

## РАБОТА № 2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

### Оглавление

1.	Цель работы .....	2
2.	Программа работы .....	2
3.	Основы теории .....	
4.	Экспериментальное исследование .....	3
4.1.	Определение коэффициента трансформации.....	3
4.2.	Опыт холостого хода.....	4
4.3.	Опыт короткого замыкания.....	6
4.4.	Опыт определения рабочих характеристик.....	8
4.5.	Пуск двигателя при несимметрии цепи ротора .....	9
4.6.	Построение круговой диаграммы по данным опытов холостого хода и короткого замыкания .....	10
4.6.1.	Перечень необходимых данных .....	10
4.5.2.	Последовательность построения упрощенной диаграммы .....	11
4.6.3.	Определение по круговой диаграмме номинальной точки, мощностей и потерь мощности двигателя .....	12
4.6.4.	Определение по круговой диаграмме значений коэффициента мощности, коэффициента полезного действия и скольжения .....	14
4.6.5.	Определение по круговой диаграмме максимального электромагнитного момента, характеристик $s = f(M_{эм})$ , $s = f(I_1)$ и кратностей пускового момента и пускового тока .....	15
5.	Содержание отчета.....	19
6.	Контрольные вопросы.....	19
	Приложение. Круговая диаграмма асинхронной машины. Общие положения ..	20
	Рис. 2.1. Схема лабораторной установки для исследования АД с фазным ротором .....	21
	Рис.2.2. Разделение механических и магнитных потерь .....	6
	Рис. 2.3. Упрощенная круговая диаграмма асинхронной машины .....	22
	Рис. 2. 4. Кривые электромагнитного момента $M$ и тока статора $I$ .....	23

## **1. Цель работы**

Ознакомиться с устройством асинхронного двигателя с фазным ротором, уяснить принцип действия, пуск и реверсирование. Овладеть техникой и методикой снятия характеристик, освоить построение круговой диаграммы асинхронного двигателя по экспериментальным данным и определение по ней основных величин, характеризующих работу двигателя.

## **2. Программа работы**

**2.1.** Определить коэффициент трансформации по напряжению.

**2.2.** Провести опыт холостого хода и построить зависимости  $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U)$ . Произвести разделение потерь мощности холостого хода на электрические потери в обмотке статора  $p_{\Delta I}$ , магнитные потери  $p_{M\Delta}$  в магнитопроводе и механические  $p_{Mx}$ .

**2.3.** Провести опыт короткого замыкания и построить зависимости  $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U)$ .

**2.4.** Провести опыт и получить данные для построения рабочих характеристик двигателя  $I_1, P_1, M, \cos \varphi, \eta, s = f(P_2)$ .

**2.5.** Осуществить пуск двигателя при несимметрии цепи ротора.

**2.6.** По данным опытов *n. 2.2* и *n. 2.3* построить круговую диаграмму и пользуясь ею определить значения величин, характеризующих работу асинхронного двигателя (см. [разделы 4.5.3, 4.5.4, 4.5.5](#)). По круговой диаграмме построить зависимости  $s = f(M_{эм}), s = f(I_1)$ .

### 3. Основы теории

.....  
.....

### 4. Экспериментальное исследование

Испытания асинхронного электродвигателя с фазным ротором выполняются на лабораторной установке, состоящей из двигателя, тормозного устройства и пускового реостата. В качестве тормозного устройства используется в одной из лабораторных установок **электромагнитный тормоз**, а в другой – **электродвигатель постоянного тока, работающий в режиме тормоза**.

*В первом случае* тормозной момент на валу регулируется изменением величины постоянного тока реостатом, включенным в схему **электромагнитного тормоза**. Значение момента непосредственно считывается со шкалы тормоза, которая проградуирована в *кгс·м*. Для выражения момента в *Н·м* необходимо умножить показание, определенное по шкале тормоза, на коэффициент *9,80665*, так как имеет место соотношение

$$1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н (точно)}. \quad (1)$$

*Во втором случае* необходимо установить реостатом  $RR_{\text{в}}$  ток  $I_{\text{в}}$  в обмотке возбуждения тормозного двигателя (рис.2.1) равный  $I,0 \text{ А}$ ; убедиться, что испытуемый и **тормозной двигателя** вращаются в разные стороны и, регулируя величину сопротивления  $RR_{\text{р2}}$  в цепи якоря, установить необходимую величину тормозного момента. Значение его в зависимости от тока якоря  $I_{\text{а}}$  двигателя постоянного тока определяется по зависимости  $M = f(I_{\text{а}})$ , которая приведена на лабораторном стенде.

