

## Лабораторная работа № 4 Двигатель постоянного тока

**Цель: изучение принципа работы двигателя постоянного тока с последовательным и параллельным возбуждением и их характеристик.**

Машина постоянного тока может работать в двигательном режиме, при котором якорь машины начинает потреблять из сети ток, создаваемый разностью напряжения сети и ЭДС якоря:

$$I_a = (U - E) / r_a \quad (1)$$

где  $U$ - напряжение сети,  $E$ - ЭДС якоря.

В двигательном режиме индуцируемая в обмотке якоря ЭДС направлена против протекающего по ней тока, поэтому ее принято называть противо-ЭДС. Напряжение, приложенное к зажимам якоря двигателя должно уравновешивать противо-ЭДС и компенсировать падение напряжения на внутреннем сопротивлении цепи якоря ( $r_a$ ):

$$U = E + I_a \cdot r_a \quad (2)$$

Умножив левую и правую части уравнения (1) на ток, получим уравнение баланса мощностей цепи якоря двигателя:

$$UI_a = EI_a + I_a^2 \cdot r_a, \quad (3)$$

где  $UI_a$ -мощность, потребляемая якорем двигателя из сети,  $I_a r_a$ - мощность потерь в обмотке якоря,  $E I_a$ - электромагнитная мощность, преобразуемая в механическую мощность вращения вала двигателя.

Вращающийся момент двигателя определяется по формуле:

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I_a \quad (4)$$

Частота вращения двигателя равна:

$$n = \frac{E}{C_e \Phi} = \frac{(U - I_a r_a)}{C_e \Phi}, \quad (5)$$

где  $C_e$ - конструктивный коэффициент.

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ.** Полученное выражение (5) показывает, что частоту вращения двигателя постоянного тока можно регулировать: изменением магнитного потока  $\Phi$ , изменяя соответственно ток возбуждения; изменением питающего напряжения  $U$ ; включением добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря.

**ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ.** Если потребуется изменить направление вращения двигателя, то для этого необходимо изменить направление электромагнитного момента  $M$ , действующего на якорь. Это можно осуществить изменением направления тока в обмотке якоря  $I_a$  или путем изменения направления магнитного потока  $\Phi$  (тока возбуждения). На практике это производят путем переключения проводов, подводящих ток к обмотке якоря или к обмотке возбуждения.

**СВОЙСТВО САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ.** Для того, чтобы двигатель вращался с постоянной частотой  $n$ , развиваемый им вращающий момент  $M$  должен быть равным создаваемому нагрузкой тормозному моменту  $M_T$ :

$$M = M_T = C_m \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (6)$$

где  $C_m$  - конструктивный коэффициент.

Если равенство (6) нарушается, то частота вращения двигателя увеличивается или уменьшается до тех пор, пока снова вращающий момент двигателя не будет уравновешен тормозным моментом. Таким образом, двигатели постоянного тока обладают свойством саморегулирования, способностью при изменении нагрузки автоматически устанавливать новое значение частоты вращения, при которой двигатель работает устойчиво. Роль регулятора играет противо-ЭДС, наводимая в обмотке якоря.

Рассмотрим сущность процесса саморегулирования. Допустим, что тормозной момент, создаваемый нагрузкой, уменьшился и стал меньше вращающего момента двигателя, вследствие чего частота вращения последнего начала возрастать. С увеличением  $n$ , согласно (2), возрастает противо-ЭДС и, уменьшается ток якоря  $I_a$  и вращающий момент  $M$ . Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока вращающий момент двигателя не будет равным тормозному. Тогда рост частоты вращения прекратится. Аналогично протекает процесс при увеличении тормозного момента, когда вращающий момент двигателя становится меньше тормозного. В этом случае частота вращения двигателя начинает падать, вследствие чего уменьшается противо-ЭДС и возрастают ток якоря и вращающий момент. Этот процесс, также как при уменьшении нагрузки, прекратится, когда  $M=M_T$  и  $n=\text{const}$ .

