

17/8/16

Одобрено кафедрой  
«Электротехника»

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОД.  
ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
И ТРАНСФОРМАТОРЫ**

Руководство к лабораторным работам  
для студентов III курса

специальностей

210700. АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ (АТС)

101800. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ  
ДОРОГ (ЭНС)

для студентов IV курса специальностей

181400. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭПС)

150700. ЛОКОМОТИВЫ (Т)

150800. ВАГОНЫ (В)



Москва – 2003

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Составитель: канд. техн. наук, доцент В.В. ШУ-  
МЕЙКО

Рецензент: канд. техн. наук, доцент В.Е. НОВИ-  
КОВ

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

Изучить конструктивные особенности двигателя и принцип его работы. Научиться практически определять рабочие характеристики и уметь регулировать частоту вращения двигателя и объяснять характеристики, полученные в ходе лабораторной работы.

### 2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Двигатели постоянного тока в основном используются в приводах, требующих регулирования частоты вращения в широком диапазоне. Существенным недостатком двигателей постоянного тока является наличие коллекторно-щеточного устройства, которое снижает надежность двигателя. В зависимости от способа включения обмоток возбуждения и якоря различают следующие типы двигателей постоянного тока:

двигатели параллельного возбуждения;  
двигатели последовательного возбуждения;  
двигатели смешанного возбуждения.

Из уравнения для цепи якоря  $U - I_a R_a = E_a$  получим

$$\text{выражение для тока якоря } I_a = \frac{U - E_a}{R_a}, \quad (1)$$

где  $U$  – подведенное напряжение;  $R_a$  – сопротивление цепи якоря;  $E_a$  – ЭДС якоря.

ЭДС якоря можно определить по формуле

$$E_a = C_e n \Phi, \quad (2)$$

где  $n$  – частота вращения якоря в об/мин,  $\Phi$  – магнитный поток якоря;  $C_e$  – постоянная машины.

$$C_e = \frac{pN}{60a},$$

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

При пуске двигателя, когда частота вращения  $n=0$ , ЭДС якоря тоже равна нулю. Так как сопротивление цепи якоря мало, то для уменьшения величины пускового тока, в цепь якоря двигателя включают пусковой реостат, сопротивление которого должно быть таким, чтобы пусковой ток двигателя  $I_{II}$  был не более  $(1,5 - 2,0) \cdot I_{II}$ .

По мере нарастания частоты вращения двигателя ЭДС якоря увеличивается, а ток якоря уменьшается. Поэтому сопротивление пускового реостата следует постепенно уменьшать, чтобы в конце пуска он был полностью выведен ( $R_{II} = 0$ ).

При пуске двигателя постоянного тока параллельного возбуждения для создания максимального момента на валу необходимо, чтобы регулировочный реостат в цепи параллельной обмотки возбуждения был выведен полностью.

Приемы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока можно получить, анализируя формулу

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_o)}{C_e \Phi}, \quad (3)$$

где  $R_o$  — добавочное сопротивление.

Регулировать частоту вращения можно следующими способами:

- изменением напряжения, подводимого к двигателю;
- изменением сопротивления цепи якоря;
- изменением магнитного потока.

Для двигателя с параллельным возбуждением первый способ возможен только при наличии автономного источни-

ка питания, допускающего регулирование напряжения, например, отдельного генератора.

Второй способ регулирования частоты вращения предусматривает введение добавочного сопротивления  $R_o$  последовательно в цепь якоря (см. рис. 4). При этом увеличивается падение напряжения  $I_a R_o$ , а подводимое к якорю напряжение уменьшается, вследствие чего частота вращения двигателя уменьшается.

При третьем способе регулирования в цепь обмотки возбуждения включают регулировочный реостат, увеличивая сопротивление которого, уменьшают ток возбуждения, а следовательно, и поток  $\Phi$ , частота вращения при этом будет увеличиваться. Этот способ является экономичным, так как потери в реостате невелики.

Изменение направления вращения двигателя может быть осуществлено путем изменения направления тока либо в обмотке возбуждения, либо в обмотке якоря. Одновременное изменение направления тока и в обмотке якоря, и в обмотке возбуждения, не дает изменения направления вращения якоря двигателя.

В результате взаимодействия токов в проводах обмотки якоря с магнитным полем в воздушном зазоре возникает электромагнитный момент

$$M = C \Phi I_a, \quad (4)$$

где  $C = 9,55 C_e$ .

При установившихся режимах работы ( $n = \text{const}$ ) электромагнитный момент уравновешивает статический момент сопротивления на валу

$$M = M_c; \quad (5)$$

$$M_c = M_o + M_2,$$

где  $M_o$  — момент, обусловленный механическими и магнитными потерями двигателя;  $M_2$  — полезный момент нагрузки.

В переходных процессах движение якоря двигателя описывается уравнением Даламбера

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M - M_c, \quad (6)$$

где  $\Omega = \frac{\pi n}{30}$  — угловая частота вращения якоря;  $J$  — момент инерции двигателя и связанных с ним вращающихся частей приводного механизма.

Когда  $M > M_c$ ,  $d\Omega/dt > 0$ , угловая скорость (и частота вращения) увеличивается, а для  $M < M_c$  — частота вращения уменьшается.

При увеличении нагрузки на двигатель увеличивается тормозной момент на его валу, что приводит к снижению частоты вращения, и как следствие, к уменьшению ЭДС якоря и к увеличению тока якоря согласно выражения (1).

Увеличение тока якоря, приводит к увеличению момента согласно выражению (4). Ток якоря будет возрастать до такого значения, при котором момент двигателя станет равным сумме полезного тормозного момента  $M_2$  и момента холостого хода  $M_0$  (5).

Эксплуатационные свойства двигателя определяются его рабочими характеристиками, под которыми понимают зависимости подводимой (потребляемой) мощности  $P_1$ , частоты вращения  $n$ , тока  $I_a$  и коэффициента полезного действия  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  при  $U = \text{const}$  и  $R = \text{const}$  (рис. 1).

Для выяснения вида зависимости  $n = f(P_2)$ , которая называется скоростной характеристикой, обратимся к формуле (3).

Так как напряжение  $U$  и ток возбуждения  $I_b$  остаются по величине постоянными, то на частоту вращения двигателя будут оказывать влияние падение напряжения в обмотке якоря  $I_a R_a$  и реакция якоря.

С увеличением тока якоря  $I_a$  увеличивается падение

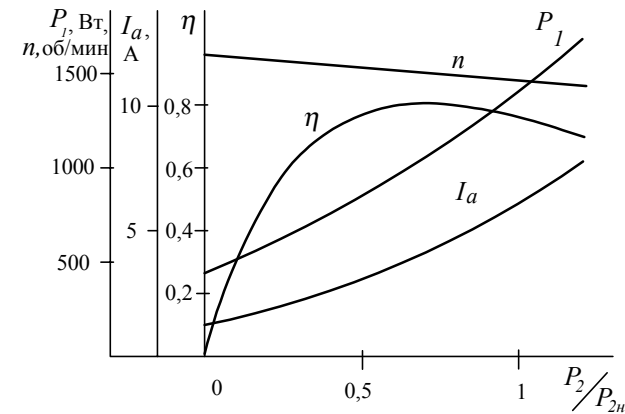


Рис. 1. Примерный вид рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения мощностью  $\approx 1$  кВт

напряжения в обмотке якоря, частота вращения двигателя при этом будет уменьшаться, но одновременно увеличивается размагничивающее действие реакции якоря, вследствие чего магнитный поток будет уменьшаться, а частота вращения двигателя — увеличиваться.

