(n)$:

a) в режиме холостого хода $Z^H = \infty$;

b) в режиме активной нагрузки $R = 1,0 \text{ кОм}$.

4.3.4.2 Определить крутизну и линейность тахогенератора постоянного тока.

4.3.4.3 Снять и построить зависимость выходного напряжения тахогенератора от величины нагрузки $U = f(R)$ при $n = 600 \text{ об/мин}$.

4.3.4.4 Определить асимметрию выходного сигнала тахогенератора постоянного тока.

4.3.5 Проанализировать и сравнить результаты, полученные при исследовании данных тахогенераторов. Определить какой из тахогенераторов имеет лучшие качественные показатели.

4.4 Указания к выполнению работы

4.4.4 Проверить отсутствие напряжения на стенде, состояние измерительных приборов, клемм и соединительных проводников. Ознакомиться с лабораторным стендом и схемами исследования.

4.4.5 Исследование синхронного тахогенератора

4.4.5.1 Собрать электрическую схему представленную на рисунке 4.1 при этом выключатель Π_2 должен быть в отключенном состоянии.

4.4.5.2 Определение зоны нечувствительности синхронного тахогенератора выполняется следующим образом: включив переключатель Π_1 подать питание на цифровой вольтметр, амперметр и частотомер, включить переключатель Π_2 , который подключает к питанию регулятор напряжения (от 0 – 110В), обмотку возбуждения приводного электродвигателя и обмотку возбуждения тахогенератора постоянного тока.

Затем, медленно поворачивая регулятор напряжения по часовой стрелке установить минимально возможные обороты приводного электродвигателя, и плавно увеличивая скорость, зафиксировать момент появления сигнала на выходе тахогенератора (напряжение и частота). При этом необходимо записать интервал скоростей вращения от 0 до скорости, при которой появляется сигнал на выходе (U_1 и f). Данный интервал определяет зону нечувствительности тахогенератора.

4.4.5.3 Чтобы снять выходные характеристики тахогенератора необходимо, медленно поворачивая регулятор напряжения по часовой стрелке записать и занести в таблицу 4.1 показания вольтметра U_1 , частотомера f и электронного тахометра через каждые **150 об/мин.** в режиме холостого хода тахогенератора, т.е. при $R^H = \infty$.

Эксперимент повторяют в режиме активной нагрузки $R^H = 2,0$ кОм и в режиме емкостной нагрузки $C = 0,5$ мкФ, которые подключаются к выходной обмотке тахогенератора.

Т а б л и ц а 4.1 – Зависимости $U_1 = f(n)$ и $f = f(n)$.

| | | | | | | | |
|----------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $Z^H = \infty$ | U_1 , В. | | | | | | |
| | f Гц. | | | | | | |
| | n , об/мин. | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 |
| $Z^H = R$ | U_1 , В. | | | | | | |
| | f Гц. | | | | | | |
| | n , об/мин. | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 |
| $Z^H = X^C$ | U_1 , В. | | | | | | |
| | f Гц. | | | | | | |
| | n , об/мин. | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 |

4.4.5.4 По данным таблицы 4.1 в выбранном масштабе на одном графике построить 3 выходные характеристики синхронного тахогенератора $U_1 = f(n)$ и 3 зависимости частоты ЭДС генератора от скорости вращения $f = f(n)$.

4.4.5.5 Для характеристики снятой в режиме холостого хода определить крутизну, которая представляет собой отношение приращения напряжения к приращению частоты вращения:

$$c = \Delta U / \Delta n \text{ мВ/об/мин.}$$

Разбив выходную характеристику тахогенератора на 5- 6 участков через **150 об/мин.** скорости (по оси ординат) и определив для каждого из них приращение напряжения рассчитать крутизну отдельных участков.