В установившемся режиме, когда  $M=M_T$ , потребляемый якорем двигателя ток определяется моментом на валу:

$$I_a = \frac{M_T}{C_M \cdot \Phi} \quad (7)$$

Из этого выражения следует, что при  $\Phi = \text{const}$  ток, потребляемый двигателем всегда пропорционален моменту на валу.

**ПУСК ДВИГАТЕЛЯ.** В момент включения двигателя в сеть его частота вращения равна нулю, противо-ЭДС  $E = C_e n \Phi$  также равна нулю, а пусковой ток  $I_n = U/r_n$  ограничивается только сопротивлением обмотки якоря, которое у двигателя средней и большой мощности составляет десятые-сотые доли Ом. Поэтому при прямом пуске путем непосредственного включения двигателя в сеть пусковой ток был бы недопустимо большим - в 10-20 раз больше номинального. Это может вызвать поломку вала, а также сильное искрение под щетками. Поэтому при пуске двигателей постоянного тока в цепь якоря часто включают добавочный реостат (пусковой) с таким сопротивлением  $r_n$ , чтобы пусковой ток не превышал допустимого значения. Прямой пуск применяют в основном для двигателей мощностью до нескольких сотен ватт, а иногда мощностью в несколько киловатт. В машинах большой и средней мощностей допустимый пусковой ток  $I_n = (1,4-1,8) \cdot I_{\text{ном}}$ , а в машинах малой мощности  $I_n = (2-2,5) I_{\text{ном}}$ .

По мере увеличения частоты вращения двигателя в обмотке якоря возрастает противо-ЭДС, ток уменьшается, вследствие чего сопротивление пускового реостата необходимо постепенно уменьшать. При достижении двигателем номинальной частоты вращения пусковой реостат полностью выводится. Чем короче период пуска, тем меньше потери энергии в цепи якоря.

Следует иметь в виду, что чрезмерное уменьшение пускового тока может привести к тому, что двигатель вообще не сможет стронуться с места, так как пусковой момент  $M_n = C_M \cdot \Phi \cdot I_n$  не сможет преодолеть момента сопротивления на валу двигателя. Для обеспечения большего пускового момента при ограниченном пусковом токе необходимо создавать возможно больший магнитный поток, что достигается за счет увеличения тока возбуждения с помощью специального реостата, включаемого в цепь возбуждения двигателя.

Ограничение пускового тока при реостатном пуске обычно сопровождается значительными потерями энергии в пусковом реостате. Для исключения этого пуск двигателя можно осуществить при пониженном напряжении, подводимом к его обмотке

якоря от источника с регулируемым напряжением. В процессе пуска в этом случае напряжение, подводимое к якорю двигателя, плавно повышают.

**КЛАССИФИКАЦИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ.** Двигателя постоянного тока, как и генераторы, могут иметь независимое, параллельное, последовательное и смешанное возбуждение.

Двигатели с независимым возбуждением применяют тогда, когда напряжение на зажимах якоря изменяется в процессе работы или, когда напряжение якоря отличается по значению от напряжения возбуждения.

Двигатели с последовательным возбуждением получили широкое применение, так как обладают рядом ценных свойств. Двигатели со смешанным возбуждением по своим свойствам являются промежуточными между двигателями последовательного и параллельного возбуждения.

**ДВИГАТЕЛИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ,** получившие наибольшее распространение, - это, по существу, те же двигатели с независимым возбуждением, но только питание обмотки возбуждения у них производится от того же источника энергии, что и питание якоря. На рис. 1 приведена схема двигателя с параллельным возбуждением. В нем обмотка возбуждения подключена непосредственно к сети параллельно с обмоткой якоря. В цепь якоря включен пусковой реостат с сопротивлением  $r_n$ , а в цепь обмотки возбуждения - регулировочный реостат  $r_{pb}$ . Так как обмотка возбуждения питается независимо от обмотки якоря непосредственно от сети, то ток возбуждения двигателя параллельного возбуждения не зависит от тока якоря.

