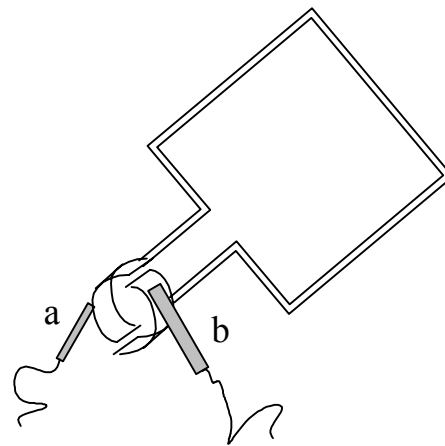


## Исследование электродвигателя

### I. Что такое электродвигатель?

Качественно, это устройство, переводящее электрическую энергию механическую. Устройство, совершающее обратное преобразование называется генератором или динамо-машиной. Поэтому, в данном разделе сначала будет дано краткое описание генераторов, от которых, в дальнейшем будет легко перейти в электродвигателям.

Итак, генераторы представляют собой машины, служащие для получения токов путем использования явления электромагнитной индукции. Простейшим генератором является рамка, образованная одним витком провода, вращающаяся в поле постоянного магнита. На практике пользуются, конечно, не одной рамкой, а значительным числом витков, намотанных на барабан (ротор). В технике также употребляются машины с неподвижными обмотками и электромагнитами вместо постоянных магнитов.

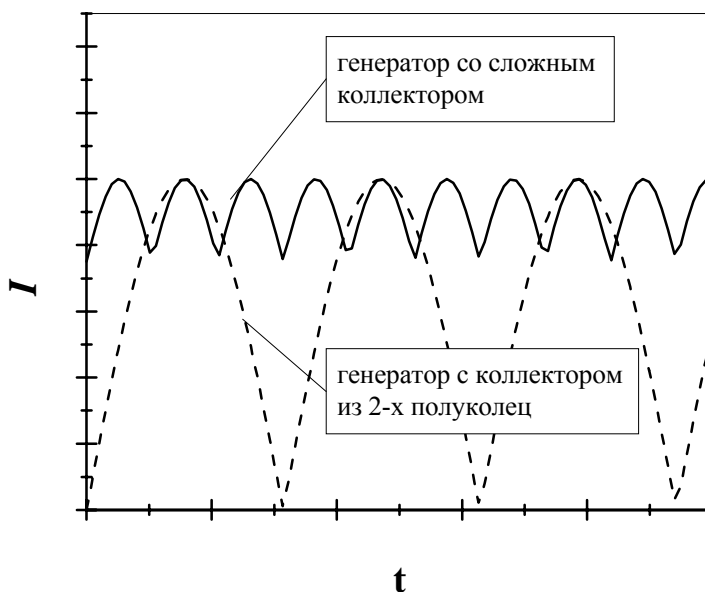


**Рис. 1. Схема коллекторного генератора постоянного тока.**

Наряду с указанными генераторами переменного тока возможно построение *генераторов постоянного тока*. Если концы вращающейся рамки

соединить с двумя изолированными друг от друга полукольцами (коллектором) (рис. 1), то щетки *a* и *b* будут попеременно касаться то одного, то другого полукольца, и во внешней цепи потечет ток все время в одном направлении, лишь меняющий свою силу. На рис. 2 показана зависимость такого тока *I* от времени. Употребляя вместо одной рамки систему обмоток, концы которых присоеди-

**Рис. 2 Зависимость тока от времени**



нены к отдельным секциям сложного коллектора, можно получить постоянный ток, сила которого будет лишь слегка пульсировать со временем (см. рис. 2). Магнитное поле во всех сколько-нибудь значительных генераторах постоянного тока создается электромагнитом, причем обычно используется так называемый принцип самовозбуждения, сводящийся к тому, что электромагнит питается током, возбуждаемым в самом генераторе.

Всякий генератор постоянного тока можно превратить в электродвигатель: для этого надо пустить в ротор через щетки ток от постороннего источника. Тогда под влиянием сил взаимодействия между токами, текущими по обмоткам ротора и магнитным полем ротор придет во вращение (в случае электродвигателя пользуются термином “якорь” вместо “ротор”).