В машинах нормального исполнения большее влияние оказывает падение напряжения в обмотке якоря, поэтому частота вращения двигателя при увеличении нагрузки незначительно уменьшается, т.е. получается «жесткая» скоростная характеристика.

Зависимость  $M_2 = f(P_2)$  при  $U = \text{const}$  и  $P_b = \text{const}$  называется моментной характеристикой двигателя постоянного тока. При холостом ходе  $M_2 = 0$  формула (4)

$$M = M_0 = C I_{a0} \Phi.$$

Если бы при увеличении нагрузки двигателя магнитный поток оставался постоянным, то моментная характеристика  $M_2 = f(P_2)$  представляла бы собой прямую линию. В действительности же магнитный поток  $\Phi$  при увеличении мощности  $P_2$  несколько уменьшается в результате размаг-

ничивания действия реакции якоря. Поэтому момент двигателя растет медленнее, чем мощность  $P_2$ .

Коэффициент полезного действия двигателя постоянного тока определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}. \quad (7)$$

При изменении режима работы двигателя меняется подводимая мощность  $P_1$  и мощность потерь энергии  $\sum p$ , поэтому меняется и КПД.

При холостом ходе, когда  $P_2 = 0$ ,  $\eta = 0$ . При увеличении нагрузки КПД сначала быстро увеличивается до максимального значения, а затем начинает уменьшаться.

Коэффициент полезного действия двигателя достигает максимального значения  $\eta_{\max}$  при такой нагрузке, когда постоянные потери равны переменным потерям

$$P_0 + P_g = I_a^2 R_a,$$

где  $P_0 + P_g$  — постоянные потери мощности в двигателе (потери на холостой ход и возбуждение двигателя);  $I_a^2 R_a$  — переменные потери мощности.

Кривая КПД имеет типичный вид:  $\eta$  быстро растет при увеличении нагрузки до  $I_a = 0,25$ , достигает при  $I_a = (0,5 \div 0,75) \cdot I_n$  значения, близкого к наибольшему, а затем в пределах изменения нагрузки от  $I_a = (0,5 \div 0,75) \cdot I_n$  до  $I_a = I_n$  медленно убывает.

КПД двигателей малой мощности составляет 0,75 – 0,85, а двигателей средней и большей мощности 0,85 – 0,91.

Механическая характеристика двигателя постоянного тока представляет собой зависимость  $n = f(M_2)$  при  $U = \text{const}$ ,  $R_g = \text{const}$  и  $R_a = \text{const}$  (рис. 2).

Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет собой почти прямую линию, наклоненную к оси абсцисс. Угол наклона ее тем больше,

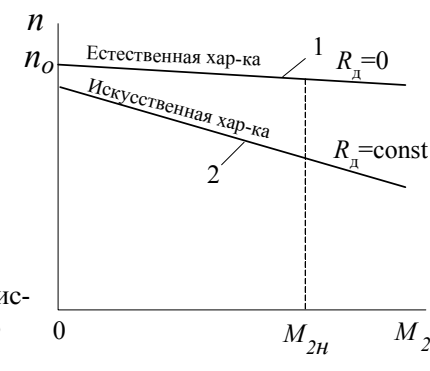


Рис. 2. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

чем больше величина сопротивления, включенного в цепь якоря.

При введении в цепь якоря добавочного сопротивления часть напряжения теряется на этом сопротивлении, поэтому и мощность, подводимая к двигателю, снижается, что приводит, при неизменном моменте на валу двигателя, к снижению частоты вращения.

Характеристика двигателя, снятая при отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря, называется естественной (кривая 1).

Характеристика двигателя, снятая с добавочным сопротивлением в цепи якоря  $R_g = \text{const}$ , называется искусственной (кривая 2). Регулировочная характеристика  $I_g = f(I_a)$  при  $U = \text{const}$  и  $n = \text{const}$  (рис. 3) показывает, каким образом необходимо менять величину тока возбуждения  $I_g$ , а следовательно, и магнитный поток  $\Phi$ , с тем, чтобы при увеличении нагрузки частота вращения двигателя оставалась постоянной.

### 3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

При исследовании двигателя необходимо снять и построить:

1. Рабочие характеристики:

$P_1, I_a, n, \eta = f(P_2)$ , при  $U = \text{const}$  и  $R_g = \text{const}$ .

2. Механические характеристики:

а) естественную:

$$n = f(M_2) \text{ при } U = const; R_g = const \text{ и } R_0 = 0;$$

б) искусственную:

$$n = f(M_2) \text{ при } U = const, R_g = const \text{ и } (R_a + R_0) = const.$$

3. Регулировочную характеристику:

$$I_g = f(I_a) \text{ при } U = const \text{ и } n = const.$$

Оформить отчет по работе.

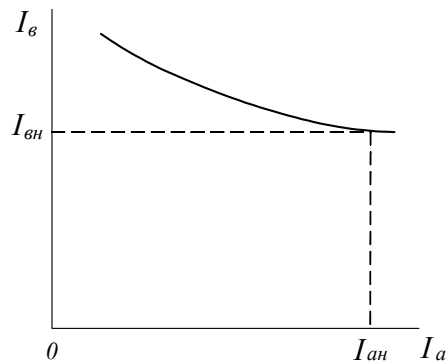


Рис. 3. Регулировочная характеристика двигателя параллельного возбуждения

#### 4. Порядок выполнения работы.

1. **Ознакомиться с особенностями конструкции испытуемой машины.** Записать данные с заводского щитка машины, число главных и добавочных полюсов, форму исполнения машины, способ охлаждения.

2. **Собрать схему двигателя и нагрузочного генератора (рис. 4) или ознакомиться и проверить собранную схему.**

3. **После проверки правильности сборки схемы преподавателем осуществляется пуск двигателя.** Для этого, убедившись в том, что пусковой реостат в цепи якоря введен, а регулировочный реостат в цепи возбуждения полностью выведен, включить автомат и, медленно, поворачивая рукоятку пускового реостата, постепенно вывести его сопротивление до нуля.

#### 4. Снять и построить рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения:

$$P_1, I_a, n, \eta = f(P_2), \text{ при } U = const \text{ и } R_g = const.$$

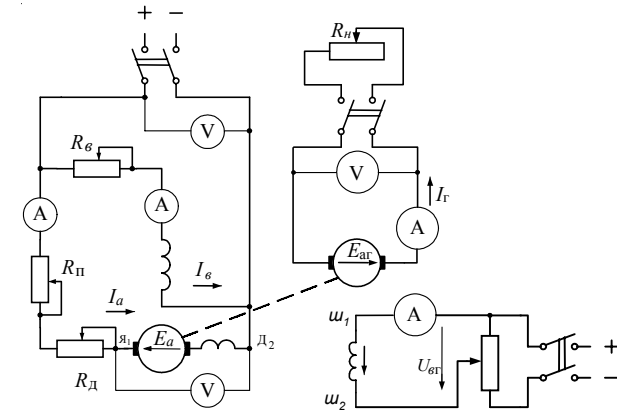


Рис. 4. Схема испытания двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

При снятии характеристик ток двигателя изменять от тока холостого хода до номинального тока двигателя через  $0,2I_H$ . Данные измерений и расчетов записать в табл. 1.