Определить среднее арифметическое значение крутизны $c^{ар}$ выходной характеристики, просуммировав крутизну отдельных ее участков, деленную на их число.

$$\alpha = \frac{\Delta C_M}{c^{ар}} 100 \%$$

Найти максимальное значение в расхождении крутизны Δc_M отдельных участков, которое и будет характеризовать линейность выходной характеристики

4.4.5.6 При определении зависимости выходного напряжения тахогенератора от величины нагрузки $U = f(Z)$ установить скорость $n = 600 \text{ об/мин}$. Постепенно увеличивая активную нагрузку от $R^{\#} = \infty$ до $R^{\#} = 1,0 \text{ кОм}$, записывают 5 показаний вольтметра U_1 .

Аналогично проводят опыт для чисто емкостной нагрузки, и результаты заносят в таблицу 4.2.

Т а б л и ц а 4.2 – Зависимости $U_1 = f(R^{\#})$ и $U_1 = f(X^C)$.

| | | | | | | |
|----------------|----------|-----|------|------|-----|------|
| $R^{\#}$, кОм | ∞ | 2,5 | 2,2 | 1,8 | 1,4 | 1,0 |
| U_1 , В. | | | | | | |
| $C^{\#}$, мкФ | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,35 | 0,6 | 1,0 |
| X^C , кОм | ∞ | 31 | 15,5 | 9 | 5,3 | 3,18 |
| U_1 , В. | | | | | | |
| n , об/мин. | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 |

4.4.5.7 По данным таблицы 4.2 на одном графике в выбранном масштабе построить 2 внешние характеристики синхронного тахогенератора $U_1 = f(R^{\#})$ и $U_1 = f(X^C)$.

Завершив выполнение данного пункта методики необходимо отключить переключатели Π_1 и Π_2 .

4.4.6 Исследование тахогенератора постоянного тока

4.4.6.1 Собрать электрическую схему представленную на рисунке 4.2 при этом переключатели Π_1 и Π_2 должны быть в отключенном состоянии.

4.4.6.2 Зона нечувствительности тахогенератора постоянного тока определяется при включенных переключателях Π_1 и Π_2 по той же

методике, что и для синхронного тахогенератора, которая рассмотрена ранее в пункте 4.4.5.2 настоящих указаний. При этом необходимо зафиксировать момент появления на выходе тахогенератора напряжения по вольтметру U_2 .

4.4.6.3 Чтобы снять выходные характеристики тахогенератора, необходимо медленно поворачивая регулятор напряжения по часовой стрелке записать и занести в таблицу 4.3 показания вольтметра U_2 , частотомера f и электронного тахометра через каждые 100об/мин. в режиме холостого хода тахогенератора, т.е. при $Z^H = \infty$.

Эксперимент повторяют в режиме активной нагрузки $R = 1,0$ кОм, которая подключаются к выходной обмотке тахогенератора.

Т а б л и ц а 4.3 – Зависимость $U_2 = f(n)$

| | | | | | |
|---------------|----------|-----|-----|-----|-----|
| R^H кОм | ∞ | 2,5 | 2,2 | 1,7 | 1,0 |
| U_2 | | | | | |
| n , об\мин. | 150 | 300 | 450 | 750 | 900 |

4.4.6.4 По данным таблицы 4.3 в выбранном ранее в пункте 4.4.5.4 масштабе на одном графике построить 2 выходные характеристики тахогенератора постоянного тока $U = f(n)$.

4.4.6.5 Крутизну и линейность выходной характеристики тахогенератора постоянного тока определяют по той же методике, что и для синхронного тахогенератора, которая рассмотрена ранее в пункте 4.4.5.5 настоящих указаний.

4.4.6.6 Для определения зависимости выходного напряжения тахогенератора от величины нагрузки $U = f(R^H)$ установить скорость приводного электродвигателя $n = 600$ об\мин. Постепенно увеличивая активную нагрузку от $R^H = \infty$ до $R^H = 1,0$ кОм, записывают 5 показаний вольтметра U_2 и заносят их в таблицу 4.4.

Т а б л и ц а 4.4 – Зависимость $U_2 = f(R^H)$

| | | | | | | | |
|----------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $R^H = \infty$ | U_2 , В. | | | | | | |
| | n , об\мин. | | | | | | |
| $R^H = 1$ кОм | U_2 , В. | | | | | | |
| | n , об\мин. | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 |

4.4.6.7 По данным таблицы 4.4 построить внешние характеристики тахогенератора постоянного тока $U = f(R^H)$.