**Значения омических сопротивлений фазы обмотки статора и ротора:**

$$R_1 = 1,5 \text{ Ом}; \quad R_2 = 0,15 \text{ Ом}. \quad (2)$$

#### 4.1. Определение коэффициента трансформации

В процессе опыта пусковой реостат  $RR_{\text{п}}$  должен быть отсоединен от выводов обмотки ротора (рис.2.1). Для определения коэффициента трансформации подводят номинальное напряжение ( $220 \text{ В}$ ) к обмотке статора при неподвижном роторе и разомкнутой его обмотке и измеряют линейные напряжения на зажимах обмотки статора (вольтметр  $PV1$ ) и на контактных кольцах ротора (вольтметр  $PV2$ ).

Измерения проводят для одного линейного напряжения. За действительное значение коэффициента трансформации принимают отношение фазных напряжений статора и ротора. Полученные результаты заносят в **табл. 2.1**.

Таблица 2.1

Статор	Ротор	$K$
$U_{C1C2}$	$U_{P1P2}$	
$B$	$B$	-
220		

Коэффициент трансформации определяют по формуле:

$$K = \sqrt{3}U_{C1C2}/U_{P1P2}.$$

#### 4.2. Опыт холостого хода

Под холостым ходом подразумевают работу электродвигателя, подключенного к сети и не соединенного с нагрузкой.

При опыте холостого хода измеряют следующие величины: подведенное линейное напряжение, линейный ток статора и потребляемую мощность.

В одной из лабораторных установок измерения производятся посредством измерительного комплекта приборов  $K50$  на котором фиксируются действующие значения следующих величин: напряжения (оно уменьшено в  $\sqrt{3}$  раз по сравнению с фактическим напряжением, поданным на обмотку статора), линейного тока и мощности в каждой фазе.

При реостате  $RR_n$  находящемся в положении “Пуск”, устанавливают потенциал-регулятором номинальное напряжение  $220\text{ В}$  (при этом вольтметр комплекта  $K50$  показывает  $127\text{ В}$ ) на зажимах обмотки статора и осуществляют запуск двигателя. Затем реостат  $RR_n$  плавно выводят. После разгона двигателя, следует отключить его от сети и, изменив чередование фаз обмотки статора, осуществить запуск еще раз. Необходимо убедиться в соответствии направления вращения ротора стрелке на корпусе двигателя.

После пуска двигателя, напряжение на зажимах обмотки статора устанавливают равным  $1,1U_{\text{ном}} \approx 240\text{ В}$  (показание вольтметра  $PVI$ ), а затем уменьшают до величины  $100\text{ В}$  (через  $20\text{ В}$ ). Результаты замеров записываются в табл.2.2 (необходимо произвести один из замеров при  $U_{\text{ном}} = 220\text{ В}$ ). По данным опыта строятся характеристики холостого хода  $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$ .

Таблица 2.2

Измерение							Расчет							
$U_x$	$I_{Ax}$	$I_{Bx}$	$I_{Cx}$	$P_{Ax}$	$P_{Bx}$	$P_{Cx}$	$I_x$	$P_x$	$\cos \varphi_x$	$P_{\text{эл}}$	$U_x^2$	$P_{M2} + P_{Mx}$	$P_{M2}$	$P_{Mx}$
$B$	$A$	$A$	$A$	$Bm$	$Bm$	$Bm$	$A$	$B$	-	$Bm$	$B^2$	$Bm$	$Bm$	$Bm$

Расчетные величины определяются в следующем порядке:

1) Расчетная величина тока холостого хода  $I_x$  (линейное значение) определяется по формуле  $I_x = (I_{Ax} + I_{Bx} + I_{Cx})/3$ .