Таблица 1

Измерено						Вычислено				
для двигателя				для генератора						
$U$	$I_a$	$I_g$	$n$	$U_g$	$I_{ar}$	$P_1$	$P_r$	$\eta$	$P_2$	$M_2$
В	А	А	об/мин	В	А	Вт	Вт	—	Вт	Н·м

В случае, если испытуемый двигатель тормозится генератором той же мощности, что и двигатель, то расчет величин в табл.1 производится по следующим формулам:

а) мощность, подведенная к двигателю

$$P_1 = U(I_a + I_B);$$

б) мощность, отдаваемая генератором

$$P_G = U_G I_{aG};$$

в) полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = U_G I_{aG} + I_{aG}^2 R_{aG} + (P_{мех} + P_{см}).$$

Значения  $P_{мех} + P_{см}$  при  $n = n_H$  указаны на стенде, они определены в опыте холостого хода, при котором двигатель и генератор возбуждались одинаковым током возбуждения, т.е.  $I_{вдв} = I_{вГ} = I_{вдвн}$ . При этом замерялась мощность, потребляемая двигателем из сети  $UI_{адво}$ , затрачиваемая на покрытие потерь холостого хода двух машин. Таким образом, сумма механических и магнитных потерь каждой из двух машин получается равной

$$P_{мех} + P_{см} = \frac{UI_{адво} - I_{адво}^2 R_a}{2},$$

где  $I_{адво}$  — ток двигателя, потребляемый из сети при вращении возбужденного генератора на холостом ходу;  $R_a$  — суммарное сопротивление цепи якоря машины (указывается на стенде для двигателя и генератора или замеряется методом амперметра и вольтметра);

г) КПД двигателя % :  $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100;$

д) полезный момент на валу двигателя  $M_2 = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n}$ .

**5. Снять и построить в одних осях координат естественную и искусственную механические характеристики двигателя:**

а) естественная механическая характеристика двигателя  $n = f(M_2)$  при  $U = \text{const}$ ,  $R_a = \text{const}$  и  $R_o = 0$  строится по данным, определенным в п.4;

б) для снятия искусственной механической характеристики  $n = f(M_2)$  при  $U = \text{const}$ ,  $R_a = \text{const}$  и  $(R_a + R_o) = \text{const}$ , необходимо в цепь якоря двигателя ввести добавочный реостат  $R_o$ .

Нагружая двигатель от холостого хода через  $0,2I_n$  до номинального тока, записать показания приборов в табл. 1.

Определение величин  $P_p$ ,  $P_G$ ,  $P_2$  и  $M_2$  производится по формулам, приведенным в п. 4.

**6. Снять и построить регулировочную характеристику двигателя**

$$I_B = f(I_a) \text{ при } U = \text{const} \text{ и } R_d = 0.$$

Для снятия опытных данных этой характеристики двигатель пускают без нагрузки и полностью выводят пусковой и регулировочный реостаты. Это будет первая точка характеристики. Затем двигатель нагружают от  $M_2 = 0$  до  $M_2 = M_{2H}$  и регулируют ток возбуждения таким образом, чтобы частота вращения двигателя оставалась постоянной, установленной при  $M_2 = 0$ , но не более  $n_{MAX} \approx 1,2n_H$ . Данные измерений записать в табл. 2

Таблица 2

$U$	$I_a$	$I_e$	$n$
В	А	А	об/мин

### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.

По результатам опытов и расчетов необходимо составить отчет установленной формы, в котором:

1. Привести паспортные данные двигателя и генератора, участвовавших в опытах.

2. Представить электрическую схему опытов и необходимые расчетные формулы.

3. Привести таблицы опытных и расчетных данных по всем пунктам работы.

4. Построить рабочие, механические и регулировочную характеристики.

5. Сделать выводы по выполненной работе.

**6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.**

1. Как можно изменить направление вращения двигателя?

2. Как определяется полезная мощность двигателя?

3. Какие характеристики называют рабочими? Порядок их определения и построения.

4. Какая зависимость называется механической характеристикой двигателя? Ее вид для исследуемого двигателя.

5. Как определяется КПД двигателя в данной работе?

6. Порядок снятия регулировочной характеристики.

7. Как по паспортным данным найти полезный номинальный момент двигателя  $M_2$ ?

8. Как можно регулировать частоту вращения двигателя?

9. Что произойдет с двигателем при обрыве цепи возбуждения в процессе его работы?

10. Какое влияние оказывает сопротивление  $R_d$  на механическую характеристику двигателя?

11. При каком положении реостатов следует пускать двигатель?

12. Почему во время пуска по мере разгона двигателя уменьшается ток якоря?

13. Почему с ростом момента нагрузки уменьшается частота вращения двигателя?

14. Почему механическая характеристика двигателя является «жесткой»?

15. Как влияет напряжение сети на частоту вращения двигателя?

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

**1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.**

Ознакомиться с конструкцией испытуемого двигателя и принципом его работы. Научиться практически определять рабочие, механические и регулировочные характеристики двигателя, а также объяснять эти характеристики. Уяснить способы регулирования скорости.

**2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ.**

Общие вопросы, относящиеся к машинам постоянного тока, изложены в одноименном разделе лабораторной работы № 4. В настоящем разделе отмечаются только некоторые специфические особенности, свойственные двигателю последовательного возбуждения.

Эксплуатационные свойства двигателя определяются его рабочими характеристиками, под которыми понимают следующие зависимости:

$$P_p, I, n, \eta, M_2 = f(P_2) \text{ при } U = \text{const}.$$

На рис. 5 показан примерный вид этих характеристик, причем полезная мощность дана в относительных единицах, т.е.  $P_2^* = P_2 / P_{2н}$ ,

где  $P_{2н}$  — номинальная мощность двигателя

Рассмотрим эти характеристики.

А. Токовая характеристика

$$I = f(P_2) \text{ при } U = \text{const}.$$

У двигателя последовательного возбуждения ток якоря равен току возбуждения, т.е.  $I_a = I_o = I$ , следовательно,



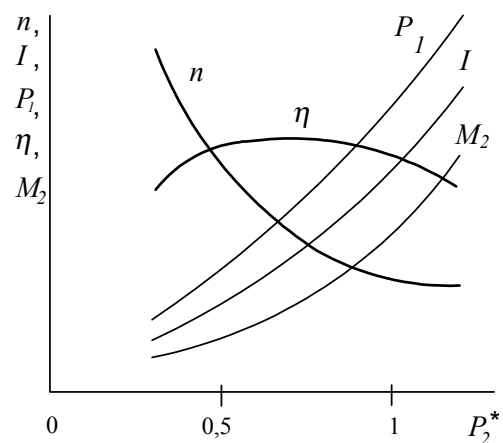


Рис. 5. Примерный вид рабочих характеристик двигателя последовательного возбуждения

магнитный поток  $\Phi$  изменяется при изменении нагрузки. Это первая характерная особенность этого двигателя.

Б. Скоростная характеристика  $n = f(P_2)$  при  $U = \text{const}$ .

Частота вращения двигателя определяется по формуле (3). Пока сталь магнитопровода машины не насыщена, поток  $\Phi$  изменяется пропорционально току возбуждения  $I_B$ . В этом случае, согласно (3), скоростная характеристика является гиперболической. При увеличении нагрузки, по мере насыщения магнитной цепи, характеристика приобретает более прямолинейный характер.

Необходимо обратить особое внимание на то, что при значительном уменьшении нагрузки и тем более при полном ее сбросе двигатель резко увеличивает частоту вращения (идет «в разнос»). Поэтому двигатель последовательного возбуждения нужно использовать для привода механизмов, которые позволяют создать некоторую нагрузку при пуске и не требуют разгрузки до холостого хода при работе.

Второй особенностью двигателя последовательного возбуждения является резко выраженная зависимость частоты вращения от нагрузки. При увеличении нагрузки ча-

стота вращения резко уменьшается. Такая скоростная характеристика двигателя называется «мягкой».

В. Моментная характеристика

$$M_2 = f(P_2) \text{ при } U = \text{const}.$$

Электромагнитный момент  $M$  двигателя определяется по формуле (2). При незначительном насыщении стали  $\Phi \equiv I$  и  $M = cI^2$ , т.е. моментная характеристика двигателя последовательного возбуждения представляет собой параболу.