Завершив выполнение данного пункта методики необходимо отключить переключатели П₁ и П₂.

4.4.7 Поменять полярность напряжения на якоре приводного двигателя и вновь включив переключатели П₁ и П₂, снять значение выходной ЭДС тахогенератора при обратном вращении на скорости **600об\мин** в режиме холостого хода. Рассчитать асимметрию выходного сигнала $\Delta U = U^n - U^{обр}$, которая представляет собой разность значений выходной ЭДС тахогенератора при его вращении в прямом и обратном направлении на одной и той же скорости, в данном случае (**600об\мин**)

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_n} 100 \%$$

4.4.8 Проанализировать и сравнить по линейности, крутизне и зоне нечувствительности полученные характеристики синхронного тахогенератора и тахогенератора постоянного тока. Определить какой из тахогенераторов имеет лучшие качественные показатели.

4.5 Содержание отчета

4.5.1 Исследование синхронного тахогенератора

4.5.1.1 Схема исследования синхронного тахогенератора.

4.5.1.2 Результаты эксперимента по определению зоны нечувствительности синхронного тахогенератора в соответствии с пунктом 4.4.5.2 настоящей методики.

4.5.1.3 Данные измерений необходимые для построения выходных характеристик синхронного тахогенератора и зависимости $f = f(n)$ при его работе в режиме холостого хода $R^H = \infty$; активной нагрузки $R^H = 2,0$ кОм и емкостной нагрузки $C = 0,5$ мкФ.

Три выходные характеристики синхронного тахогенератора $U = f(n)$ и три зависимости $f = f(n)$ построенные в выбранном масштабе на одном графике.

4.5.1.4 Расчет крутизны и линейности выходной характеристики в соответствии с пунктом 4.4.5.5 настоящей методики.

4.5.1.5 Данные замеров необходимые для построения зависимости выходного напряжения тахогенератора от величины активной и емкостной нагрузки.

Построенные в выбранном масштабе на одном графике внешние характеристики синхронного тахогенератора $U = f(R^H)$ и $U = f(X^C)$.

4.5.2 Исследование тахогенератора постоянного тока

4.5.2.1 Схема исследования тахогенератора постоянного тока.

4.5.2.2 Результаты эксперимента по определению зоны нечувствительности тахогенератора постоянного тока в соответствии с пунктом 4.4.5.2 настоящей методики.

4.5.2.3 Данные измерений необходимые для построения выходных характеристик тахогенератора и зависимости $f = f(n)$ при его работе в режиме холостого хода $R^H = \infty$ и активной нагрузки $R^H = 1,0$ кОм.

Две выходные характеристики тахогенератора постоянного тока $U = f(n)$ построенные на одном графике в масштабе выбранном ранее п. 4.5.1.3.

4.5.2.4 Расчет крутизны и линейности выходной характеристики в соответствии с пунктом 4.4.5.5 настоящей методики.

4.5.2.5 Данные замеров необходимые для построения зависимости выходного напряжения тахогенератора от величины активной нагрузки.

Внешняя характеристика тахогенератора постоянного тока $U = f(R^H)$ построенная в масштабе выбранном ранее п. 4.5.1.5.

4.5.3 Результаты анализа качественных показателей синхронного тахогенератора и тахогенератора постоянного тока.

4.6 Контрольные вопросы

4.6.1 В каком качестве применяются тахогенераторы в системах автоматики?

4.6.2 Устройство и принцип действия синхронного и асинхронного тахогенераторов.

4.6.3 Устройство и принцип действия тахогенератора постоянного тока.

4.6.4 Достоинства и недостатки синхронного тахогенератора.

4.6.5 Достоинства и недостатки асинхронного тахогенератора.

4.6.6 Достоинства и недостатки тахогенератора постоянного тока.

