

Министерство образования и науки Российской Федерации  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА  
ВЕЛИКОГО

**В.В.Андрущук, С.А.Важнов, Е.Ю.Кочеткова, Т.Г.Миневич**

**КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ**

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург 2018

## Содержание

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Работа 4М. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ</b> .....	4
<b>Работа 5М. КОСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОДНОФАЗНЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ</b> .....	10
<b>Литература</b> .....	14

## Предисловие

Рассматриваемые в практикуме лабораторные работы продолжают цикл, начатый сборником «Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором». Целью лабораторных работ настоящего сборника является знакомство с функционированием коллекторного двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, а также однофазного коллекторного двигателя. Руководство предназначено для студентов, прослушавших курс лекций по теме «Электрические машины» и продолжающих изучение материала курса в лаборатории.

Пособие содержит теоретическую часть, описание используемого оборудования, план выполнения работы, указания по обработке результатов измерений и список дополнительной литературы. Пособие служит руководством для самостоятельной подготовки студентов к лабораторной работе и для оформления отчета по выполненной работе. Каждая лабораторная работа рассчитана на двухчасовое занятие бригады студентов в составе двух человек.

Рассматриваемые лабораторные работы реализованы на базе лаборатории электрических цепей кафедры «Теоретическая электротехника и электромеханика»

#### Работа 4М. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В лабораторной работе проводятся экспериментальные исследования коллекторного двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Регулировочные свойства двигателей постоянного тока определяются статическими характеристиками, к которым относятся механические характеристики  $\omega = F(M)$ .

Выражение, характеризующее механическую характеристику двигателя постоянного тока, можно получить из уравнения равновесия электродвижущих сил в цепи якоря вращающейся машины

$$U_c = E + R \cdot I + \Delta U_{щ}, \quad (1)$$

где:  $U_c$  – напряжение питающей сети,  $\Delta U_{щ}$  – падение напряжения на щетках коллекторного узла,  $R$  – сопротивление цепи якоря, которое включает кроме сопротивления якоря двигателя и добавочные сопротивления,  $E$  – ЭДС якоря.

При расчете механической характеристики перепишем уравнение (1) с учетом обозначения  $U = U_c - \Delta U_{щ}$ , в виде

$$U = E + R \cdot I. \quad (2)$$

Значение ЭДС  $E$  и электромагнитного момента машины  $M$  определяют соотношения:

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (3)$$

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I, \quad (4)$$

где:  $\omega$  – угловая скорость вращения якоря,  $\Phi$  – магнитный поток одного полюса. Коэффициенты  $C_M$  и  $C_E$  определяются конструктивными особенностями двигателя,

причем  $C_E = C_M = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a}$ ,

где:  $p$  – число пар полюсов машины,  $N$  – число активных проводников обмотки якоря,  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Уравнение (2) с учетом соотношений (3) и (4) позволяет получить механическую характеристику двигателя постоянного тока в виде:

$$\omega = \frac{U}{C_E \cdot \Phi} - \frac{R}{C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2} \cdot M. \quad (5)$$

В двигателях последовательного возбуждения (ДПВ), широко используемых в качестве тяговых двигателей, обмотка возбуждения включается последовательно с якорной обмоткой и магнитный поток является функцией тока якоря. Поэтому при увеличении нагрузки уменьшение угловой скорости  $\omega$  происходит не только за счет увеличения падения напряжения на сопротивлении якорной цепи, но и за счет увеличения магнитного потока (рис.1).

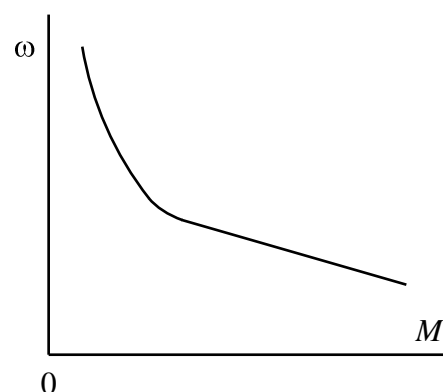


Рис. 1

Если считать магнитную систему двигателя ненасыщенной, то ее магнитный поток будет пропорционален току  $\Phi = \alpha \cdot I$ . Тогда с учетом (4), получим:

$$\Phi = \sqrt{\alpha \cdot M / C_M} . \quad (6)$$

Соотношение (5) с использованием приближенной зависимости (6) позволяет представить механическую характеристику двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением в виде

$$\omega = \frac{U}{C_E} \sqrt{\frac{C_M}{\alpha \cdot M}} - \frac{R}{C_E \cdot \alpha} \quad (7)$$