При построении круговой диаграммы используется фазное значение тока холостого хода

$$I_{\phi x} = I_x / \sqrt{3}. \quad (3)$$

2) Потери холостого хода и коэффициент мощности определяются по формулам:

$$P_x = P_{Ax} + P_{Bx} + P_{Cx}, \quad (4)$$

$$\cos \varphi_x = P_x / \sqrt{3} U_x I_x. \quad (5)$$

3) *Разделение потерь* (определение магнитных  $p_{M2}$  и механических  $p_{Mx}$  потерь) производится следующим образом:

а) Определяются электрические потери в обмотке статора

$$p_{\Delta I} = I_x^2 R_{I(75^\circ)}. \quad (6)$$

где  $R_{I(75^\circ)}$  - сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к расчетной рабочей температуре двигателя, составляющей  $75^\circ \text{C}$ .

$$R_{I(75^\circ)} = R_{I(t)} (235^\circ + 75^\circ) / (235^\circ + t), \quad (7)$$

где  $t$  - температура окружающей среды, при которой производился замер сопротивления  $R_{I(t)}$ . Величина сопротивления  $R_{I(t)}$  приведена в паспорте двигателя (см. значение на с.3), а значение температуры  $t$  можно приближенно приравнять равным  $20^\circ \text{C}$ .

б) Определяется сумма магнитных и механических потерь:

$$p_{M2} + p_{Mx} = P_x - p_{\Delta I}. \quad (8)$$

в) Строится зависимость  $p_{M2} + p_{Mx} = f(U_x^2)$ , которая должна представлять собой прямую линию (рис.2.2). Проведя между опытными точками указанной зависимости прямую линию до пересечения с осью ординат, получаем значение механических потерь, равное отрезку отсекаемому этой прямой на оси ординат. Все ординаты выше горизонтальной линии механических потерь  $\{ \text{разность } (p_{M2} + p_{Mx}) - p_{Mx} \}$ , соответствуют магнитным потерям (в стали).

Результаты полученные в п.п. 1) – 3) заносятся в табл 2.2.

Для построения круговой диаграммы используются значения  $I_{\phi x}$ ,  $P_x$ ,  $p_{M2}$  и  $p_{Mx}$  соответствующие номинальному напряжению  $U_x = U_{Iном} = 220 \text{В}$ .