- 4.6.7 Требования, предъявляемые к тахогенераторам и какие из них основные?
- 4.6.8 Основные параметры, определяющие качество работы тахогенератора.
- 4.6.9 Нулевой сигнал и, в каком типе тахогенератора он присутствует?
- 4.6.10 Чем вызвана асимметрия выходного напряжения и, в каком тахогенераторе она наблюдается?
- 4.6.11 Что такое зона нечувствительности, асимметрия и температурная погрешность тахогенератора?
- 4.6.12 Почему уменьшается крутизна выходной характеристики тахогенератора с уменьшением нагрузки?
- 4.6.13 Какое влияние оказывает реактивная составляющая сопротивления выходной обмотки тахогенератора на его выходную характеристику?

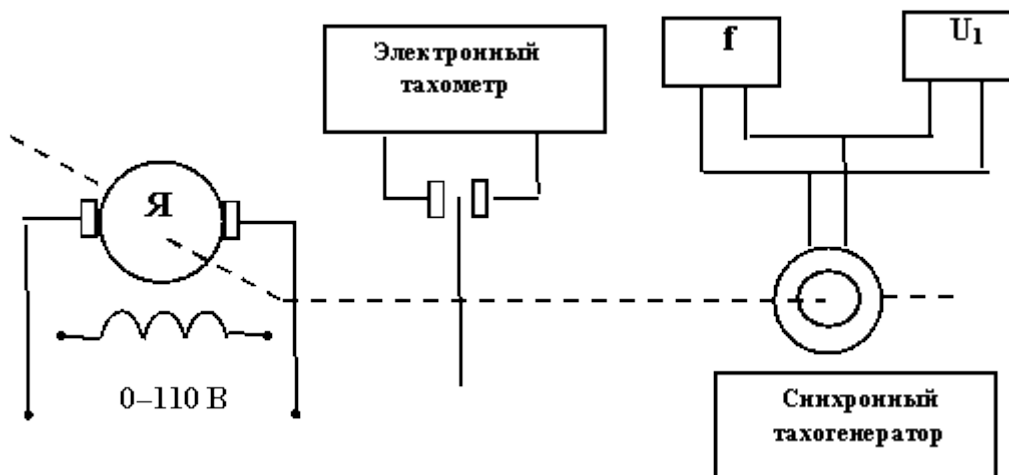
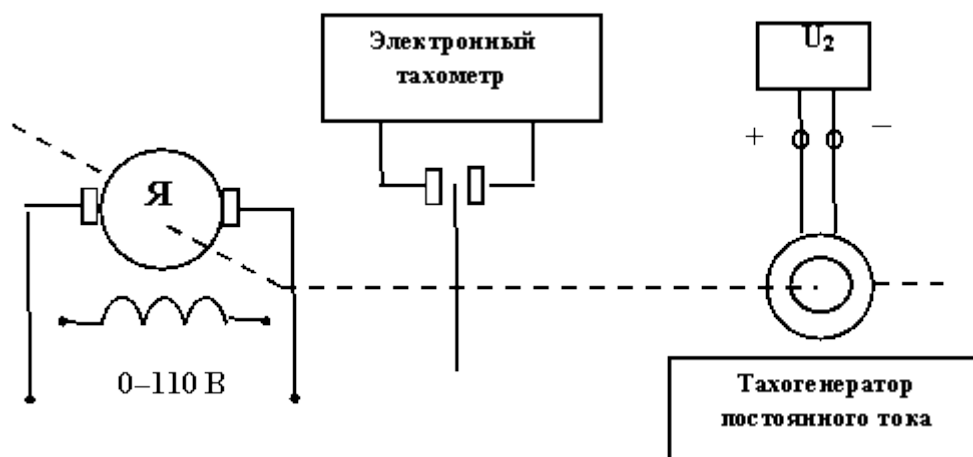


Рисунок 4. 1 - Схема исследование синхронного тахогенератора



Лабораторная работа №5

Исследование замкнутой системы автоматического управления с двигателем постоянного тока

1.1 Цель работы

Исследовать статические свойства и характеристики системы «генератор – двигатель» с жесткой отрицательной обратной связью по скорости.