Практически действующий электромотор был впервые осуществлен Б.С. Якоби в России и применен для приведения в движение лодки на Неве. Современные генераторы и электродвигатели представляют собой машины с весьма высоким кпд, достигающих для больших машин значения  $\eta=95\%$ . Неизбежные потери на трение, ленц-джоулево тепло, токи Фуко и гистерезис удается снизить до 5%.

## II. Основные характеристики электродвигателя

На контур (виток) площадью  $S$  с током  $I$ , находящийся в магнитном поле с индукцией  $B$  действует вращающий момент

$$M = I \cdot \frac{d\Phi}{d\varphi} = -IBS \cdot \sin(\varphi) \quad (1)$$

где  $\varphi$  - угол между нормалью к  $S$  и направлением магнитного поля,  $\Phi = BS \cdot \cos(\varphi)$  - магнитный поток через площадку  $S$ . Знак минус показывает, что момент  $M$  стремится повернуть виток в направлении уменьшения угла  $\varphi$ . Для той секции обмотки якоря, по которой в данный момент течет ток,  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  и поэтому вращающий момент, действующий на якорь электромотора, будет равен (по абсолютной величине)

$$M_{\text{я}} = I_{\text{я}} B \cdot S \cdot n \quad (2)$$

где  $n$  - число витков в каждой секции, а  $I_{\text{я}}$  - ток в обмотке якоря.

При неподвижном якоре ток в его обмотке равен  $I_{\text{я}} = \frac{V}{R_{\text{я}}}$

где  $V$  - приложенное напряжение (эдс внешнего источника), а  $R_{\text{я}}$  - омическое сопротивление обмотки.

Когда якорь начинает вращаться, в его обмотке индуцируется доба-

вочная эдс, равная

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = B \cdot n \cdot S \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -B \cdot n \cdot S \cdot \omega \quad (3)$$

где  $\omega$  - угловая скорость вращения якоря, направление которой совпадает с направлением момента (якорь смещается в сторону уменьшения угла  $\varphi$ ).

При наличии эдс индукции ток в якоре будет определяться суммой эдс внешнего источника  $V$  и эдс индукции  $\varepsilon$ :

$$I_{\text{я}} = \frac{V + \varepsilon}{R_{\text{я}}} = \frac{V - B \cdot n \cdot S \cdot \omega}{R_{\text{я}}} \quad (4)$$

(убедитесь самостоятельно, что формула (4) удовлетворяет правилу Ленца).

Сопротивление якоря делают обычно небольшим, чтобы уменьшить вредные потери на джоулево тепло в его обмотке. Поэтому в обычном режиме работы мотора  $I_{\text{я}} R_{\text{я}} \ll V$ , и ток в обмотке мал по сравнению с током при неподвижном якоре. В момент пуска мотора, пока якорь еще не набрал полной скорости вращения, ток якоря бывает очень большим; благодаря этому оказывается большим пусковой момент якоря, и якорь раскручивается очень быстро. Но с другой стороны большая величина пускового тока может быть опасной для обмотки якоря и для коллектора; поэтому у мощных моторов обычно применяют специальные пусковые реостаты, которые ограничивают пусковой ток и выводятся, когда якорь набрал достаточную скорость вращения.

Поскольку ток нормально вращающегося якоря невелик, из (4) следует приближенно:

$$\omega \cong \frac{V}{B \cdot n \cdot S} \quad (5)$$

То есть скорость вращения при постоянном внешнем напряжении и постоянной магнитном поле (шунтовой мотор) почти не зависит от механической нагрузки; якорь раскручивается до тех пор, пока эдс индукции не уравновесит приложенного напряжения. Разумеется, это справедливо только для не слишком больших нагрузок. Из (5) видно, что скорость вращения можно регулировать, изменяя либо напряжение на якоре, либо магнитное поле (т.е. ток в индукторе). Обратите внимание, что скорость вращения увеличивается при уменьшении тока в обмотке индуктора. Вращающий момент якоря найдем подстановкой (4) в (2):

$$M_{\text{я}} = \frac{V - B \cdot S \cdot n \cdot \omega}{R_{\text{я}}} \cdot B \cdot S \cdot n \quad (6)$$

Как уже говорилось, он максимален при пуске мотора и убывает с увеличением скорости вращения. Если бы скорость достигла предельной величины (5), то ток якоря и вращающий момент обратились бы в нуль; якорь вращался бы по инерции, не совершая работы. На практике эти условия недостижимы, так как даже в ненагруженном моторе (при холостом хо-