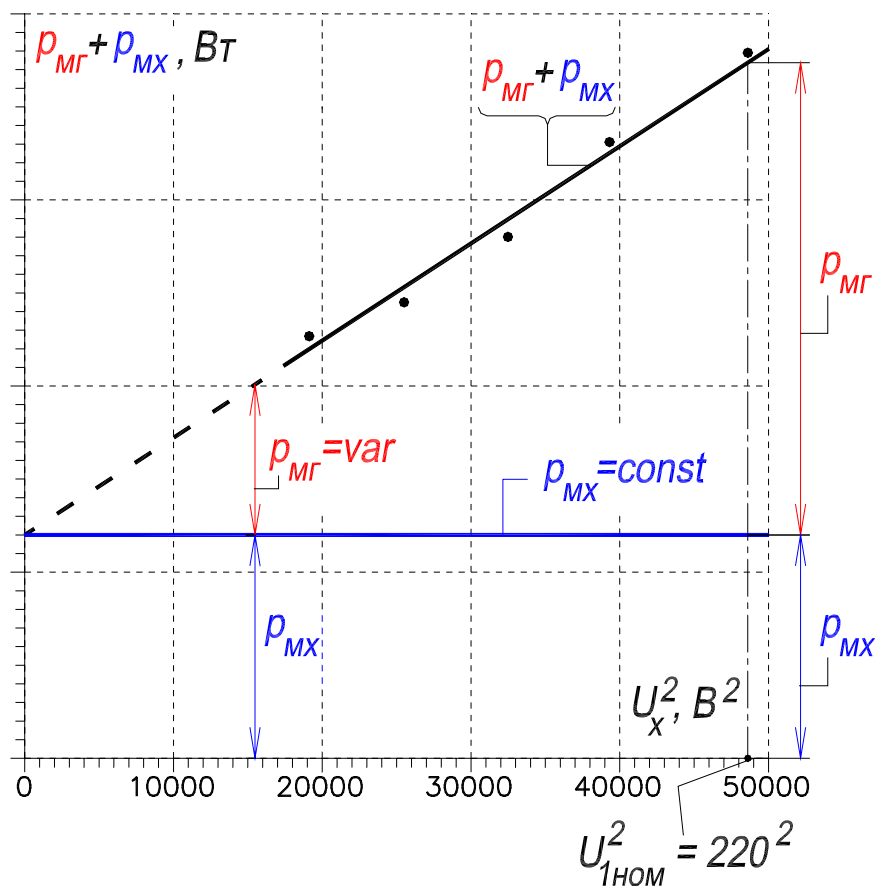


Рис.2.2. Разделение механических и магнитных потерь

### 4.3. Опыт короткого замыкания

В опыте короткого замыкания асинхронного двигателя обмотку статора питают **пониженным напряжением при заторможенном роторе** и замкнутой накоротко на контактных кольцах обмотке ротора (см. [рис.2.1](#)).

Если в качестве тормозного устройства используется электромагнитный тормоз, то затормаживание ротора осуществляется посредством шпильки, которая вставляется в диск тормоза; если же в качестве тормозного устройства используется электродвигатель постоянного тока, то затормаживание ротора осуществляется посредством тросика, который закрепляется на болт в муфте.

В процессе опыта короткого замыкания измеряют следующие величины: **подведенное линейное (фазное) напряжение, линейный ток статора и потребляемую мощность.**

Потенциал-регулятор устанавливается в положение соответствующее **минимальному напряжению**. К обмотке статора подключается вольтметр с пределом измерения  $150 В$  (вольтметр  $PVI$ ). После включения магнитного пускателя  $QF1$  потенциал-регулятором плавно увеличивают напряжение на зажимах

двигателя, устанавливая значение **линейного** тока короткого замыкания  $I_K$  примерно равным  $1,1I_{НОМ} \approx 13A$ . Затем уменьшая ток (с шагом  $1A$ ) снимают характеристики короткого замыкания. Замеры производят до тех пор, пока возможно фиксировать величину напряжения  $U_K$ . Учитывая, что в режиме короткого замыкания мощности и токи по фазам симметричны, замеры производят в одной фазе, например в фазе  $C1-C4$  (из методических соображений будем обозначать эту фазу символами  $A-X$ ). Результаты замеров записываются в **табл. 2.3** (необходимо произвести один из замеров **при номинальном значении линейного тока**  $I_K = I_{НОМ} = 11,5A$ ). По данным опыта строятся характеристики короткого замыкания  $I_K, P_K, \cos \varphi_K = f(U_K)$ .

Таблица 2.3

Измерение			Расчет	
$U_K$	$I_{AK}$	$P_{AK}$	$P_K$	$\cos \varphi_K$
$B$	$A$	$Bm$	$Bm$	-

Расчетные величины определяются в следующем порядке:

1) Потери короткого замыкания и коэффициент мощности определяются по формулам:

$$P_K = 3P_{AK}, \quad (9)$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3}U_K I_{AK}}. \quad (10)$$

2) Для построения круговой диаграммы рассчитываются **фазный** ток короткого замыкания  $I_{KH}$  и потери короткого замыкания  $P_{KH}$ , соответствующие номинальному напряжению обмотки статора  $U_{НОМ} = 220B$ , по следующим формулам:

$$I_{KH} = I_K (U_{НОМ} / U_K) / \sqrt{3}, \quad (11)$$

где  $I_K = 11,5A$  - **линейный** ток короткого замыкания, равный номинальному значению;  $U_K$  - напряжение короткого замыкания, соответствующее току  $I_K$ ;

$$P_{KH} = 3P_K (I_{KH} / I_K)^2, \quad (12)$$

где  $P_K$  - потери короткого замыкания при токе  $I_K = 11,5A$ .