или

$$\omega = \frac{a}{\sqrt{M}} - b, \quad (8)$$

где:  $a = U \sqrt{C_E \cdot \alpha}$ ,  $b = \frac{R}{C_E \cdot \alpha}$ .

Выражение (8) представляет собой уравнение гиперболы, одной из асимптот которой является ось ординат, а другой – прямая, параллельная оси абсцисс и проходящая ниже ее на расстоянии  $b$ .

Необходимо отметить, что гиперболическая зависимость  $\omega = F(M)$  для ДПВ имеет место лишь при малых нагрузках, поскольку для работающего в номинальном режиме двигателя магнитная система является насыщенной и допущение (6) не применимо.

Для снятия механических характеристик к валу исследуемого двигателя с последовательным возбуждением ИМ подключается нагрузочная машина НМ постоянного тока (рис.2).

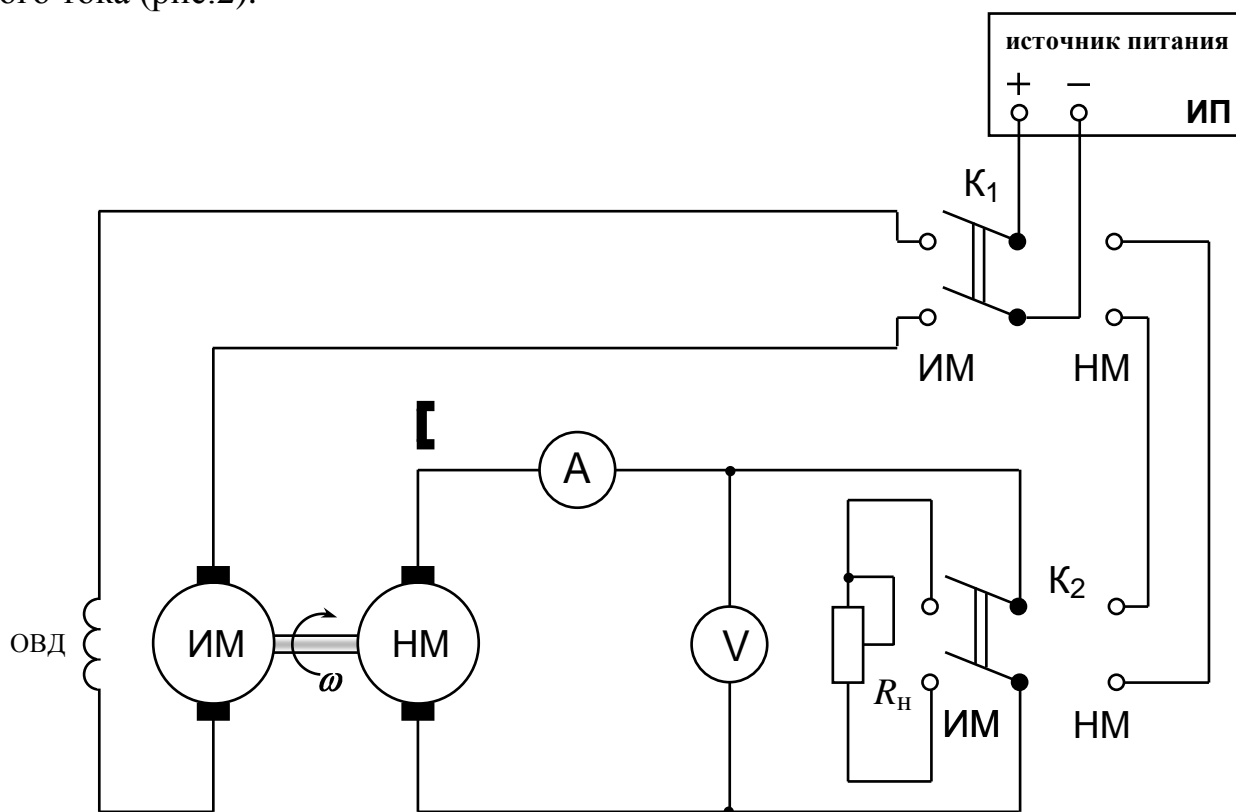


Рис. 2

Нагрузочная машина может работать в тормозном (генераторном) режиме, создавая момент нагрузки на валу исследуемого двигателя. В этом случае якорь нагрузочной машины подключается к резистору  $R_H$ . Напряжение и ток в якорной цепи нагрузочной машины измеряются с помощью вольтметра и амперметра.

При работе нагрузочной машины в двигательном режиме, якорь НМ подключается к регулируемому источнику постоянного напряжения ИП. Испытуемый двигатель ИМ в этом случае отключается от сети.

Для снятия механических характеристик ДПВ нагрузочную машину переводят в тормозной (генераторный) режим, подключив якорь НМ к нагрузочному резистору  $R_H$ . Исследуемую машину (ДПВ) подключают к регулируемому источнику постоянного напряжения ИП.