де) имеются силы трения в подшипниках. Поэтому максимальная скорость вращения будет несколько меньшей, а именно - такой, чтобы обеспечить вращающий момент  $M_{я}$ , равный моменту сил трения  $M_{тр}$

$$\omega_{\max} = \frac{V}{B \cdot n \cdot S} - \frac{M_{тр} R_{я}}{(B \cdot n \cdot S)^2} \quad (7)$$

При подключении полезной нагрузки скорость еще уменьшится, так чтобы развить полезный момент:

$$M = M_{я} - M_{тр} = \frac{V - B \cdot S \cdot n \cdot \omega}{R_{я}} \cdot B \cdot S \cdot n - M_{тр} \quad (8)$$

Полезная мощность будет равна:

$$W_{\text{полезн}} = MW = \left( \frac{V - B \cdot S \cdot n \cdot \omega}{R_{я}} \cdot B \cdot S \cdot n - M_{тр} \right) \cdot \omega \quad (9)$$

Зависимость полезной мощности от скорости вращения имеет параболический характер.  $W_{\text{полезн}}$  обращается в нуль при неподвижном якоре ( $W=0$ ) и при максимальной скорости. Выражение (7) достигает максимума при  $\omega = \frac{1}{2} \omega_{\max}$  (докажите самостоятельно; подсчитайте также величину максимальной полезной мощности, причем величиной  $M_{тр}$  при этом подсчете можно пренебречь).

Коэффициент полезного действия мотора  $\eta$  определяется как отношение полезной мощности  $W_{\text{полезн}}$  к полной мощности, потребляемой мотором  $W_{\text{полн}}$ . Последняя складывается из мощности, потребляемой ротором -  $VI_{я}$  и мощности, потребляемой индуктором -  $VI_{\text{инд}}$ . Обычно,  $R_{\text{инд}} \gg R_{я}$ , так что при не очень малых нагрузках потери на джоулево тепло в индукторе меньше, чем джоулевы потери в якоре. Потерями на трение в подшипниках нормально нагруженного мотора также можно пренебречь.

Отсюда кпд приближенно равен:

$$\eta = \frac{M_{я} \omega}{J_{я} V} = \frac{B \cdot n \cdot S \cdot \omega}{V} = \frac{\varepsilon}{V}. \quad (10)$$

Он пропорционален скорости вращения. В точке максимума полезной мощности  $\eta=50\%$ , а при  $\omega = \omega_{\max}$  кпд должен достигнуть 100%. В действительности, при малых нагрузках (больших скоростях вращения) уже нельзя пренебрегать потерями в подшипниках и в обмотках индуктора, так что  $\eta$  вновь начинает уменьшаться, обращаясь в нуль вместе с полезной мощностью.

Максимум  $\eta$  достигается при частоте, лежащей между  $\omega_{\max}$  и частотой максимума полезной мощности. В качестве номинальной мощности и номинальной скорости вращения обычно указывают значения этих величин при нагрузке, соответствующей максимальному кпд. При этом отдаваемая

мотором мощность меньше максимально возможной, но скорость вращения не очень отличается от максимальной. Высказанное выше утверждение о слабой зависимости скорости вращения от нагрузки справедливо для мощностей, не превосходящих номинальную мощность мотора.

Поскольку мощность, потребляемая индуктором, практически не зависит от нагрузки мотора, полезно определить коэффициент полезного действия одного только якоря (без учета потерь в индукторе). В данной работе вы будете вычислять как кпд якоря  $\eta_{я}$  так и полный кпд мотора.

### III. Цель работы и экспериментальная установка.

Цель работы - определить основные параметры мотора и исследовать зависимость полезной мощности и кпд электромотора при постоянном  $V$  от нагрузки и при постоянной нагрузке от напряжения на обмотке якоря. Для этого собирается схема рис.3.