#### 4.4. Опыт определения рабочих характеристик

Включить в цепь ротора пусковой реостат  $RR_n$  и установить его в положение “Пуск”; устранить затормаживание ротора и подсоединить к обмотке статора вольтметр с пределом измерения  $250\text{ В}$ ; установить потенциал-регулятором номинальное напряжение  $U_{I_{НОМ}} = 220\text{ В}$  (вольтметр  $PVI$ ) и осуществить пуск двигателя. Включить прибор для измерения частоты вращения ротора. Тормозное устройство (электромагнитный тормоз или **электродвигатель постоянного тока**, см. рис. 2.1) необходимо подключить к источнику постоянного тока. Реостатом  $RR_{p2}$  в цепи якоря электродвигателя постоянного тока (или в цепи электромагнитного тормоза) следует отрегулировать тормозной момент таким образом, чтобы асинхронный двигатель потреблял из сети номинальный ток (его линейное значение составляет  $11,5\text{ А}$ ). Затем, снижая тормозной момент так, чтобы ток двигателя уменьшался с шагом в  $1,0\text{ А}$  до значения тока холостого хода, снимают рабочие характеристики. Напряжение в процессе опыта потенциал-регулятором поддерживают равным номинальному. Результаты замеров по фазам записывают в табл. 2.4 и строят рабочие характеристики двигателя  $I_1, P_1, M, \cos \varphi, \eta, s = f(P_2)$ .

Таблица 2.4

Измерение								Расчет							
$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_A$	$P_B$	$P_C$	$I_a^{1)}/M^{2)}$	$n$	$s$	$I_1$	$P_1$	$M$	$P_2$	$\eta$	$\cos \varphi$	
$A$	$A$	$A$	$Вт$	$Вт$	$Вт$	$A/кгс\cdot м$	$\frac{об}{мин}$	-	$A$	$Вт$	$Н\cdot м$	$Вт$	-	-	

Примечание: <sup>1)</sup>  $I_a$  - ток якоря двигателя постоянного тока, <sup>2)</sup>  $M$  - момент на валу асинхронного двигателя, созданный электромагнитным тормозом.

Расчетные величины определяются в следующем порядке:

1) Скольжение ротора двигателя:

$$s = (n_1 - n) / n_1, \quad (13)$$

где  $n_1 = 60 f_1 / p = 60 \cdot 50 / 2 = 1500\text{ об/мин}$  – синхронная частота вращения поля.

Если в процессе опыта измерялось скольжение, то рассчитывают частоту вращения ротора

$$n = n_1(1 - s), \text{ об/мин}, \quad (14)$$



где величина скольжения  $s$  принимается в долях единицы.

2) Ток обмотки статора (линейное значение):

$$I_1 = (I_A + I_B + I_C)/3, \text{ A.} \quad (15)$$

3) Активная мощность потребляемая двигателем:

$$P_1 = P_A + P_B + P_C, \text{ Вт.} \quad (16)$$

4) Величина тормозного момента:

а) для электромагнитного тормоза определяется по формуле:

$$M, \text{ Н} \cdot \text{ м} = 9,80665 \cdot (M, \text{ кгс} \cdot \text{ м});$$

б) для электродвигателя двигателя постоянного тока определяется по зависимости  $M = f(I_a)$ , которая приведена на лабораторном стенде.

5) Полезная механическая мощность на валу двигателя:

$$P_2 = 0,1047 M n, \text{ Вт.} \quad (17)$$

6) Коэффициент полезного действия двигателя:

$$\eta = P_2/P_1. \quad (18)$$

7) Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = P_1/\sqrt{3}U_{\text{ном}}I_1. \quad (19)$$

#### 4.5. Пуск двигателя при несимметрии цепи ротора

Пуск двигателя осуществляется в следующей последовательности: 1) *размыкают* цепь одной фазы обмотки ротора; 2) *выводят* пусковой реостат  $RR_n$ ; 3) устанавливают потенциал-регулятором номинальное напряжение обмотки статора; 4) включают магнитный пускатель  $QF1$  и записывают в *табл.2.5* значения напряжения  $U_1$  и тока  $I_1$  обмотки статора, а также частоты  $n$  вращения ротора; 5) вводят пусковой реостат  $RR_n$  и еще раз записывают в *табл.2.5* значения напряжения и тока обмотки статора, а также частоты вращения ротора.