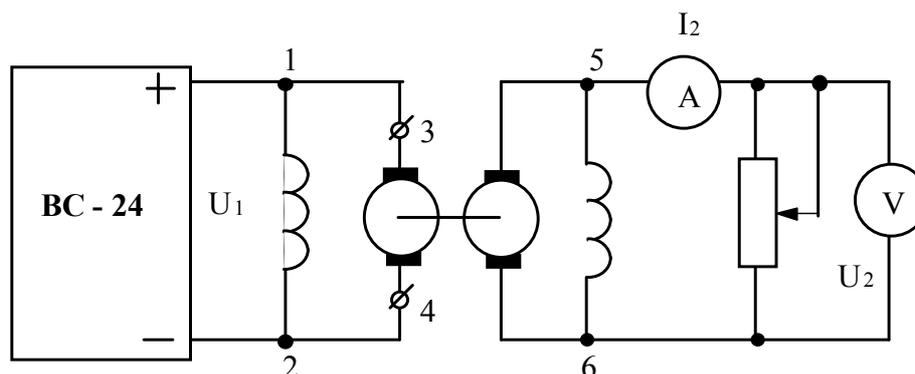


Рис. 1. Схема двигателя с параллельным возбуждением.

Если сопротивление регулировочного реостата не меняется, то ток возбуждения при напряжении сети  $U = \text{const}$  остается постоянным. Поэтому магнитный поток двигателя при изменении нагрузки также практически не меняется (немного уменьшается при увеличении нагрузки за счет усиления реакции якоря). Ток  $I$ , потребляемый двигателем из сети находится:

$$I = I_a + I_B \quad (8)$$

Обмотка возбуждения состоит из большого числа витков относительно тонкого провода и обладает значительным сопротивлением  $r_b$ , поэтому ток возбуждения  $I_b$  мал по сравнению с током якоря, составляя от него не более 3-4%.

Ток возбуждения находится по формуле:

$$I_B = \frac{U}{(r_b + r_{pb})} \quad (9)$$

Характерным свойством двигателей параллельного возбуждения является то, что при напряжении сети  $U = \text{const}$  и сопротивлении цепи возбуждения  $r_b + r_{pb} = \text{const}$  ток возбуждения  $I_B = \text{const}$  и не зависит от тока нагрузки  $I$ .

Для оценки свойств электрических двигателей широко используют различные характеристики. Наиболее распространенным режимом работы двигателей параллельного возбуждения является режим, при котором  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$ . В этом случае свойства двигателя достаточно полно описываются тремя характеристиками: моментной, скоростной и механической. Согласно (6), моментная характеристика  $M = f(I_a)$  будет линейной (рис. 2), так как магнитный поток двигателя параллельного возбуждения остается постоянным при изменении тока якоря и, следовательно, момент двигателя прямо пропорционален току якоря. Действительно, при  $\Phi = \text{const}$  момент равен:

$$M = C_H \cdot \Phi \cdot I_a = k \cdot I_a, \quad (10)$$

где  $k = C_H \cdot \Phi$ .