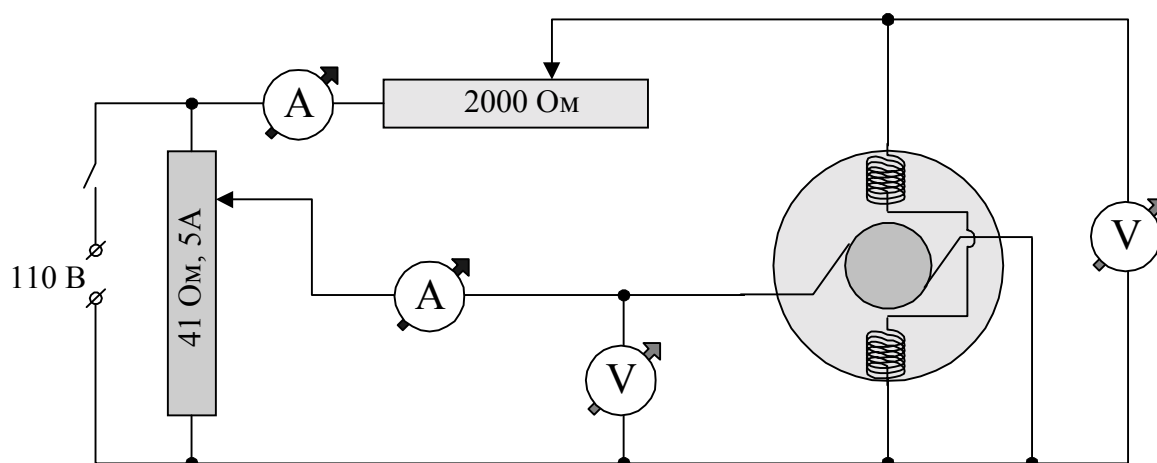


Рис. 3 Схема установки

Предельный ток обмотки ротора - 0,7 А. Превышать этот ток не разрешается - обмотка может сгореть. Номинальное напряжение на индукторе - 110 В.

Для создания полезной внешней нагрузки на ось мотора насажена втулка (см.рис.4) со стрелкой указателем. Втулка поджимается к оси мотора винтами D так, чтобы она поворачивалась около оси с трением. На нижний конец стрелки подвешивается груз. Меняя силу, с которой мы поджимаем винтами втулку, можно менять внешнюю нагрузку.

При вращении мотора ось поворачивает стрелку на угол  $\alpha$  относительно вертикали, причем этот угол тем больше, чем сильнее зажата втулка. Когда устанавливается постоянная скорость вращения мотора, вра-

щающий момент якоря будет компенсироваться моментом сил трения во втулке. Этот момент легко вычислить, зная угол  $\alpha$ :

$$M = P \cdot \sin(\alpha) \cdot r,$$

где  $P$  - вес груза, а  $r$  - расстояние от точки подвеса груза до оси вращения. Чтобы получить достаточную точность при измерении момента, следует брать небольшой груз, такой, чтобы угол был близок к  $90^\circ$ .

Для измерения угла отклонения стрелки на моторе укреплен шкала, разделенная на градусы.

Скорость вращения мотора измеряется тахометром. Помните: тахометр очень хрупкий прибор, и обращаться с ним надо с максимальной осторожностью!

Тахометр измеряет скорость вращения в об/мин и имеет 6 диапазонов:

1	7500-30000
2	2500-10000
3	750-3000
4	250-1000
5	75-300
6	25-100

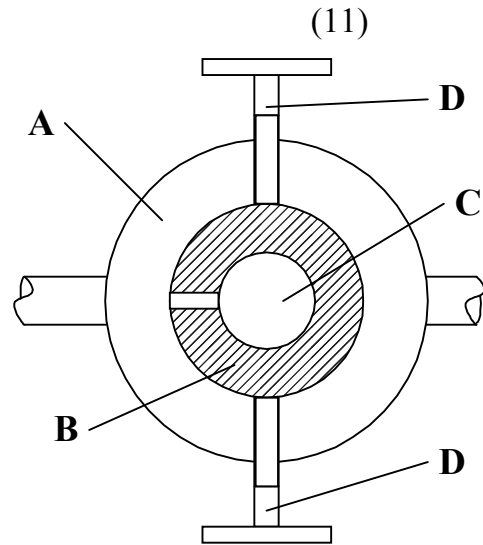
Соответственно прибор имеет две шкалы: внешнюю от 75 до 300 делений (для 1-го, 3-го и 5-го диапазонов) и внутреннюю от 25 до 100 делений (для диапазонов 2,4 и 6).

#### Порядок работы с тахометром

Поставить указатель диапазонов на первый диапазон (7500-30000), надеть на вал тахометра наконечник **С** и, держа тахометр в горизонтальном положении, (контролировать по уровню **А**) прижать наконечник к валу электромотора **В** (см. рис. 5).