По мере увеличения тока якоря наступает насыщение магнитной системы двигателя и увеличение электромагнитного момента замедляется. При большом насыщении стали, когда магнитный поток мало увеличивается, момент двигателя становится почти пропорциональным току якоря.

Двигатели последовательного возбуждения развивают большой начальный пусковой момент и имеют «мягкую» механическую характеристику. Благодаря этим особенностям, двигатели последовательного возбуждения получили широкое применение в качестве тяговых двигателей на электроподвижном составе и в качестве приводных двигателей в подъемных механизмах.

Г. КПД двигателя  $\eta = f(P_2)$  при  $U = \text{const}$ .

Характер зависимости КПД от нагрузки такой же, как у двигателя с параллельным возбуждением (см. работу № 4).

Механические характеристики двигателя представляют зависимости:

а)  $n = f(M_2)$  при  $U = \text{const}$  и  $(R_a + R_d) = \text{const}$ ;

б)  $n = f(M_2)$  при  $U = \text{const}$  и  $R_{\text{ш}} = \text{const}$ ,  $R_d = 0$ .

На рис. 6 изображены механические и токовые характеристики двигателя последовательного возбуждения. Кривая, снятая при  $R_d = 0$ , называется естественной механической характеристикой. Угол наклона механической

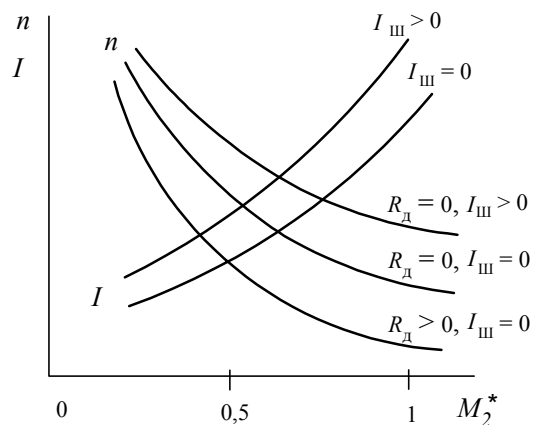


Рис. 6. Механические и токовые характеристики двигателя последовательного возбуждения

характеристики зависит от величины добавочного сопротивления  $R_d$ , включенного в цепь якоря. При одном и том же моменте на валу двигателя, чем больше будет добавочное сопротивление, тем меньше будет частота вращения двигателя.

При шунтировании обмотки возбуждения двигателя уменьшается поток  $\Phi$ , а ток  $I$  увеличивается. Для достаточно насыщенного двигателя ток якоря увеличится в большей степени, чем поток  $\Phi$ , поэтому момент согласно формуле (2) увеличится. Последнее, при том же самом моменте сопротивления вращению, приведет к увеличению частоты вращения двигателя, для этого случая искусственные механическая и токовая характеристики расположатся выше своих естественных характеристик.

Механические характеристики при введении добавочного сопротивления в цепь якоря располагаются ниже естественной. Объяснение этому дано в предыдущей лабораторной работе № 4.

Токовые характеристики при введении добавочного сопротивления практически совпадают с естественной

( $I_{ш} = 0$ ), так как для одинаковых моментов согласно формуле (2) должны быть одинаковые токи.

Регулировочные характеристики двигателя представляют зависимости:

а)  $n = f(U_d)$  при  $U = \text{const}$  и  $M_2 = \text{const}$ ;

б)  $n = f(I_B)$  при  $U = \text{const}$  и  $M_2 = \text{const}$ .

Первая характеристика дает возможность судить о том, как будет изменяться частота вращения двигателя при изменении напряжения на зажимах якоря и постоянной величине полезного момента на валу двигателя.

Вторая характеристика показывает, как изменится частота вращения двигателя при изменении тока возбуждения и  $M_2 = \text{const}$ .

Известны три способа регулирования частоты вращения двигателя изменением магнитного потока:

- 1) шунтирование обмотки возбуждения;
- 2) секционирование обмотки возбуждения;
- 3) шунтирование обмотки якоря.

В данной лабораторной работе применяется способ регулирования частоты вращения двигателя путем шунтирования обмотки возбуждения.

При уменьшении сопротивления шунтируемого реостата  $R_{ш}$  будет уменьшаться ток возбуждения  $I_B$ , так как  $I_B = I - I_{ш}$ , а частота вращения двигателя увеличиваться.

Изменение направления вращения якоря двигателя (реверсирование) осуществляется двумя способами:

- а) изменением направления тока в обмотке якоря;
- б) изменением направления тока в обмотке возбуждения.

### 3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

При исследовании двигателя снять и построить:

- 1) рабочие характеристики:

$P_r, I, n, \eta = f(P_2)$ , при  $U = \text{const}$ ;

2) механические характеристики:

а) естественную:

$$n = f(M_2) \text{ при } U = \text{const и } R_\delta = 0;$$

б) искусственные:

$$n = f(M_2) \text{ при } U = \text{const и } (R_a + R_\delta) = \text{const};$$

$$n = f(M_2) \text{ при } U = \text{const } R_{ш} = \text{const};$$

3) регулировочную характеристику

$$n = f(I_B) \text{ при } U = \text{const } M_2 = \text{const}.$$

#### 4. Порядок выполнения работы.

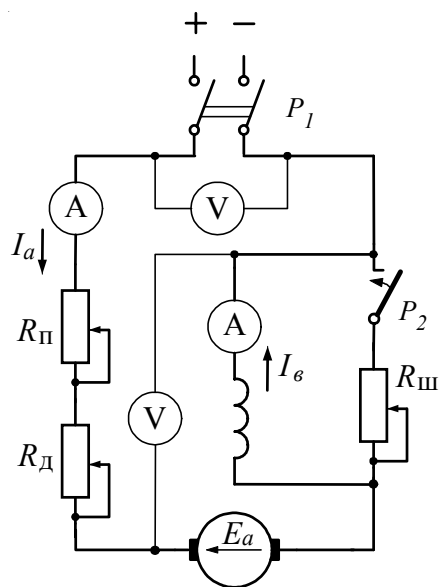


Рис. 7. Схема для испытания двигателя последовательного возбуждения

1. Ознакомьтесь с конструкцией электродвигателя и электромагнитного тормоза или нагрузочного устройства, записать данные заводского щитка, число главных и добавочных полюсов, способ охлаждения.

2. Собрать схему (рис. 7) или ознакомиться с собранной схемой и проверить ее.

3. Осуществить пуск двигателя. Перед пуском двигателя убедиться, что пусковой реостат введен полностью и включен электромагнитный тормоз (устройство для измерения вращающего момента), а если

нагрузочным устройством является генератор, то должно быть включено его возбуждение и необходимая нагрузка.

4. Снять и построить рабочие характеристики двигателя:

$$P_1, I, n, \eta = f(P_2), \text{ при } U = \text{const}.$$

Для этого необходимо пустить двигатель в ход, нагрузить его до  $I = I_H$  и, постепенно разгружая, записать показания приборов в табл. 3.

Частота вращения двигателя при наименьшей нагрузке не должна превышать  $1,5 n_n$ .

В случае, если испытуемый двигатель тормозится генератором (ГПТ), то во всех таблицах 3, 4, 5 и 6 в разделе «Измерено» вертикальную графу для момента  $M_2$  перенести в раздел «Вычислено», а при опытах измерять величины тока  $I_{ar}$  и напряжения  $U_G$  генератора, которые записывать в две вертикальные графы в разделе «Измерено».