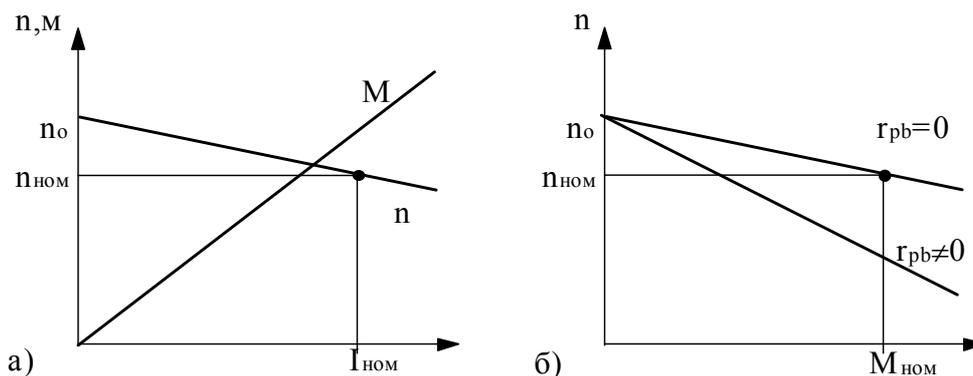


Рис.2.

Скоростной характеристикой двигателя постоянного тока называют зависимость частоты вращения двигателя от тока якоря  $n = f(I_a)$ , в механической- зависимость частоты вращения двигателя от момента  $n = f(M)$  при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$ . Согласно (5), скоростная характеристика для двигателей параллельного возбуждения будет линейной (рис. 2а). Следовательно, линейной будет механическая характеристика двигателя (рис. 2б).

Когда в цепи якоря отсутствует добавочный реостат ( $r_b = 0$ ), механическая характеристика двигателя, у которого в цепь якоря введен регулировочный реостат с сопротивлением  $r_{pb}$ , называется искусственной (рис. 2б). Естественная характеристика обычно линейна и имеет слегка падающий характер. Как и механическую, так и скоростную характеристики у двигателей параллельного возбуждения можно считать жесткими, так как при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной частоты вращения уменьшаются на 3-7%. Способность этих двигателей сохранять частоту вращения почти неизменной при изменении нагрузки широко используется на практике.

С другой стороны, частоту вращения двигателя параллельного возбуждения можно изменять в широких пределах с помощью регулировочного реостата с сопротивлением  $r_{pb}$ , позволяющего изменить ток возбуждения двигателя  $I_b$  и его магнитный поток  $\Phi$  и, как следует из (5), частоту вращения  $n$ .

Следует особо отметить, что при холостом ходе и небольшой нагрузке для двигателей параллельного возбуждения большую опасность представляет значительное уменьшение тока возбуждения и тем более обрыв цепи возбуждения, когда  $I_b = 0$ , ( $\Phi = 0$ ). В этом случае частота вращения может возрасти до опасных пределов- двигатель «идет в разнос». Кроме того, при этом ток якоря сильно возрастет, вследствие чего усиливается искрение под щетками.

Для оценки эксплуатационных свойств двигателей широко используют рабочие характеристики, представляющие собой зависимость потребляемой мощности  $P_1$ , тока якоря  $I_a$ , частоты вращения  $n$ , момента  $M$ , КПД  $\eta$  от мощности на валу  $P_2$  при  $U=\text{const}$  и  $I_b=\text{const}$  (рис. 3). Из рисунка видно, что с увеличением нагрузки частота вращения несколько уменьшается и характеристика  $n=f(P_2)$  линейна, а также то, что момент якоря растет прямо пропорционально нагрузке, т.е. характеристика  $M=f(P_2)$  тоже линейна.

Характеристики  $P_1=f(P_2)$ ,  $I_a=f(P_2)$  и  $\eta=f(P_2)$  имеют вид, характерный для любых электрических машин.

**ДВИГАТЕЛЬ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ.** На рис. 4 приведена схема двигателя последовательного возбуждения.