Механические характеристики ДПВ и нагрузочной машины приведены на рисунке 3.

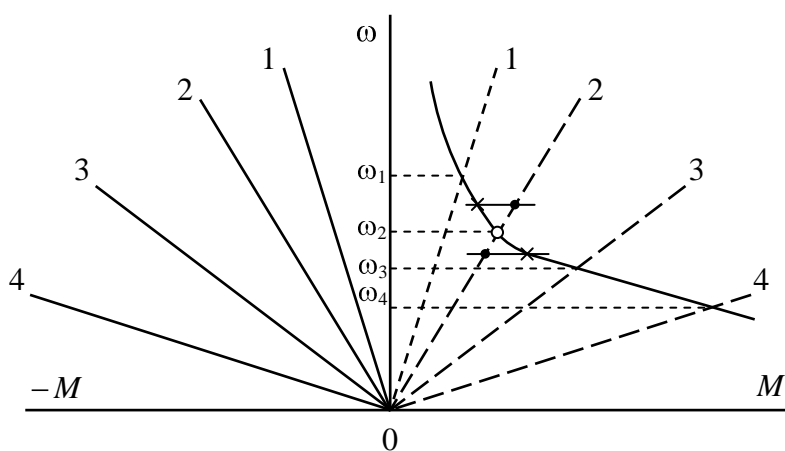


Рис. 3

Механические характеристики нагрузочной машины располагаются во втором квадранте (область отрицательного момента  $M$ ) и представляют собой семейство прямых линий 1, 2, 3, 4, исходящих из начала координат графика. Тангенс угла наклона этих линий пропорционален значению сопротивления  $R_H$ . Точки пересечения зеркального изображения механических характеристик нагрузочной машины с механической характеристикой ИМ, как следует из рисунка 2, являются точками устойчивого равновесия. Следовательно, использование нагрузочной машины в генераторном режиме позволяет снять все участки механической характеристики исследуемого двигателя.

При расчете механической характеристики ИМ необходимо учитывать потери мощности в нагрузочной машине и в двигателе последовательного возбуждения.

Потери мощности в электрической машине зависят от тока нагрузки и скорости вращения ротора. Определяемые током нагрузки составляющие потерь  $\Delta P_V$  принято называть переменными потерями. Составляющие потерь  $\Delta P_A$ , зависящие от скорости вращения, от сил трения в подшипниках, вентиляционного момента, представляют собой так называемые постоянные потери. Сюда же относят потери в магнитопроводе машины.

Переменные потери в обмотке якоря нагрузочной машины с возбуждением от постоянных магнитов определяются выражением

$$\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{д}},$$

где  $R_{\text{д}}$  – сопротивление обмотки якоря нагрузочной машины.