1.2 Общие сведения

В современных электроприводах широко распространены замкнутые системы автоматического управления, предназначенные для обеспечения требуемых режимов работы производственных механизмов, независимо от изменения возмущающего воздействия. Примером замкнутой системы автоматического управления может служить схема регулирования (стабилизации) скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения, управляемого по системе "Электромашинный усилитель - двигатель постоянного тока" (ЭМУ-Д).

На рисунке 1.1 представлена упрощенная структурная схема системы, где F_{OC} - намагничивающая сила обмотки обратной связи;

F_{30} - намагничивающая сила задающей обмотки;

$F_{ЭМУ} = F_{30} - F_{OC}$ – результирующая намагничивающая сила;

$E_{ЭМУ}$ – ЭДС двигателя;

n_d - скорость двигателя.

МДС задающей обмотки определяется величиной напряжения U_{30} . МДС обмотки отрицательной обратной связи определяется напряжением тахогенератора, а поскольку $U_{ТГ} = \gamma n$ (γ - коэффициент передачи тахогенератора), в конечном счете скорость двигателя стабилизируется.

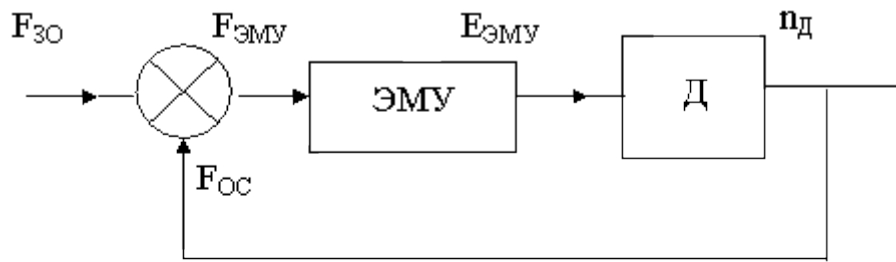


Рисунок 1.1

Для осуществления автоматического регулирования необходимо прежде всего измерить регулируемую величину, для чего служит измерительный орган – тахогенератор ТГ. Результаты измерения в виде напряжения тахогенератора $U_{ТГ}$, подается для воздействия на регулирующий орган ЭМУ. Исполнительным органом является исполнительный двигатель Д.

Статический перепад скорости выражается в разомкнутой системе

$$\Delta n_{раз} = \frac{IR}{k\Phi},$$

в замкнутой системе

$$\Delta n_{замк} = \frac{k\Phi}{k\Phi + k_{ЭМУ} \gamma} \Delta n_p,$$

где

$$k_{ЭМУ} = \frac{U_{вых. ЭМУ}}{U_{вх. ЭМУ}};$$

$$\gamma = \frac{U_{ТГ}}{n}.$$

Анализ приведенных формул позволяет выявить влияние коэффициентов усиления ЭМУ и передаточного коэффициента тахогенератора на статический перепад скорости.

1.3 Описание установки

На рисунке 1.2 приведена принципиальная схема установки, в соответствии с которой выполнен стенд.

На стенде установлено два агрегата:

1. Асинхронный двигатель – электромашинный усилитель с паспортными данными:

Асинхронный двигатель/АД/

$P_H=1,9$ кВт; $U_H=380/220$ В; $I_H=3,8/6$ А; $n_H=2900$ об/мин.

Включение АД осуществляется от сети переменного тока 220 В при помощи автомата АІ.

Электромашинный усилитель типа ЭМУ-Д12-А- $P_H=1,2$ кВт; $U_H =115$ В, $I_H=115$ А.