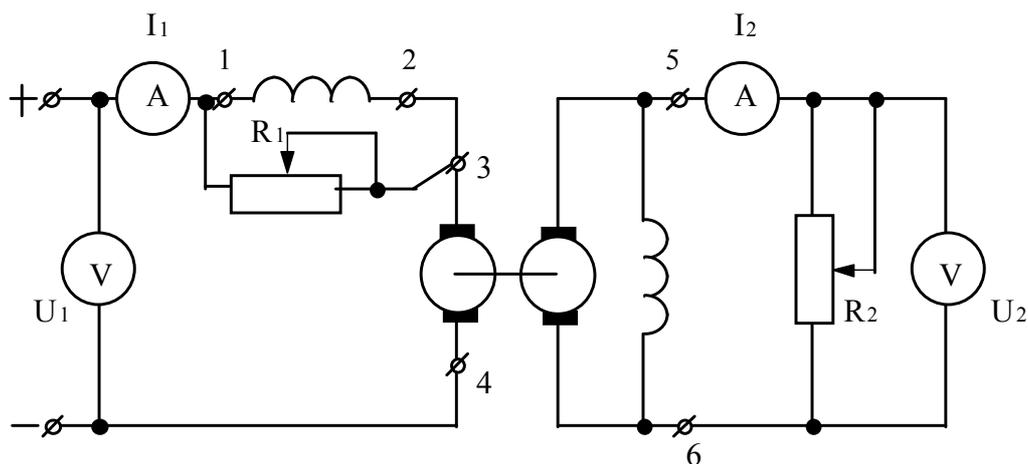


Рис. 6. Схема двигателя с последовательным возбуждением.

Обмотка возбуждения якоря и пусковой реостат  $r_n$  в этом двигателе соединяются последовательно, поэтому ток якоря является одновременно и током возбуждения. Поэтому обмотку возбуждения двигателя выполняют с малым числом витков из провода большего сечения, чем в двигателе параллельного возбуждения. При холостом ходе и малых нагрузках, когда потребляемый двигателем ток небольшой, ЭДС обмотки и магнитный поток  $\Phi$  двигателя так же невелики. Так как частота вращения двигателя обратно пропорциональна значению магнитного потока, то при холостом ходе и малых нагрузках она в несколько раз превышает номинальную, представляя опасность для целостности двигателя. Поэтому эти двигатели нельзя запускать в холостую или при небольшой нагрузке (менее 20-25% от номинальной), т.е. нельзя применять для привода механизмы работающие в холостую или при небольшой нагрузке. Исключение составляют двигатели малой мощности (десятки ватт), которые могут быть использованы для привода механизмов, у которых возможен холостой ход. Так как частота вращения двигателя равна:

$$n = [U - I_a \cdot (r_a + r_n)] / (C_e \cdot \Phi) \quad (11)$$

то ее можно регулировать как посредством изменения  $\Phi$ , так и путем изменения  $U$ . В первом случае для регулирования изменяют магнитный поток путем шунтирования обмотки возбуждения регулировочным реостатом. При этом часть тока ответвляется через реостат, включенный параллельно обмотке возбуждения, это позволяет изменять ток в обмотке возбуждения и устанавливать требуемую частоту вращения.

Частоту вращения за счет изменения напряжения на зажимах якоря регулируют, включая последовательно с якорем реостат, на котором падает часть напряжения сети, вследствие чего частота вращения двигателя уменьшается. Этот способ регулирования неэкономичен из-за больших потерь энергии в реостате.

Характерной особенностью двигателей последовательного возбуждения является резкое уменьшение частоты вращения при увеличении нагрузки. При ненасыщенной магнитной системе машины, когда  $I_a < (0,8-0,9) \cdot I_n$  скоростная характеристика двигателя  $n=f(I_a)$  имеет вид гиперболы (рис. 5). При больших нагрузках, когда наблюдается насыщение магнитной системы машины ( $I_a > I_n$ ), скоростная характеристика становится линейной.

Моментная характеристика двигателя  $M=f(I_a)$  при ненасыщенной магнитной системе машины имеет вид параболы (рис. 5), так как  $\Phi=C_\Phi \cdot I_a$  и электромагнитный момент имеет вид:

$$M=C_M \cdot \Phi \cdot I_a=C_M \cdot C_\Phi \cdot I_a=K \cdot I_a, \quad (12)$$

где  $K$ - постоянная.

Таким образом, при ненасыщенной магнитной системе машины электромагнитный момент измеряется пропорционально квадрату тока якоря.