Если стрелка отклонится, взять отсчет по шкале; в противном случае отнять тахометр от вала мотора, поставить указатель на второй диапазон (2500-10000) и повторить измерение; если стрелка **Е** не отклоняется, опять перейти к следующему диапазону. пока стрелка не отклонится. Начинать нужно всегда с первого диапазона (7500-30000), и брать диапазоны последовательно, в порядке убывания (2,5,4,5,6). Если мотор вращается с большей скоростью, чем верхний предел диапазона, тахометр выходит из строя!

После каждого измерения указатель поставить на первый диапазон. Измерение проводить быстро - не дольше 20 сек; оставлять тахометр вклю-



- А - корпус втулки
- В - текстолитовый вкладыш
- С - вал мотора
- Д - винты

**Рис. 4 Втулка**

ченным (прижатым к валу мотора) более чем на 20 сек запрещается!

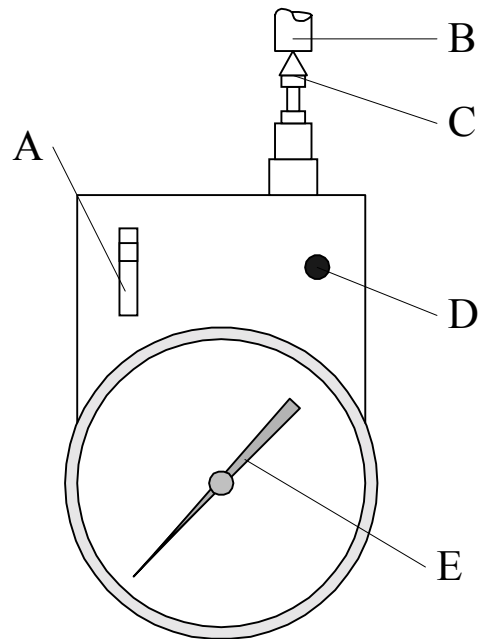
Переключение диапазонов: для этого прибор взять в правую руку и большим пальцем нажать кнопку **D**.

Левой рукой осторожно вращать вал тахометра, одновременно слегка нажимая на него вдоль оси вала, до тех пор, пока не произойдет зацепления зубчатых колес и указатель не переместится до нужного диапазона. После этого отпустить кнопку, и указатель останется на установленном диапазоне.

В нашей работе число оборотов мотора нужно измерять, начиная с 300 об/мин, так что пользоваться диапазонами 5 и 6 не нужно, и устанавливать указатель на них запрещается.

Для того, чтобы после измерения поставить указатель снова на первый диапазон, нужно придерживая вал **B** левой рукой, нажать кнопку и после этого осторожно вращать вал, пока шестеренки не освободятся от зацепления, и тогда перевести указатель на первый диапазон. Если нажать кнопку и не придерживать вал тахометра рукой, сломаются шестеренки и тахометр выйдет из строя!

Перед измерением скорости вращения мотора нужно получить специальное разрешение преподавателя.



**Рис. 5 Тахометр**

#### **IV. Порядок выполнения работы**

После проверки схемы прежде всего нужно убедиться, что мотор вращается против часовой стрелки. Во время включения винты втулки не должны быть зажаты и она должна свободно вращаться на оси. Если вращение правильно, следует установить напряжение на обмотке индуктора, равное 110 В и записать величину тока. Это значение тока индуктора следует поддерживать постоянным в течение всей работы.

Если мотор вращается по часовой стрелке, поменять полюса.

При измерении скорости вращения мотора тахометром приходится приводить во вращение механизм тахометра, что создает дополнительную

нагрузку на мотор и вызывает изменение тока в обмотке якоря. Поэтому приходится отсчет по амперметру снимать одновременно с отсчетом по тахометру. Следует придерживаться такого порядка измерений:

- сначала установить, какой диапазон является рабочим (см. порядок работы с тахометром),
- затем прижать тахометр к валу мотора, снять отсчет по его шкале и запомнить его,
- не отнимая тахометра от вала мотора, быстро перевести взгляд на шкалу амперметра и запомнить отсчет по амперметру,
- отнять тахометр от мотора и после этого записать оба отсчета.

Помните: держать тахометр прижатым к валу мотора больше 20 сек ни в коем случае нельзя; если по какой-либо причине вы не успеете снять отсчет по шкале амперметра, отнимите тахометр от мотора, подождите 1-2 минуты и повторите измерение.