Потери мощности в щеточном контакте машины

$$\Delta P_{\text{щ}} \cong 2 \cdot \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}}, \quad \Delta U_{\text{щ}} = 1 \text{ В.}$$

В итоге, переменные потери в якорной цепи нагрузочной машины будут равны:

$$\Delta P_{\text{в}} = \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{я}} = 2 \cdot \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{д}}.$$

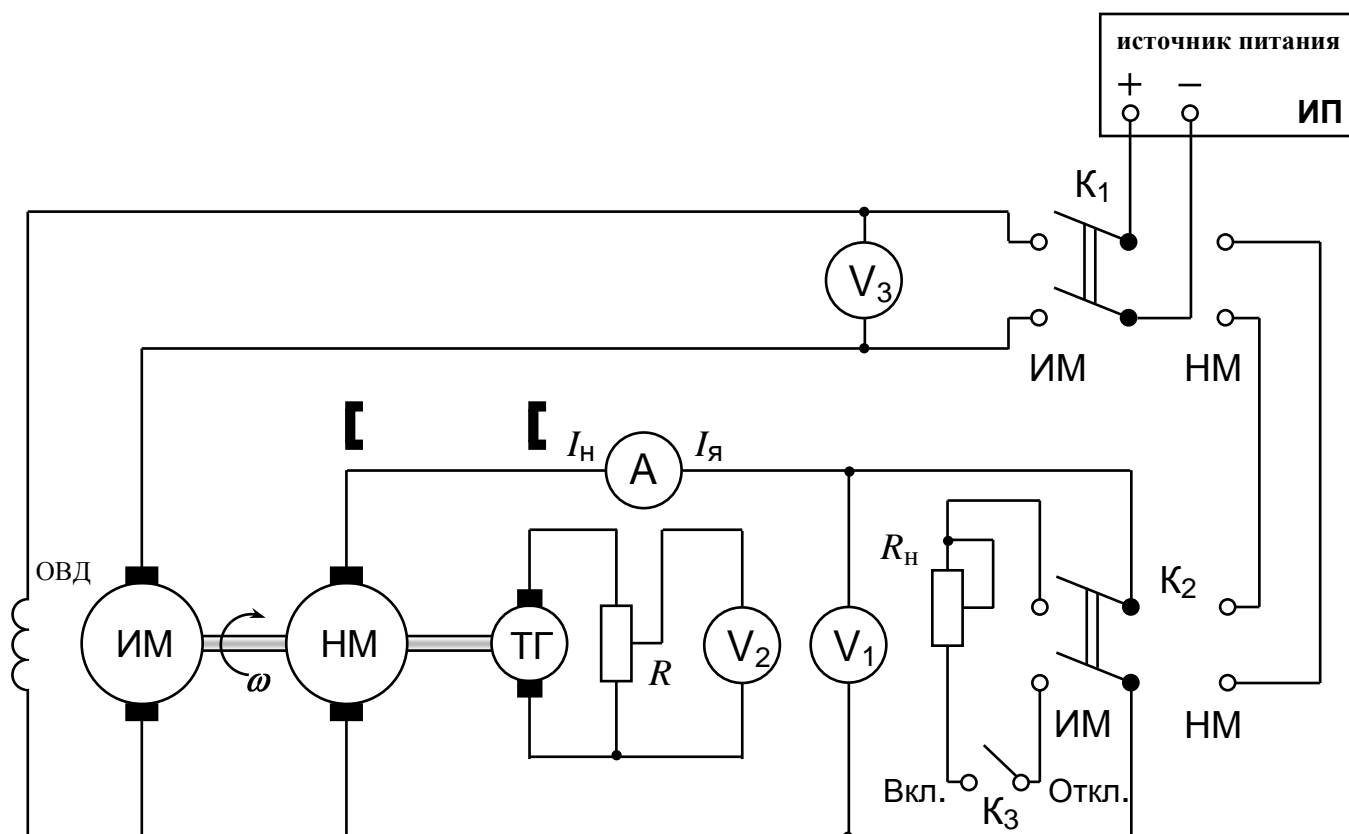
Постоянные потери в агрегате с учетом постоянных потерь в ИМ и НМ определяются экспериментально. Для этого ДВП отключают от источника питания, нагрузочную машину переключают на источник постоянного напряжения, переводя ее таким образом в двигательный режим.

Изменяя напряжения питания, необходимо добиться вращения агрегата в пределах исследуемого скоростного диапазона от  $\omega_{\text{min}}$  до  $\omega_{\text{max}}$ . При этом производятся измерения напряжения  $U_{\text{я}}$  и тока  $I_{\text{я}}$  в якорной цепи нагрузочной машины.