Таблица 2.5

Состояние пускового реостата $RR_n$							
Выведен				Введен			
$U_1$	$I_1$	$n$	$s$	$U_1$	$I_1$	$n$	$s$
$B$	$A$	об/мин	-	$B$	$A$	об/мин	-

Значение скольжения  $s$  рассчитывают по формуле (13).

Из-за несимметрии цепи ротора происходит деформация зависимости  $M = f(s)$ : возникает провал в кривой момента в зоне скольжения  $s = 0,5$ . Это явление называется эффект Гёргеса (Görges) {см. в [10] с. 170...176}.

## 4.6. Построение круговой диаграммы по данным опытов холостого хода и короткого замыкания

### 4.6.1. Перечень необходимых данных

Для построения круговой диаграммы с целью проверки гарантированных значений: коэффициента полезного действия  $\eta$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и скольжения  $s$  при номинальной нагрузке необходимы следующие данные.

1) **Фазное** значение тока холостого хода  $I_{\phi x}$  при номинальном напряжении  $U_1 = U_{1ном} = 220 В$  и номинальной частоте  $f_1 = f_{1ном}$  (см. табл. 2.2 и формулу (3)) {считаем, что ток **реального холостого хода**  $I_{\phi x}$  и ток **идеального холостого хода**  $I_0$  равны,  $I_0 \approx I_{\phi x}$ }.

2) Потери холостого хода  $P_x$  при номинальном напряжении  $U_1 = U_{1ном}$  и номинальной частоте  $f_1 = f_{1ном}$  (см. табл. 2.2).

3) Разность между потерями холостого хода и механическими потерями  $(P_x - P_{мх})$  при номинальном напряжении  $U_1 = U_{1ном}$  и номинальной частоте  $f_1 = f_{1ном}$  (см. табл. 2.2).

4) **Фазное** значение тока короткого замыкания  $I_{кн}$  при номинальном напряжении  $U_1 = U_{1ном}$  (см. формулу (11)).

5) Потери короткого замыкания  $P_{кн}$  при номинальном напряжении  $U_1 = U_{1ном}$  (см. формулу (12)).

6) Сопротивление фазы обмотки статора  $R_{l(75^\circ)}$ , приведенное к расчетной рабочей температуре (см. формулу (7)).

Значения величин перечисленных в п.п. 1) – 6) заносятся в табл.2.6.

Таблица 2.6

$m_i$	$m_p$	$\frac{I_0 \approx I_{\phi x}}{O_1O}^{1)}$	$\frac{P_x}{O'O''}^{1)}$	$\frac{P_x - P_{мх}}{O'O}$	$\frac{I_{кн}}{O_1K}$	$\frac{P_{кн}}{KH_1}$	$R_{l(75^\circ)}$
$A/см$	$Вт/см$	$\frac{A}{см}$	$\frac{Вт}{см}$	$\frac{Вт}{см}$	$\frac{A}{см}$	$\frac{Вт}{см}$	$Ом$

П р и м е ч а н и е: <sup>1)</sup> Ниже дробной черты приведены обозначения отрезков длина которых в масштабе тока  $m_i$  (или в масштабе мощности  $m_p$ ) соответствует значениям тока (или мощности); значения длин этих отрезков рас-

считываются после выполнения *n.n. 1) и 2) раздела. 4.6.2* и затем записываются в нижнюю часть ячеек.

#### ***4.6.2. Последовательность построения упрощенной круговой диаграммы***

Построение круговой диаграммы (рис. 2.3) ведут на листе миллиметровой бумаги формата А4 следующим образом (все данные см. в табл. 2.6).

1) Из точки  $O_1$  проводят оси абсцисс и ординат. Ось ординат соответствует фазному напряжению  $U_{1\phi}$  обмотки статора;

2) Выбирают масштаб тока  $m_i, A/cm$  (*рекомендуется принять масштаб тока  $m_i$  в диапазоне 1,5...2,0 A/cm*);

3) Определяют масштаб мощности по формуле

$$m_p = m_i 3U_{1\phi_{ном}} = m_i 3 \cdot 220, Вт/см ;$$

4) Строят точку идеального ( $s=0$ ) холостого хода  $O$  по фазному току  $I_{\phi x}$  (отрезок  $O_1O$ ) и потерям  $P_x - p_{мх}$  (отрезок  $O'O$ ).