Расчет мощности  $P_2$  и момента  $M_2$  выполнять по следующим формулам:

а) мощность, отдаваемая генератором  $P_G = U_G I_{ar}$  (ввести в табл. 3);

б) полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_G + I_{ar}^2 R_a + (P_{мех} + P_{ст}),$$

где  $R_a$  – суммарное сопротивление цепи якоря (указывается на стенде или измеряется методом амперметра и вольтметра),  $(P_{мех} + P_{ст})$  – сумма механических и магнитных потерь, принимается постоянной и указывается на стенде;

в) полезный момент на валу двигателя  $M_2 = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n}$ .

Таблица 3

Измерено					Вычислено		
$U$	$U_d$	$I = I_a$	$M_2$	$n$	$P_1$	$P_2$	$\eta$
В	В	А	Н·м	об/мин	Вт	Вт	---

5. Механические характеристики двигателя:

а) естественная:  $n = f(M_2)$  при  $U = \text{const}$  и  $R_d = 0$  — строятся по данным табл. 3;

б) искусственная:  $n = f(M_2)$  при  $U = \text{const}$  и  $(R_a + R_d) = \text{const}$  — снимаются при введении в цепь якоря двигателя добавочного сопротивления.

Величину  $R_d$  установить в соответствии с указанием преподавателя.

Первую запись показаний приборов сделать при наибольшем моменте на валу двигателя, затем уменьшать его до значения, при котором частота вращения двигателя будет не больше  $n = 1,5n_H$ . Показания приборов записать в табл. 4.

Таблица 4

Измерено				Вычислено			
$U$	$U_d$	$I = I_a$	$M_2$	$n$	$P_1$	$P_2$	$\eta$
В	В	А	Н·м	об/мин	Вт	Вт	—

Для снятия искусственной характеристики  $I = f(M_2)$  при  $U = \text{const}$  и  $R_{ш} = \text{const}$  необходимо пустить двигатель в ход при нагрузке, близкой к номинальной. Полностью ввести реостат шунтируемого сопротивления  $R_{ш}$  и замкнуть рубильник  $P_2$  в цепи шунта, а затем установить ток  $I_B \approx 0,8I_A$ .

При неизменном сопротивлении шунта уменьшают нагрузку двигателя до такого значения, при котором частота

вращения не будет превышать  $1,5n_H$ . Для 5–6 значений нагрузки записать показания приборов в табл. 5.

Таблица 5

Измерено						Вычислено		
$U$	$U_d$	$I_a$	$I_e$	$M_2$	$n$	$P_1$	$P_2$	$\eta$
В	В	А	А	Н·м	об/мин	Вт	Вт	—

6. Снять и построить регулировочную характеристику двигателя:

$$n = f(I_B) \text{ при } U = \text{const} \text{ и } M_2 = \text{const}.$$

Для регулирования частоты вращения двигателя способом ослабления магнитного поля машины необходимо пустить двигатель в ход, установить тормозной момент по электромагнитному тормозу, равный  $(0,4-0,5)M_H$ , и поддерживать его на протяжении опыта постоянным. Включить рубильник  $P_2$ , шунтирующий обмотку возбуждения, плавно увеличивать ток шунта  $I_{ш}$  до  $(0,2-0,3)I_H$ .

Частота вращения двигателя при наибольшем ослаблении магнитного поля не должна превышать  $1,5n_H$ .

Записать в табл. 6 показания приборов при 4–5 разных токах

Таблица 6

Измерено				
$U$	$I_e$	$I$	$n$	$M_2$
В	А	А	об/мин	Н·м

### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.

По результатам опытов и расчетов необходимо составить отчет установленной формы, в котором:

1. Привести паспортные данные испытуемого двигателя и приборов, использованных в опытах.

2. Представить электрическую схему испытаний. Произвести необходимые расчеты, по следующим формулам:

$$P_1 = UI; \quad P_2 = 0,105 \cdot M \cdot n; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

3. По данным табл.3 в одних осях координат построить рабочие характеристики:

$$P_1, I, n, \eta = f(P_2), \text{ при } U = \text{const}.$$

4. По данным табл. 3, 4 и 5 построить в одних осях координат механические характеристики:

а) естественную:

$$n = f(M_2), \text{ при } U = \text{const} \text{ и } R_o = 0 \text{ (табл. 3.);}$$

б) искусственные:

$$n = f(M_2), \text{ при } U = \text{const} \text{ и } (R_a + R_o) = \text{const} \text{ (табл. 4);}$$

$$n = f(M_2), \text{ при } U = \text{const} \text{ и } R_{III} = \text{const}, R_o = 0 \text{ (табл.5).}$$

5. По данным табл. 6 построить зависимость  $n = f(I_a)$  при  $U = \text{const}$  и  $M_2 = \text{const}$ .

6. Дать заключение по результатам выполненной работы.

### 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. В чем особенности пуска этого двигателя?

2. Почему по мере разгона двигателя уменьшается величина вращающегося момента?

3. Почему с ростом момента нагрузки уменьшается частота вращения двигателя?

4. Как влияет реакция якоря на механические характеристики двигателя?

5. Как влияет напряжение сети на частоту вращения двигателя?

6. Способы регулирования частоты вращения двигателя. Какие из них используются в данной работе?

7. Почему для двигателя последовательного возбуждения недопустима работа на холостом ходу? Какие меры в схеме стенда приняты для исключения этого режима?

8. Почему естественная механическая характеристика у двигателя последовательного возбуждения называется «мягкой»?

9. Почему при небольших токах нагрузки момент двигателя последовательного возбуждения пропорционален квадрату тока?

10. За счет чего искусственная механическая характеристика при шунтировании последовательной обмотки возбуждения двигателя располагается выше естественной?

11. Какими достоинствами располагает двигатель с последовательной обмоткой возбуждения?

12. Как зависит противо — ЭДС от частоты вращения?

13. Как в данной работе производится регулирование и изменение нагрузки двигателя?

14. Какие характеристики двигателя называются механическими (естественными и искусственными) и как они определяются в данной работе?

15. По паспортным данным определить номинальный момент двигателя.

16. Какие характеристики называются рабочими и как их определяют?

17. Как влияет на величину КПД введение добавочного сопротивления в цепь якоря и шунтирование обмотки возбуждения?

18. Как изменить направление вращения двигателя последовательного возбуждения?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

Изучить конструкцию и принцип действия трансформатора. Научиться выполнять опыты холостого хода и короткого замыкания, определять параметры схемы замещения, определять и объяснять рабочие характеристики трансформатора.

### 2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ.

Трансформатором называется электромагнитное устройство, служащее для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в энергию другого напряжения при неизменной частоте.

В простейшем случае трансформатор должен иметь две индуктивно связанные обмотки, выполненные чаще всего из медного или алюминиевого изолированного провода. С целью усиления электромагнитной связи обмотки располагаются на магнитопроводе из ферромагнитного материала (рис. 8).

Обмотку, присоединенную к питающей сети, называют первичной, а обмотку, к которой присоединена нагрузка – вторичной.

У трехфазного трансформатора первичная и вторичная обмотки состоят из трех фаз. Выводы первичной обмотки обозначают заглавными буквами *A* и *X*, *B* и *Y*, *C* и *Z*, а выводы вторичной обозначают малыми буквами *a* и *x*, *b* и *y*, *c* и *z*.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции.