Постоянные потери определяются выражением:

$$P_{\text{А}} = U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} - \Delta P_{\text{в\text{я}}}, \quad \text{где } \Delta P_{\text{в\text{я}}} = 2 \cdot \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{д}}.$$

Лабораторная работа выполняется на установке, принципиальная электрическая схема которой представлена на рисунке 4.



ИМ – исследуемая машина постоянного тока с последовательным возбуждением,

НМ – нагрузочная машина постоянного тока,

ТГ – тахогенератор,

ИП – источник питания,

A,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  – измерительные приборы,

$R$  – подстроечный резистор,

$R_n$  – нагрузочный резистор,

$K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  – переключатели.

Рис. 4

### Программа выполнения работы

1. Переключатели  $K_1$  и  $K_2$  переводятся в положение ИМ, а переключатель  $K_3$  – в положение Вкл. При этом исследуемая машина ИМ подключается к источнику питания ИП. Нагрузочная машина НМ подключается к переменному резистору  $R_n$ .
2. На выходе источника питания по указанию преподавателя устанавливается напряжение в диапазоне 20 ÷ 60 В. Измерение выходного напряжения выполняется с помощью вольтметра  $V_3$ .
3. Изменяя сопротивление резистора  $R_n$ , изменяют ток в якорной цепи нагрузочной машины. Диапазон изменения тока составляет 0,1 ÷ 1,5 А. Нагрузочная машина в этом опыте работает в генераторном режиме. В таблицу 1 заносятся значения ско-



рости вращения агрегата  $n$ , измеряемые с помощью вольтметра  $V_2$ , ток нагрузки  $I_H$  и напряжение  $U_H$ , измеряемые с помощью амперметра  $A$  и вольтметра  $V_1$ .

Затем определяются угловая скорость агрегата  $\omega$ , мощность  $P_H$ , учитывающая потери в резисторе  $R_H$  и потери в якорной цепи нагрузочной машины  $\Delta P_{VH}$ .

4. Переключатели  $K_1$  и  $K_2$  переводятся в положение НМ. При этом исследуемая машина ИМ отключается от источника питания. Нагрузочная машина НМ подключается к источнику питания. Изменяя напряжение источника питания ИП, устанавливают такие же значения скорости, как и в предыдущем опыте. Нагрузочная машина при этом работает в режиме двигателя.

Проводятся измерения тока якоря  $I_я$  и напряжения якоря  $U_я$  в цепи нагрузочной машины. Полученные данные заносятся в таблицу 1 и далее рассчитывается мощность  $P_A$ , определяемая потерями на трение в подшипниках и вентиляционными потерями агрегата за вычетом потерь  $\Delta P_{Vя}$  в якорной цепи нагрузочной машины.

Полученные результаты позволяют определить механическую мощность  $P_{Мех}$  и момент  $M_H$  на валу исследуемой машины. На основании полученных выше данных рассчитывается механическая характеристика  $\omega = F(M_H)$  исследуемой машины.

5. Устанавливается новое напряжение на выходе источника питания и все указанные выше опыты повторяются.

Таблица 1

$n$	$\omega$	$I_H$	$U_H$	$\Delta P_{VH}$	$P_H$	$I_я$	$U_я$	$\Delta P_{Vя}$	$P_A$	$P_{Мех}$	$M_H$
об/мин.	рад/с	А	В	Вт	Вт	А	В	Вт	Вт	Вт	Нм

Расчетные формулы:

$$\omega = \pi n / 30;$$

$$P_H = U_H \cdot I_H + \Delta P_{VH}, \quad \Delta P_{VH} = 2 \cdot \Delta U_{щ} \cdot I_H + I_H^2 \cdot R_D;$$

где  $\Delta U_{щ} = 1$  В – падение напряжения в щеточном контакте,  $R_D = 1,55$  Ом – сопротивление обмотки якоря нагрузочной машины.