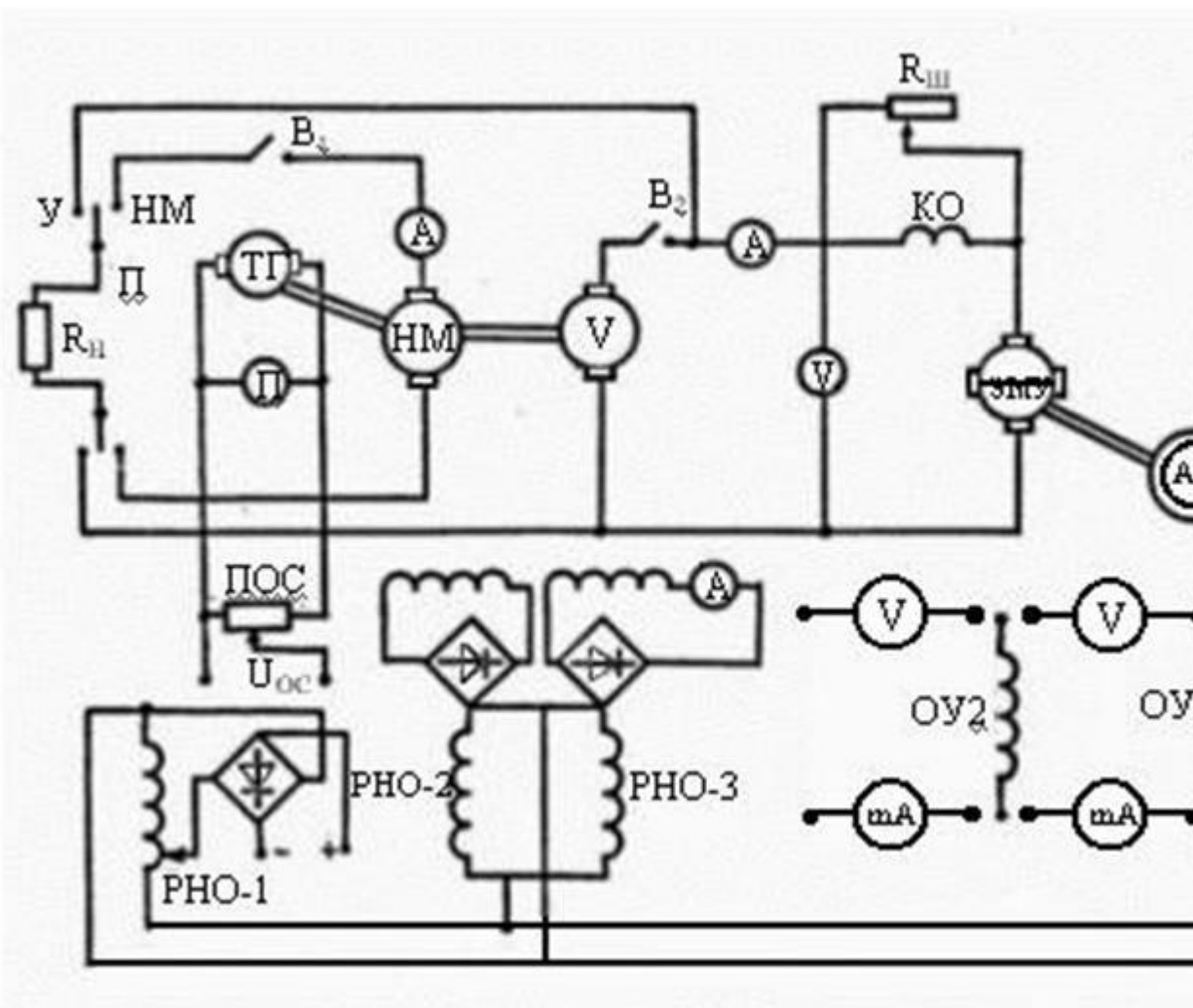


Рисунок 1.2

На панель выведены обмотки якоря, компенсационная обмотка КО, две одинаковые обмотки управления ОУI и ОУII с числом витков 675, сопротивлением 184 Ом, номинальным током возбуждения 240 мА.