### 1. Определение величины $B \cdot n \cdot S$

Исследуйте зависимость вращающего момента  $M$  от тока якоря  $I_{\text{я}}$  для неподвижного якоря. Втулку нудно крепко зажать, так чтобы ось мотора в ней не проворачивалась, и повесить на крючок груз. Установите движок потенциометра в среднее положение и включите ток. Мотор вращаться не будет, но повернет стрелку на некоторый угол  $\alpha$ , который можно измерить по шкале. Измерения необходимо проводить для токов от 0 до 0,7 ампера.

Из графика зависимости  $M$  от  $I_{\text{я}}$  можно определить  $B \cdot n \cdot S$  - это будет тангенс угла наклона прямой. Кроме того, при этих измерениях необходимо отмечать напряжение на якоре для каждого тока; так как  $V = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$ , то можно отсюда определить  $R_{\text{я}}$ .

Точно так же надо найти  $R_{\text{инд}}$  и убедиться, что условие выполняется.

### 2. Исследование режима холостого хода.

Винты на втулке отпускаются и мотор вращается свободно. При этом вращающий момент якоря компенсируется моментом сил трения.

$$M_{\text{тр}} = \frac{V - B \cdot n \cdot S \cdot \omega}{R_{\text{я}}} B \cdot n \cdot S$$

Исследуйте зависимость скорости вращения  $\omega$  от напряжения на якоре  $V$ . Как видно из формулы (7), по угловому коэффициенту и начальной ординате прямой  $V(\omega)$  можно еще раз найти  $B \cdot n \cdot S$  и определить  $M_{\text{тр}}$ .

### 3. Исследование зависимости скорости вращения от тока индуктора

Эти измерения нужно проводить при номинальной напряжении на

якорю (110 В, а если не будет получаться, то снизить напряжение до 90 В) и либо при холостом ходе ( $M=0$ ), либо при каком-либо постоянном значении нагрузки, при котором ток якоря не превосходит 0,7 А. Пределы изменения тока индуктора ограничиваются величиной реостата; не следует в течение длительного времени подавать на индуктор напряжение, превышающее 110 В. Результаты измерений привести в виде графика.

#### 4. Исследование работы мотора при постоянной нагрузке ( $M = const$ )

Подберите такую нагрузку, чтобы ток в якоре был 0,2 - 0,4 А и в дальнейшем поддерживайте нагрузку постоянной. Выбранная в таких условиях величина нагрузки (момента) будет оптимальной для выполнения задания.

Изменяя напряжение на обмотке якоря, регулируйте скорость вращения мотора и измеряйте величины  $\omega$ ,  $V$  и  $I_{я}$ . По этим данным необходимо построить графики зависимости тока  $I_{я}$ , напряжения  $V$ , полезной и полной  $W_{полн}$  мощности и кпд  $\eta$  от скорости вращения  $\omega$ .

#### 5. Исследование работы мотора при постоянном напряжении

а. Исследовать зависимость  $I$ ,  $M$ ,  $W_{полн}$ , коэффициентов полезного действия якоря  $\eta_{я}$  и мотора в целом  $\eta$  от скорости вращения якоря  $\omega$ .

Чтобы можно было изменять  $\omega$  в широких пределах, следует взять напряжение ниже номинального (60-80 В); скорость вращения регулируется изменением момента  $M$ , измеряются  $M$ ,  $\omega$  и  $I_{я}$ . Пределы измерения ограничиваются условием, что ток якоря не должен превосходить 0,7 А. Все результаты приводятся на одном графике.

б. Исследовать зависимость  $\omega$ ,  $I_{я}$ ,  $W_{полн}$ ,  $\eta_{я}$  и  $\eta$  от нагрузки  $M$  при номинальном напряжении (110 В). Момент следует постепенно увеличивать, пока ток не достигнет предельного значения 0,7 А. Все результаты привести на одном графике.

Сравните форму всех полученных кривых с теоретическими зависимостями. По данным измерений в режиме холостого хода вычислите значения  $\omega$ ,  $I_{я}$ ,  $W_{полн}$ ,  $\eta_{я}$  и  $\eta$  для номинального режима ( $V = 110$  В,  $I_{я} = 0,70$  А) или для какого-либо другого режима по заданию преподавателя и сравните с экспериментом; (приведите теоретические точки на графике).