Для построения проводят прямую  $OD$  параллельно оси абсцисс на расстоянии  $O'O$  от оси. Затем из точки  $O_1$  раствором циркуля  $O_1O$  отсекают эту прямую в точке  $O$ , которая и является точкой идеального холостого хода. Проводят линию  $O_1O$ , которую считают соответствующей току идеального холостого хода  $I_0$ ;

5) Строят точку короткого замыкания  $K$  по фазному току  $I_{кн}$  (отрезок  $O_1K$ ) и потерям  $P_{кн}$  (отрезок  $KN_1$ ).

Для построения проводят прямую параллельно оси абсцисс на расстоянии  $KN_1$  от оси. Затем из точки  $O_1$  раствором циркуля  $O_1K$  отсекают эту прямую в точке  $K$ , которая и является точкой короткого замыкания ( $s = 1,0$ ). Проводят линию  $O_1K$ ;

6) Проводят отрезок  $OK$ , который соответствует току  $-I''_{2кн}$  Г-образной схемы замещения при скольжении  $s = 1$ . Из середины отрезка  $OK$  восстанавливают перпендикуляр (*пунктирная линия*) до пересечения с линией  $OD$  в точке  $C$ . Через точки  $O$  и  $K$  проводят окружность с центром в точке  $C$ , которая и является годографом векторов тока статора  $I_1$  и ротора  $-I''_2$ ;

7) Строят точку реального холостого хода  $O''$  по потерям  $P_x$  (отрезок  $O'O''$ ). Точка  $O''$  расположена на одной вертикали с точкой идеального холостого хода  $O$  выше оси абсцисс  $O_1X$  на величину отрезка  $O'O''$ . Проводят линию  $O_1O''$ , которая соответствует току реального холостого хода  $I_{\phi x}$ . Проводят линию  $O''K$ ;

8) Проводят под углом  $\gamma$  прямую  $OB$ , точка  $B$  соответствует скольжению  $s = \pm\infty$ , при этом

$$\operatorname{tg} \gamma = D_a R_{I(75^\circ)} / U_{I\phi_{ном}}$$

где  $D_a$  - диаметр круговой диаграммы (отрезок  $OD$ ), выраженный в амперах ( $D_a = m_i OD$ );

9) Строят шкалу коэффициента мощности:

Проводят дугу (пунктирная линия) радиусом  $IO$  см с центром в точке  $O_1$  до пересечения с осью ординат в точке  $Y$ .

Линия  $O_1Y$  является шкалой коэффициента мощности  $\cos \varphi$ .

10) Строят шкалу скольжений:

а) проводят касательную  $Oj$  в точке  $O$  со скольжением  $s = 0$ ;

б) проводят линию  $jm$  параллельно линии  $OB$  на таком расстоянии, чтобы отрезок  $jm$  (он расположен между линией  $Oj$  и продолжением отрезка  $OK$ ) удобно делился на 100 частей;

в) линия  $jm$  является шкалой скольжения.

На этом построение круговой диаграммы заканчивается.

На годографе векторов токов статора и ротора имеются три характерные точки  $O$ ,  $K$  и  $B$ , которые соответствуют значениям скольжения  $s = 0$ ;  $1$  и  $\pm\infty$  и делят окружность на три части, соответствующие **двигательному**, **генераторному** и тормозному режимам работы асинхронной машины (см. [рис.2.3](#)).

#### **4.6.3. Определение по круговой диаграмме номинальной точки, мощностей и потерь мощности двигателя**

1) **Определение на круговой диаграмме точки  $N$ , которая соответствует номинальному режиму работы двигателя:**

**а)** от прямой  $O''K$  перпендикулярно диаметру  $OD$  откладывают на диаграмме номинальную мощность электродвигателя  $P_{2ном}$  в виде отрезка  $Nn_1$ , определяемого из выражения

$$Nn_1 = P_{2ном} / m_p,$$

где мощность  $P_{2ном}$ , Вт берется из паспорта электродвигателя.