В то же время значительное увеличение нагрузки на валу двигателя сопровождается сравнительно небольшим ростом тока якоря. Это свойство двигателя последовательного возбуждения особенно ценно тогда, когда требуется большой вращающий момент, значительно превышающий номинальный, например, при пуске двигателя в трамваях, электровозах и т.д.

Механические характеристики двигателя  $n=f(M)$  являются мягкими и имеют гиперболический вид (рис. 6). Подставляя значение тока из (12) в (11), получим выражение, определяющее механическую характеристику двигателя при  $I_a < (0,8-0,9) \cdot I_n$ :

$$n = \frac{U}{C_e \cdot C_\Phi \cdot \sqrt{M/(C_M \cdot C_\Phi)}} - \frac{r_a + r_n}{C_e \cdot C_\Phi} \quad (13)$$

При насыщении магнитной системы двигателя ( $I_a > I_n$ ) зависимость  $n=f(M)$  становится линейной. Изменяя сопротивление реостата  $r_n$ , включенного последовательно с якорем, кроме естественной характеристики 1 можно получить семейство реостатных характеристик 2 и 3 (рис. 6).

На рис. 7 приведены рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения. Характеристики  $M=f(P_2)$  и  $n=f(P_2)$  нелинейные, а характеристики  $I_a=f(P_2)$ ,  $P_1=f(P_2)$  и  $n=f(P_2)$  имеют вид, аналогичный подобным зависимостям для двигателя параллельного возбуждения. На рис. 7 начальные участки рабочих характеристик, изображенные штриховыми линиями, соответствуют работе двигателя при малой нагрузке, когда частота вращения при малой нагрузке становится недопустимо большой.