$$P_A = U_я \cdot I_я - \Delta P_{Vя}, \quad \Delta P_{Vя} = 2 \cdot \Delta U_{щ} \cdot I_я + I_я^2 \cdot R_D;$$

$$P_{Мех} = P_H + P_A;$$

$$M_H = P_{Мех} / \omega;$$

Примечание

#### Паспортные данные электрических машин

ИМ – СЛ523; 110В; 1,15 А; 3000 об/мин; 74 Вт

НМ – ДПУ200; 92 В; 7,4 А; 3000 об/мин; 1,7 Нм

ТГ – ТП80-20-0,2; 0,02 В·мин; 3000 об/мин;  $R_H \geq 10$  кОм

## **Оформление отчета**

Отчет должен содержать:

1. Описание методики экспериментального получения механических характеристик двигателя с последовательным возбуждением.
2. Описание лабораторной установки.
3. Экспериментальные механические характеристики исследуемого двигателя.
4. Графики механических характеристик исследуемого двигателя.

## Работа 5М. КОСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОДНОФАЗНЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Однофазные коллекторные двигатели переменного тока с последовательным возбуждением находят широкое применение в сервисных электроприводах малой мощности.

### Принцип действия однофазного коллекторного двигателя с последовательным возбуждением.

Однофазные коллекторные двигатели по конструктивному исполнению и схеме соединения обмоток аналогичны двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением (рис.1). С целью уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод статора двигателя набирается из изолированных листов электротехнической стали.

Магнитный поток полюсов  $\Phi(t)$  и ток ротора  $i(t)$  являются синусоидальными величинами, одновременно изменяющими свой знак. Поэтому знак вращающего момента двигателя  $M(t)$ , пропорционального произведению  $i(t) \cdot \Phi(t)$ , остается неизменным (ротор вращается в неизменном направлении), а величина момента пульсирует с удвоенной частотой.

В рассматриваемом двигателе магнитный поток и ток ротора из-за наличия потерь в стали сдвинуты по фазе на небольшой угол  $\alpha$  (рис.2). В пределах этого угла вращающий момент меняет знак, что приводит к небольшому уменьшению значения среднего момента  $M_{\text{ср}}$ . Так как ротор двигателя обладает значительной механической инерцией, то частота его вращения, определяемая средним значением вращающего момента, остается практически постоянной.

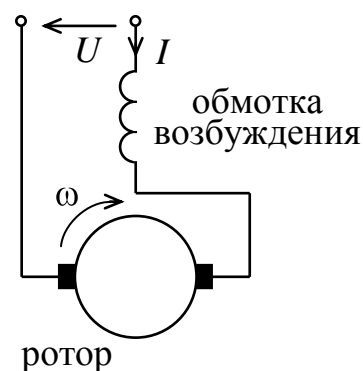


Рис.1

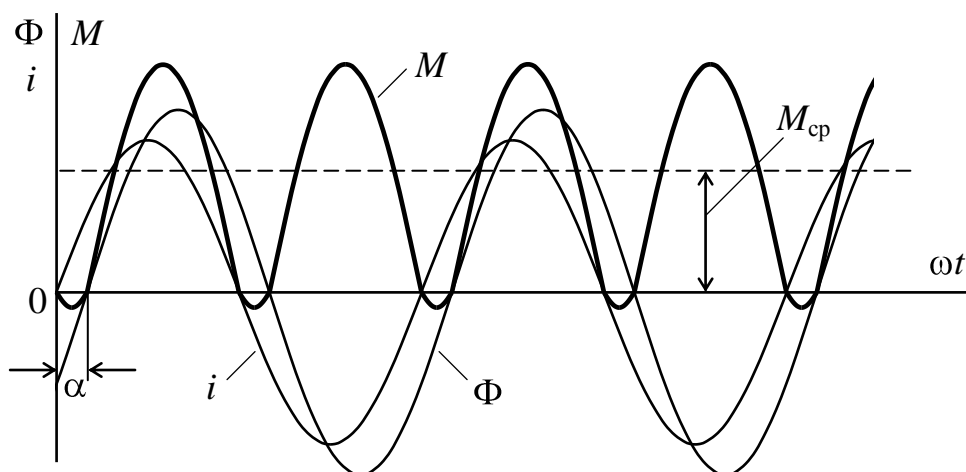


Рис.2

При параллельном включении ротора и обмотки возбуждения их токи будут сдвинуты на значительно больший угол  $\alpha$ , что приведет к существенному уменьшению значения  $M_{\text{ср}}$ . По этой причине однофазные двигатели с параллельным возбуждением не нашли практического применения.