При подаче переменного напряжения на первичную обмотку и разомкнутой вторичной обмотке (холостой ход

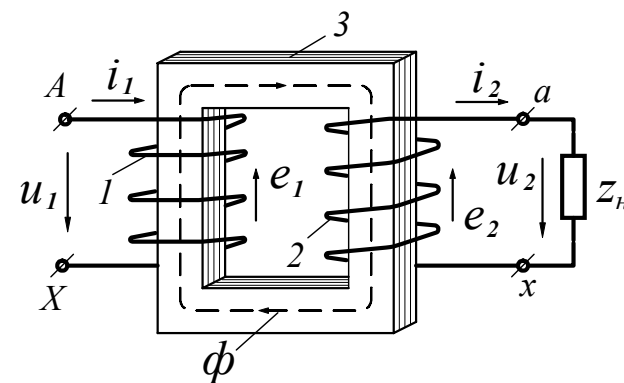


Рис. 8. Электромагнитная схема однофазного трансформатора: 1, 2 – первичная и вторичная обмотки; 3 – магнитопровод

трансформатора), ток первичной обмотки создает поток, большая часть которого, сцепленная с обеими обмотками, является потоком взаимной индукции, амплитуда которого –  $\Phi_m$ .

В результате изменения во времени потока взаимной индукции в обмотках индуцируются электродвижущие силы (ЭДС):

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi_m, \quad E_2 = 4,44 f_1 W_2 \Phi_m,$$

где  $f_1$  – частота питающей сети;  $W_1, W_2$  – число витков, соответственно, первичной и вторичной обмоток.

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть накоротко или на активно – индуктивную нагрузку, то по закону Ленца вторичный ток  $I_2$  будет стремиться уменьшить вызывающий его поток  $\Phi_m$ . Вследствие этого ЭДС, индуцированная в первичной обмотке, стремится также уменьшиться, а первичный ток возрасти.

При наличии тока  $I_2$  величина потока  $\Phi_m$  определяется совместным действием магнитодвижущих сил (МДС) первичной и вторичной обмоток

$$\dot{F}_m = \dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_2 W_2.$$

Намагничивающее действие возросшего тока  $I_1$  компенсирует размагничивающее действие тока  $I_2$ , поэтому поток  $\Phi_m$  и ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  изменяются незначительно.

Каждый трансформатор характеризуется: номинальной полной мощностью  $S_H$ , номинальными напряжениями  $U_{1H}$  и  $U_{2H}$ , токами обмоток  $I_{1H}$  и  $I_{2H}$ , числом фаз и частотой тока, схемами и группой соединения обмоток.

Кроме того, в соответствии с ГОСТом, для каждого типа трансформатора установлены определенные значения тока и потерь холостого хода, напряжения и потерь короткого замыкания.

Эти величины могут быть определены из опытов холостого хода и короткого замыкания. Для более полной характеристики трансформатора, снимают еще его рабочие характеристики.

Для расчетов режимов работы трансформатора используется электрическая схема замещения. На рис. 9 представлена T – образная схема замещения трансформатора.

На схеме обозначено:

$r_1, x_1$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки;

$r_2', x_2'$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния приведенной вторичной обмотки;

$r_m, x_m$  – активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания;

$z_n'$  – комплексное сопротивление нагрузки.

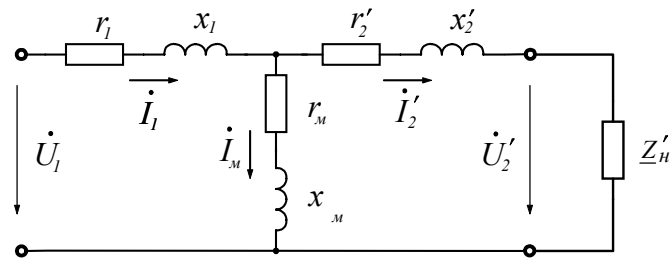


Рис. 9. T – образная схема замещения трансформатора

Для определения тока и потерь холостого хода, напряжения и потерь короткого замыкания, а также параметров схемы замещения проводят опыты холостого хода и короткого замыкания.

#### Опыт холостого хода.

Опыт холостого хода проводится при разомкнутой вторичной обмотке, на первичную обмотку подается номинальное напряжение.

В опыте холостого хода определяется коэффициент трансформации  $k$ . Коэффициент трансформации — это отношение ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках или отношение числа витков обмоток

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}.$$

В режиме холостого хода трансформатор потребляет из сети активную мощность  $P_0$ , равную электрическим потерям в первичной обмотке и магнитным потерям в сердечнике трансформатора.

На рис. 10 приведена схема замещения трансформатора для режима холостого хода.

Для трансформаторов средней и большей мощности электрическими потерями в первичной обмотке можно пренебречь из-за малой величины тока холостого хода  $I_0 = (0,02 - 0,08)I_H$ . Тогда мощность холостого хода практи-

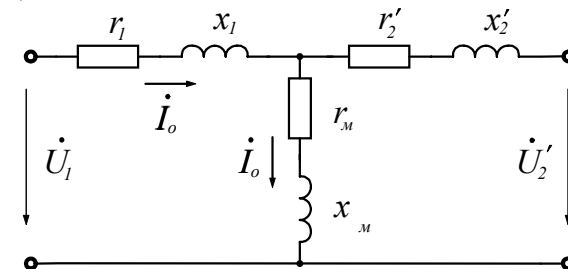


Рис. 10. Схема замещения трансформатора для режима холостого хода

чески расходуется на потери в стали, т.е. принимают  $P_{CT} =$

$$P_o, \quad I_{oa} \approx \frac{P_{CT}}{U_1}.$$

При холостом ходе  $U_1 = U_H$  и потери трансформатора мало отличаются от магнитных потерь в сердечнике трансформатора под нагрузкой, поэтому их считают постоянными.

Током холостого хода называется ток, который при номинальном напряжении и номинальной частоте протекает в первичной обмотке при разомкнутой вторичной ( $I_2 = 0$ ). Обычно ток холостого хода принято выражать в процентах от номинального тока обмотки

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100\%.$$

Основной составляющей тока холостого хода трансформатора является намагничивающий ток  $I_{op} = \frac{U_1}{x_0}$ . Активная составляющая тока холостого хода  $I_{op}$  обычно в 5 – 10 раз меньше реактивной. Ток холостого хода определяется через его составляющие по формуле:

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2}.$$

По данным, полученным из опыта рассчитываются следующие параметры:

$$z_o = \frac{U_1}{I_o}, \quad r_o = \frac{P_o}{I_o^2}, \quad x_o = \sqrt{z_o^2 - r_o^2}, \quad \cos \varphi_o = \frac{P_o}{U_1 I_o}.$$

Для трехфазного трансформатора:

$$r_o = \frac{P_o}{3I_{o\phi}^2}, \quad \cos \varphi_o = \frac{P_o}{3U_{1\phi} I_{o\phi}}.$$

Согласно схеме замещения (см. рис. 10)

$$z_o = z_l + z_m, \quad r_o = r_l + r_m, \quad x_o = x_l + x_m.$$

Так как  $r_l$  и  $x_l$  на 1–2 порядка меньше чем соответственно  $r_m$  и  $x_m$ , то с достаточной точностью можно принять, что сопротивления намагничивающей ветви равны сопротивлениям холостого хода, т.е.:

$$r_m = r_o, \quad x_m = x_o, \quad z_m = z_o.$$

#### Опыт короткого замыкания.

Опыт короткого замыкания проводится с целью определения напряжения короткого замыкания  $u_K$ , мощности потерь в меди обмоток  $P_K$  и параметров схемы замещения.

Опыт проводится при замкнутых накоротко вторичных обмотках, к первичной обмотке подводится пониженное напряжение такой величины, чтобы в обмотках установились номинальные токи.

На рис. 11 приведена схема замещения трансформатора для режима короткого замыкания.

Напряжение короткого замыкания принято выражать в процентах от номинального напряжения соответствующей обмотки по формуле

$$u_K = \frac{U_K}{U_H} \cdot 100\%,$$

где  $U_K$  – напряжение короткого замыкания;  $U_H$  – номинальное напряжение.