2. Испытуемый двигатель постоянного тока – нагрузочная машина постоянного тока с паспортными данными:

Двигатель Д типа П-ПМ – $P_H=660$ Вт; $U_H=110$ В; $n_H=3000$ об/мин; $R_{\text{я}}=3,5$ Ом; $k\Phi=0,053$ В.с.;

Нагрузочная машина НМ типа П-12- $P_H=1$ кВт; $U_H=110$ В; $n_H=3000$ об/мин; $I_H=5,69$ А.

На валу агрегата установлен тахогенератор ТГ для осуществления отрицательной жесткой обратной связи по скорости вращения вала двигателя. Для изменения величины обратной связи на панели установлен потенциометр «ПОС».

Обмотки возбуждения электрических машин: задающая ЭМУ /ОУI/ нагрузочной машины НМ и двигатель Д питаются от сети через РНО-1,2,3

и выпрямители. Все РНО подключаются к сети автоматом АІ, одновременно с двигателем АД.

Для изменения нагрузки на испытуемом двигателе Д на его валу установлена нагрузочная машина НМ, якорь которой при помощи переключателя «П» подключается к переменному нагрузочному сопротивлению R_n . Величину нагрузки можно изменить ступенчато или плавно изменением тока возбуждения НМ при помощи РНО-2.

Переключателем «П» нагрузочное сопротивление можно подключать к якорю ЭМУ.

Контроль за изменением нагрузки осуществляется по амперметрам, включенным в цепь якорей ЭМУ-Д и НМ.

1.4 Программа выполнения работы

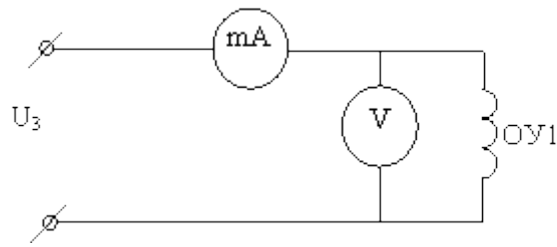
1. Ознакомиться с электрическими машинами, аппаратами и приборами, установленными на стенде.
2. Ознакомиться с принципиальной схемой стенда.
3. Провести опыт холостого хода ЭМУ.
4. Провести опыт для построения внешней характеристики ЭМУ для различной степени компенсации.
5. Исследовать разомкнутую систему регулирования скорости ИД.
6. Исследовать замкнутую систему регулирования скорости ИД.

Сравнить опытные и расчетные данные и сделать выводы.

1.5 Методические указания

Для подготовки стенда к работе:

- 1.5.1 Собрать электрическую схему питания задающей обмотки.



1.5.2 Проверить работу схемы, для чего:

- а) Установить РНО – 1,2,3 в нулевое положение;
- б) Разомкнуть выключатели 1 и 2 в цепях якорной НМ и ЭМУ-Д;
- в) Включив автомат А1, подать питание на статор АД и РНО –1;

г) Проверить работу ЭМУ на холостом ходу, увеличивая возбуждение обмотки ОУ1 при помощи РНО–1. Проверить правильность включения обмотки возбуждения и приборов. При необходимости отключите А1 и произвести соответствующие изменения в схеме.

1.5.3 Для проведения опыта холостого хода возбуждать ЭМУ следует до 150В. Изменить ток возбуждения плавно от 0 до значения, соответствующего 150 В и обратно до 0. Данные опыта ($i_{OУ}$, $E_{ЭМУ}$) занести в таблицу и построить характеристику холостого хода ЭМУ.

1.5.4 Для получения внешней характеристики ЭМУ при различной степени компенсации по заданию преподавателя установить определенное напряжение холостого хода ЭМУ, при котором будут производиться все дальнейшие опыты. Установить рукоятку $R_{Ш}$ в любое крайнее положение.

Для производства опыта переключателем «П» подключить сопротивление нагрузки R_H к якорю ЭМУ и для данной степени компенсации изменять ступенчато сопротивление R_H . Данные опыта ($U_{ЭМУ}$, I_H) занести в таблицу.

Аналогичные опыты следует провести для другого крайнего положения рукоятки $R_{Ш}$ и построить вторую внешнюю характеристику. Третью характеристику следует построить для полной компенсации ЭМУ.