Однофазный двигатель характеризуется активным сопротивлением  $R = R_{РОТ} + R_{ОВ}$  и реактивным сопротивлением  $X = X_{РОТ} + X_{ОВ}$ , которые определяются значениями активных и реактивных сопротивлений ротора и обмотки возбуждения.

Напряжение и ток однофазного двигателя последовательного возбуждения удовлетворяют уравнению:

$\dot{U} = \dot{E}_B + \dot{U}_R + \dot{U}_X$ , где:  $\dot{U}_R = R \cdot \dot{i}$ ,  $\dot{U}_X = X \cdot \dot{i}$  – падение напряжения на активном и реактивном сопротивлениях двигателя,  $\dot{E}_B$  представляет собой ЭДС вращения ротора, возникающая в результате вращения ротора в магнитном поле полюсов и совпадает по фазе с потоком  $\Phi$ . На рисунке 3 представлена векторная диаграмма однофазного двигателя.

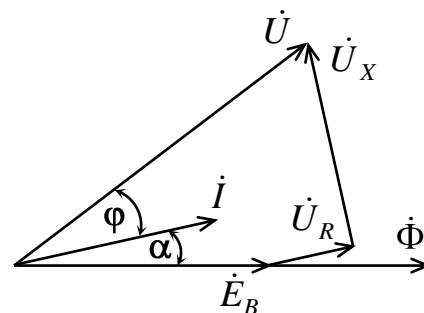


Рис.3

Механические характеристики  $\omega = f(M)$  двигателей с последовательным возбуждением переменного и постоянного тока имеют одинаковый характер: с увеличением нагрузки скорость вращения двигателей значительно уменьшается.

## Коммутация

В коммутируемых секциях обмотки ротора однофазного двигателя индуцируются три ЭДС различной природы: ЭДС вращения  $E_B$  (см. выше), реактивная ЭДС  $E_p$  и трансформаторная ЭДС  $E_T$ .

Реактивная ЭДС  $E_p$ , связанная с изменением тока в коммутируемой секции, пропорциональна частоте вращения  $\omega$ , току ротора  $i(t)$  и совпадает с ним по фазе.

Трансформаторная ЭДС  $E_T$  индуцируется вследствие изменения потока полюсов с частотой сети, пропорциональна этой частоте, потоку полюсов  $\Phi(t)$  и сдвинута по фазе относительно потока на угол  $\pi/2$ . ЭДС  $E_T$  существенно ухудшает условия коммутации рассматриваемых двигателей по сравнению с двигателями постоянного тока.

Двигатели с последовательным возбуждением небольшой мощности ( $P_H \leq 0,5$  кВт) выпускаются без добавочных полюсов и компенсационной обмотки. Для улучшения условий коммутации у таких двигателей сдвигают щетки с геометрической нейтрали против направления вращения ротора.

Однофазные коллекторные двигатели имеют такую же конструкцию и схему соединения обмоток, как двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для демонстрации конструктивных особенностей однофазного коллекторного двигателя переменного тока с последовательным возбуждением приведена на рисунке 4.