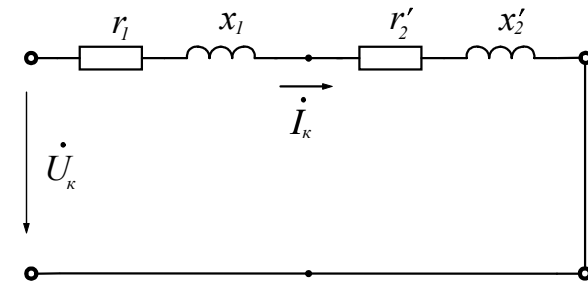


Рис. 11. Схема замещения трансформатора для режима короткого замыкания



Напряжение короткого замыкания трансформаторов составляет 5,5–10,5%. Большие значения относятся к трансформаторам больших мощностей и напряжений 110 и более кВ.

Учитывая, что напряжение  $u_k$  в среднем составляет всего 10% от  $U_n$ , поток  $\Phi_m$  в сердечнике трансформатора, а следовательно, и магнитная индукция  $B$  в десять раз меньше, чем при напряжении  $U_n$ .

Так как потери в стали  $P_c$  пропорциональны квадрату индукции, то в опыте короткого замыкания потерями в стали можно пренебречь, и считать, что активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте к.з., расходуется только на покрытие потерь в меди трансформатора.

По данным опыта короткого замыкания определяются параметры схемы замещения:

$$z_k = \frac{U_k}{I_k}, \quad r_k = \frac{P_k}{I_k^2}, \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad \text{и} \quad \cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k I_k}.$$

Для трехфазного трансформатора:

$$r_k = \frac{P_k}{3I_{кф}^2}, \quad \cos \varphi_k = \frac{P_k}{3U_{кф} I_{кф}}.$$

Согласно схеме замещения (см. рис. 11)

$$z_k = z_1 + z_2', \quad r_k = r_1 + r_2', \quad x_k = x_1 + x_2'.$$

Так как обычно в трансформаторах  $r_1 \approx r_2'$ , а  $x_1 \approx x_2'$ , то принимают  $r_1 \approx r_2' \approx r_k/2$  и  $x_1 \approx x_2' \approx x_k/2$ .

### 3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Ознакомьтесь с устройством и принципом действия трехфазного трансформатора.

1. Провести опыт холостого хода:

- определить коэффициент трансформации;
- определить число витков первичной и вторичной обмоток;

в) определить, при напряжении  $U_1$  равном напряжению сети, ток холостого хода  $I_o$ , мощность потерь холостого хода  $P_o$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi_0$ .

2. Провести опыт нагрузки и снять рабочие характеристики трансформатора  $U_2, \eta, \cos \varphi_1, I_1 = f(I_2)$ .

3. Провести опыт короткого замыкания и определить напряжение короткого замыкания  $u_k$ , мощность потерь  $P_k$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi_k$  для тока  $I_k = I_H$ .

4. По данным опытов определить параметры схемы замещения и сделать выводы по работе.

### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Усвоить краткие сведения о принципе действия и работе трансформатора, рассмотренные в разделе 2. Разобраться с особенностями конструкции исследуемого трансформатора и записать его паспортные данные:  $S_H$ , номинальные напряжения  $U_{1H}, U_{2H}$  при различных схемах соединения обмоток. Определить  $I_{1H}, I_{2H}$  при номинальной мощности трансформатора.

2. Ознакомиться с собранной на стенде схемой испытания трансформатора, проверить и привести ее в соответствие с изображенной на рис. 12.

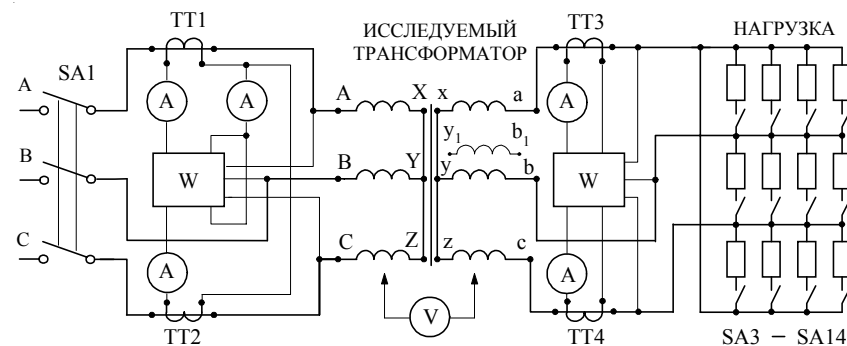


Рис. 12. Схема испытания трехфазного трансформатора для опыта холостого хода и режима нагрузки (на стенде возможно схема соединения обмоток  $\Delta/Y$ , см. рис. 13);  
ТТ1–ТТ4 – трансформаторы тока)

**3. Выполнить опыт холостого хода при питании первичной обмотки от сети.**

Обмотки трансформатора в зависимости от его номинальных данных должны быть соединены по схеме  $\Delta/Y$  или  $Y/Y$  (см. рис. 13).

Необходимо произвести измерения, показания приборов записать в табл. 7. Для измерения электрических величин можно использовать приборы стенда, или приборы измерительного комплекта типа К-51, либо другого типа.

Для определения чисел витков обмоток измеряются фазные напряжения первичной и вторичной обмоток  $U_{BY}, U_{by}$  и напряжение на зажимах добавочной обмотки  $U_{\delta}$ , которая расположена на среднем стержне, число витков ее приведено на стенде.

Таблица 7

$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{BY}$	$U_{by}$	$U_{ab}$	$U_{\delta}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_0$
В	В	В	В	В	В	В	А	А	А	Вт

Средняя фаза трехфазного трансформатора требует меньшей намагничивающей мощности, чем крайние фазы. Следовательно, в средней фазе будет меньший ток холостого хода. Поэтому ток холостого хода следует измерять в каждой из трех фаз.

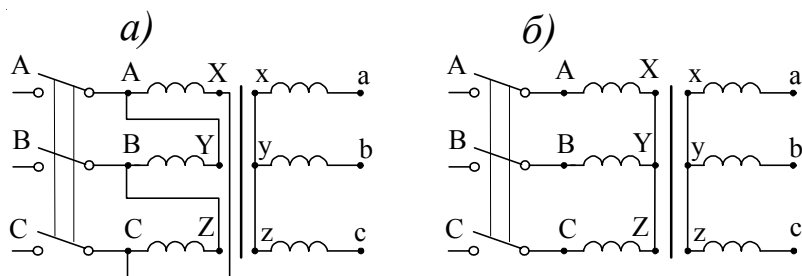


Рис. 13. Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора:

а — схема  $\Delta/Y$ ;

б — схема  $Y/Y$

По данным измерений рассчитать коэффициенты трансформации, фазный и линейный ( $k_{\phi}, k_{\ell}$ ), число витков первичной и вторичной обмоток ( $W_1, W_2$ ), ток холостого хода и сопротивления холостого хода. Результаты расчетов записать в табл. 8.

Таблица 8

$k_{\ell}$	$k_{\phi}$	$W_1$	$W_2$	$I_0$	$i_{0\%}$	$\cos\phi_0$	$r_0$	$x_0$	$z_0$
—	—	—	—	А	—	—	Ом	Ом	Ом

Коэффициент трансформации определяется как отношение высшего напряжения (ВН) к низшему (НН) при холостом ходе трансформатора.