Для дальнейших опытов по указанию преподавателей следует построить ЭМУ на недокомпенсированный режим.

1.5.5 Подготовить стенд для исследования разомкнутой системы регулирования.

- а) Установить рукоятку РНО – 1 в нулевое положение;
- б) При помощи РНО – 3 установить ток возбуждения двигателя 0,6А;
- в) Установить переключатель «П» в нулевое положение;

г) Замкнуть выключатели В1 и В2;

д) Плавно увеличивая ток возбуждения ЭМУ, запустить двигатель Д (установить напряжение, заданное преподавателем в п. 1.4.4)

Для производства опыта следует изменять нагрузку на двигатель – переключив «П» сопротивление нагрузки R_H на якорь нагрузочной машины. Изменение тока нагрузки можно производить ступенчато и плавно от значения тока холостого хода до 10А. Данные опыта (I_D , n_D) занести в таблицу. Построить скоростную характеристику разомкнутой системы. Для дальнейшего использования характеристику следует спрямить. Определить статический перепад скорости как разность скоростей и скорости при номинальном токе нагрузки двигателя $I_H=8,2A$.

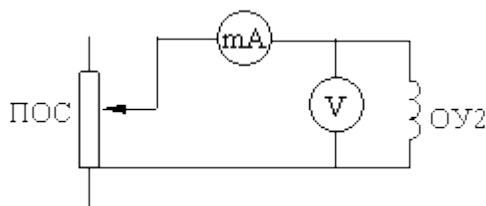
По уравнению скоростной характеристики разомкнутой системы

$$n_{раз} = \frac{U - IR}{k\Phi}$$

для заданного напряжения рассчитать 4-5 точек и построить расчетную скоростную характеристику. Определить расчетный статический перепад скоростей

Произведя сравнение статических перепадов скорости, следует сделать выводы.

8. Для Исследование замкнутой системы регулирования следует собрать схему питания обмотки жесткой отрицательной обратной связи по скорости (использовать обмотку ОУ II).



По указанию преподавателя установить рукоятку «ПОС» в положение, определяющее коэффициент передачи тахогенератора. При пуске двигателя необходимо проверить правильность подключения обмотки ОУ II и приборов, (необходимо, чтобы при помощи обмотки осуществлялась отрицательная обратная связь по скорости).

Для снятия скоростной характеристики замкнутой системы следует руководствоваться указаниями, изложенными в п.1.4.5. После построения

скоростной характеристики ее следует спрямить и определить статический перепад скорости.

Для определения расчетного статического перепада скорости необходимо во время эксперимента определить коэффициент усиления по напряжению ЭМУ $k_{эм\mu}$ и коэффициент передачи тахогенератора.

Для определения пользуемся формулой

$$\Delta n_{эм\mu} = \frac{k\Phi}{k\Phi + k_{эм\mu} \gamma} \Delta n_p$$

В заключение следует сравнить опытные и расчетные данные и сделать выводы.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ:

1. Если при замыкании В произойдет резкий бросок тока, в цепи якорей ЭМУ – Д или начнутся автоколебания, необходимо немедленно разомкнуть В и устранить причину ненормального режима.
2. При всех ненормальных режимах работы схемы необходимо немедленно отключить автомат А1 и пригласить преподавателя.

Список литературы

1. Бертинов А.И. Специальные электрические машины – М.: Энергоиздат, 1982 – 552 с.
2. Сагитов П.И., Цыба Ю.А. Электрические машины систем автоматики – Алматы: АИЭС, 2004. - 90 с.
3. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Логос, 2000. – 606с.
4. Копылов И.П. Электромеханика планеты земля. – М.: МАИ, 1998. - 260с.
5. Пиотровский Л.М. Электрические машины. – Л-д.: Энергия, 1972. – 497с.
6. Брускин Д.Е., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины – М.: Высшая школа, 1972. – 430с.

7. Гинзбург С.А., Лехтман И.Я., Малов В.С. Основы автоматики и телемеханики. – М.: Энергия, 1968. – 512с.