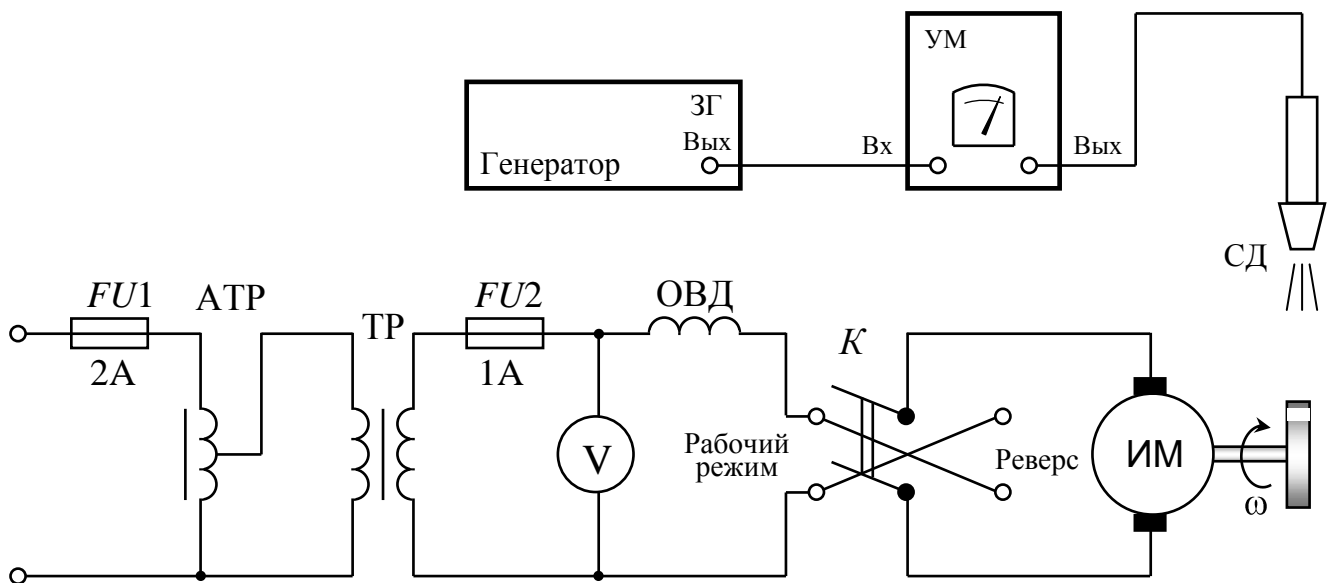


Рис.4

Установка содержит:

АТР – автотрансформатор

ТР – разделительный трансформатор

ИМ – однофазный коллекторный двигатель с последовательным возбуждением

V – вольтметр

K – переключатель для реверсирования двигателя

FU1, FU2 – предохранители

Измерение скорости вращения двигателя выполняется с помощью стробоскопа, состоящего из задающего генератора ЗГ, усилителя мощности УМ, к выходу которого подключен кабель со светодиодом СД.

### Программа выполнения работы

#### Подготовка к работе лабораторного оборудования

1. Установить ручку регулятора автотрансформатора АТР в положение «0» .
2. Включить приборы ЗГ, УМ и погреть их в течение 15 минут.
3. Установить на выходе генератора ЗГ напряжение, при котором выходной сигнал усилителя мощности УМ составит 10 В.

Убедиться в появлении световых импульсов на светодиоде СД.

**Внимание:** категорически **запрещается** направлять в глаза световой луч светодиода СД.

4. Переключатель K перевести в положение «Рабочий режим».

## **Проведение эксперимента**

1. Ручкой регулятора автотрансформатора АТР установить на двигателе напряжение в диапазоне  $100 \div 150$  В по указанию преподавателя. Зафиксировать направление вращения ротора двигателя ИМ.
2. Измерить скорость вращения ротора двигателя с помощью строботакметра. Обратить внимание на отсутствие кругового огня на коллекторе ротора двигателя, что свидетельствует о благоприятных условиях коммутации.
3. Уменьшить напряжение на двигателе, переведя ручку регулятора АТР в положение «0» .
4. Поменять местами провода источника входного напряжения и вновь установить на двигателе напряжение, заданное ранее в п.1. Убедиться в том, что направление вращения ротора не изменилось.
5. Уменьшить напряжение на двигателе до нуля. Перевести переключатель К в положение «Реверс».
6. Установить на двигателе напряжение, заданное ранее в п.1. Убедиться в том, что направление вращения ротора изменилось на противоположное. Обратить внимание на появлении на коллекторе ротора двигателя кругового огня, что свидетельствует об ухудшении условий коммутации.

## **Оформление отчета**

Отчет должен содержать:

1. Описание лабораторной установки.
2. Результаты измерения скорости вращения ротора двигателя. Отметить условия работы коллекторного узла двигателя при реверсировании направления вращения ротора.

## **Литература**

- 1.С.А.Ковчин, Ю.А. Сабинин. Теория электропривода. СПб. Энергоатомиздат, 1994.
- 2.Вольдек А.И., Попов В.В.. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов. – СПб, Питер, 2007.