## ОБОРУДОВАНИЕ

### Двигатель постоянного тока с генератором на стенде



### Источник питания



## Амперметр

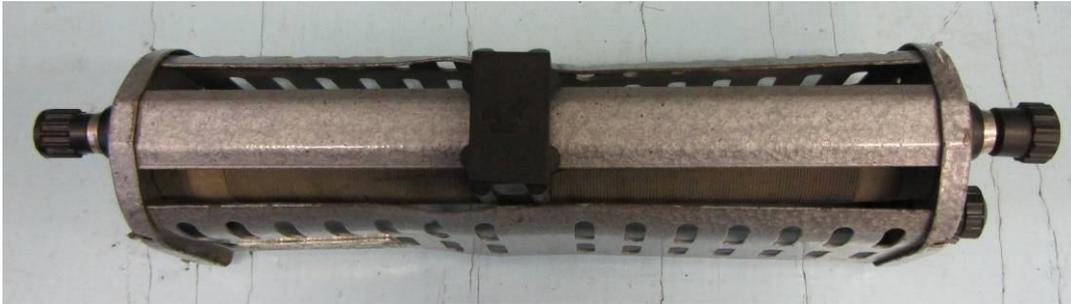


## Тахометр

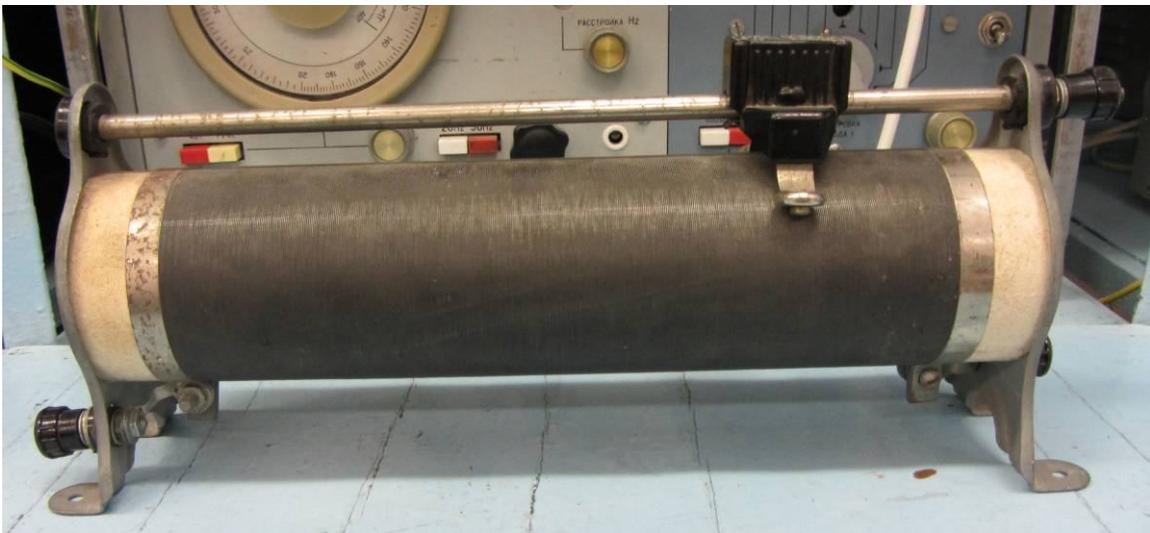


## Реостаты

Этот используется как шунт (10 Ом)



Этот как нагрузка генератора (10кОм)



Мультиметр – используется как вольтметр



## Соединительные провода



## ХОД РАБОТЫ

В данной работе используется электрический способ создания тормозного момента на валу двигателя постоянного тока (рис. 1). Для этого на одном валу с двигателем установлен генератор постоянного тока с параллельным возбуждением, к которому может быть подключена электрическая нагрузка (реостат). Для измерения числа оборотов (об/сек) используется цифровой тахометр ЦАТ-3, датчик которого расположен рядом с двигателем.

1. Собрать схему с параллельным возбуждением (рис. 2), включив параллельно обмотки якоря и возбуждения (клеммы 1 и 3 к "+" источника, а клеммы 2 и 4 к "-" источника). В качестве источника тока используется выпрямитель В-24. К выходным клеммам 5 и 6 подключается нагрузка (реостат 10кОм) с амперметром и вольтметром на 250 В.
2. Снять и построить рабочие характеристики  $P_1, M, n, I_1, n=f(P_2)$  двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением при  $U_1=5В$  и  $U_1=10В$  (крутящий момент  $M$  на валу двигателя рассчитывается из соотношения  $P_2=M*n$ , где  $P_2$ - механическая мощность двигателя (равная эл. мощности генератора определяемой по формуле  $P_2=I_2*U_2$ , где  $U_2$  и  $I_2$ - напряжение и ток в цепи).
- 3.

Таблица 1.

№	$U_{1,0} =$ В					$U_{1,0} =$ В				
	$n, c^{-1}$	$U_1, В$	$I_1, мА$	$U_2, В$	$I_2, мА$	$n, c^{-1}$	$U_1, В$	$I_1, мА$	$U_2, В$	$I_2, мА$
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										
6.										
7.										
8.										
9.										
10.										
11.										
12.										
13.										
14.										
15.										

4. Собрать схему с последовательным возбуждением, включив последовательно клеммам 2 и 3 обмотку якоря и обмотку возбуждения, к электродвигателю подключить (к клеммам 1 и 4) источник питания В-24 (амперметр и вольтметр входят в состав источника питания), параллельно обмотке возбуждения включить реостат 10 Ом. К выходным клеммам генератора 5 и 6 подключается нагрузка (реостат 10 кОм с амперметром и вольтметром).

Таблица 2.

№	$U_{1,0} =$ В				$U_{1,0} =$ В					
	$n, \text{с}^{-1}$	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{мА}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{мА}$	$n, \text{с}^{-1}$	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{мА}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{мА}$
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										
6.										
7.										
8.										
9.										
10.										
11.										
12.										
13.										
14.										
15.										