Значения первичного линейного напряжения и линейного тока холостого хода определить, как средние из выражений:

$$U_1 = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}, \quad I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}.$$

Относительное значение тока холостого хода

$$i_{0\%} = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100\%.$$

Коэффициент мощности

$$\cos\phi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_1I_0}.$$

Фазные напряжения и фазные токи определяются из линейных по формулам, зависящим от схемы соединения обмоток:

✓ при соединении  $Y$ :  $I_{\phi} = I_{\ell}, U_{\phi} = U_{\ell}/\sqrt{3}$ ;

✓ при соединении  $\Delta$ :  $I_{\phi} = I_{\ell}/\sqrt{3}, U_{\phi} = U_{\ell}$ .

4. Режим нагрузки, определение и построение рабочих характеристик трансформатора  $U_2$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $I_1 = f(I_2)$  проводится по той же схеме, что и опыт холостого хода (рис. 12).

Этот опыт предусматривает увеличение нагрузки трансформатора, начиная с его холостого хода при неизменном напряжении первичной обмотки  $U_{1H}$  и постоянном коэффициенте мощности  $\cos \varphi_2$ . При опыте нужно обеспечивать по фазам равномерную нагрузку. Для измерений напряжений и токов могут быть взяты любые, но обязательно одноименные фазы. Увеличивая ток нагрузки  $I_2$  с помощью выключателей SA3-SA14, записать показания приборов для 5-6 его значений, включая и холостой ход ( $I_2 = 0$ ), в табл. 9.

Таблица 9

Измерено				Вычислено			
$P_1$	$U_1$	$I_1$	$U_2$	$I_2$	$P_2$	$\cos \varphi_1$	$\eta$
Вт	В	А	В	А	Вт	—	о.е.

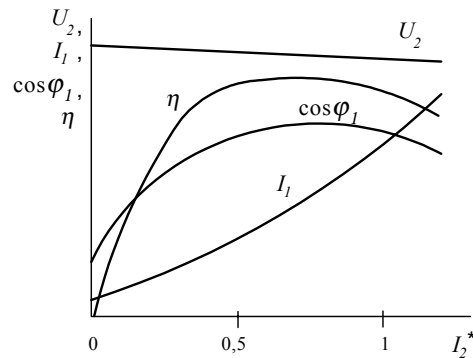


Рис. 14. Примерный вид рабочих характеристик трансформатора

Примерный вид рабочих характеристик представлен на рис. 14.

Коэффициент мощности первичной обмотки трансформатора рассчитывается по формуле

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1},$$

причем значение мощности  $P_1$  берется из опыта для соответствующих значений тока  $I_2$ .

Коэффициент полезного действия трансформатора  $\eta$  определяется как отношение отдаваемой мощности  $P_2$  к подводенной мощности  $P_1$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Максимальное значение  $\eta$  наступает при равенстве потерь в стали и меди трансформатора и оно получается при

$$I_2^* = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}},$$

где  $I_2^*$  – ток нагрузки в относительных единицах, равный отношению тока  $I_2$  к номинальному току  $I_{2H}$ .

Напряжение  $U_2$  с увеличением тока нагрузки  $I_2$  на вторичной обмотке немного снижается за счет падения напряжения на активных и индуктивных сопротивлениях обеих обмоток трансформатора.

5. Выполнить опыт короткого замыкания, который проводится по схеме рис. 15. В этой схеме закорочены

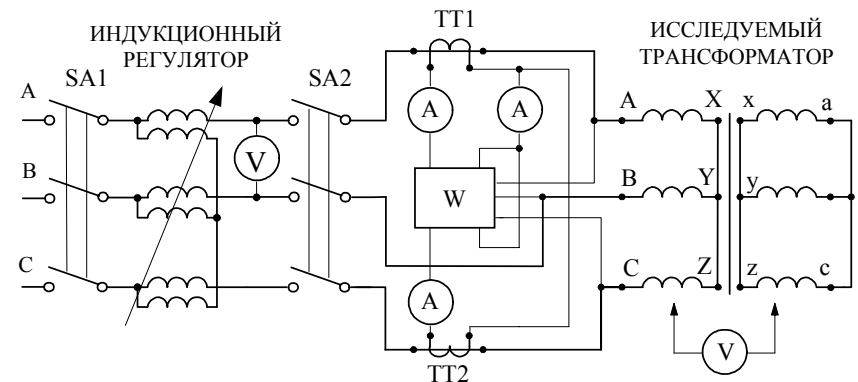


Рис. 15. Схема для выполнения опыта короткого замыкания

выводы вторичной обмотки –  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и трансформатор питается пониженным напряжением от индукционного регулятора.

До подключения трансформатора к регулятору напряжения, на нем устанавливается нулевое или минимально возможное напряжение. После этого регулятор напряжения отключают от питающей сети и подключают к нему трансформатор с закороченной вторичной обмоткой. Затем включают питающее напряжение, и плавно увеличивая его, устанавливают ток в первичной обмотке равным номинальному.

Показания приборов и результаты расчетов записать в табл. 10.

Таблица 10

Измерено							Вычислено			
$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_K$	$U_K$	$u_K$	$I_K$	$\cos \varphi_K$
В	В	В	А	А	А	Вт	В	%	А	---

Расчетные формулы:

$$U_K = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}, \quad I_K = \frac{I_A + I_B + I_C}{3},$$

$$u_K = \frac{U_K}{U_{1H}} \cdot 100\%, \quad \cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} U_K I_K}.$$

**6. Рассчитать сопротивления схемы замещения трансформатора.** Результаты занесите в табл. 11. Расчетные формулы даны в разделе 2.

Таблица 11

$r_1$	$x_1$	$r_2$	$x_2$	$r_M$	$x_M$
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.

По результатам опытов и расчетов необходимо составить отчет установленной формы, в котором:

- привести паспортные данные трансформатора;
- привести схему соединения обмоток трансформатора и расчетные формулы;
- привести таблицы опытных данных и результаты расчетов по всем пунктам работы;
- построить график с рабочими характеристиками трансформатора;
- определить значения параметров схемы замещения;
- сделать выводы по выполненной работе.

### 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. По данным, указанным на щитке трансформатора, определите  $I_{1H}$  и  $I_{2H}$ .
2. Порядок определения коэффициента трансформации.
3. Какие схемы соединения обмоток трансформатора используются в данной работе и почему?
4. Порядок проведения опыта холостого хода и его цель.
5. В чем различие между коротким замыканием трансформатора в эксплуатации и опытом короткого замыкания?
6. Порядок проведения опыта короткого замыкания и его цель.
7. Какие зависимости называются рабочими характеристиками трансформатора и порядок их определения?
8. Перечислите средства, с помощью которых добиваются снижения потерь в сердечнике трансформатора.
9. Как определяется число витков обмотки трансформатора?
10. Какие потери определяются в опытах к. з. и х. х.?

11. Почему в опыте к. з. пренебрегают потерями в стали ?
12. Чем определяется величина напряжения короткого замыкания?
13. Чем определяется потеря напряжения на вторичной обмотке трансформатора при его нагрузке ?
14. Почему трансформатор не может работать от сети постоянного тока?
15. Почему при активной нагрузке трансформатора ток его первичной цепи не является активным?
16. Зачем нужна схема замещения, какие элементы она содержит?
17. Как определяются сопротивления схемы замещения?

Канд. техн. наук, доцент В.В. ШУМЕЙКО

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОД.  
ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
И ТРАНСФОРМАТОРЫ**

**Руководство к лабораторным работам**

Редактор *Е.А. Ямщикова*  
Компьютерная верстка *Г.Д. Волкова*

ЛР № 020307 от 28.11.91

---

Тип. зак.	Изд. зак. 174	Тираж 3 500 экз.
Подписано в печать 15.04.03	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л.		Формат 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Типография РГОТУПС, 107078, Москва, Басманный пер., 6