**б)** продлевают отрезок  $Nn_1$  до пересечения с осью абсцисс в точке  $L$ . Обозначают на отрезке  $NL$  точки  $n_2, n_3$  и  $n_4$ .

**2) Определение на круговой диаграмме мощностей двигателя** (при оформлении отчета по лабораторной работе вычисления в соответствии с данным пунктом **2)** не производить):

**а)** линии  $O_1E$ ,  $OB$ ,  $OK$  и  $O''K$  круговой диаграммы называются линиями первичной  $P_1$ , электромагнитной  $P_{эм}$ , механической  $P_{мх}$  и вторичной  $P_2$  мощностей (линия  $OB$  также называется линией электромагнитного момента);

**б)** значения мощностей  $P_{1ном}$ ,  $P_{мх}$ ,  $P_{эм}$  и  $P_{2ном}$ , Вт при номинальном режиме двигателя пропорциональны соответственно отрезкам  $NL$ ,  $Nn_2$ ,  $Nn_3$  и  $Nn_1$ , см, причем

$$P_{1ном} = m_p NL, \quad P_{мх} = m_p Nn_2, \quad P_{эм} = m_p Nn_3, \quad P_{2ном} = m_p Nn_1;$$

**в)** для определения значений мощностей  $P_1$ ,  $P_{эм}$ ,  $P_{мх}$  и  $P_2$ , Вт при различных значениях скольжения в диапазоне  $0,0 < s < 1,0$ , например при  $s = 0,3$ , (то есть при не номинальном режиме) проводят из точки  $O$  отрезок до точки  $s = 0,3$  на шкале скольжения. Фиксируют на дуге  $OO''K$  точку пересечения с этим отрезком; опускают из этой точки перпендикуляр на ось абсцисс; обозначают на нем точки пересечения с вышеуказанными линиями мощностей и рассчитывают значения мощностей по формулам, приведенным в п. б). Аналогично определяются значения мощностей при других значениях скольжения (построения соответствующие данному пункту на рис.2.3 не показаны).

**3) Определение на круговой диаграмме потерь мощности в двигателе** (при оформлении отчета по лабораторной работе вычисления в соответствии с данным пунктом **3)** не производить) :

**а)** значения электрических потерь мощности  $p_{э1}$  и  $p_{э2}$ , Вт в обмотке статора и в обмотке ротора при номинальном режиме двигателя пропорциональны соответственно составляющим  $n_3n_4$  и  $n_2n_3$ , см отрезка  $NL$ , причем

$$P_{\varepsilon 1} = m_p \cdot n_3 n_4, \quad P_{\varepsilon 2} = m_p \cdot n_2 n_3;$$

б) значения суммы механических и добавочных потерь мощности  $P_{мх} + P_{\delta б}$ , Вт в при номинальном режиме двигателя пропорциональны составляющей  $n_1 n_2$ , см отрезка  $NL$ , причем

$$P_{мх} + P_{\delta б} \approx m_p \cdot n_1 n_2;$$

в) значения суммы магнитных потерь  $P_{мг}$  и электрических потерь мощности в обмотке статора от тока идеального холостого хода (они постоянны и равны разности  $P_x - P_{мх}$ , Вт) при номинальном режиме двигателя пропорциональны составляющей  $n_4 L = OO'$ , см отрезка  $NL$ , причем

$$P_x - P_{мх} = m_p \cdot n_4 L;$$

г) определение значений потерь мощности при не номинальном режиме двигателя выполняется на основе построений, описанных в п.2) в), а также формул, приведенных в п.п. 3) а) б) в).

#### **4.6.4. Определение по круговой диаграмме значений коэффициента мощности, коэффициента полезного действия и скольжения**

**1) Определение коэффициента мощности  $\cos \varphi$  при номинальной мощности двигателя  $P_{2ном}$ :**

а) проводят линию  $O_1 N$  и продлевают ее до пересечения с дугой (точка  $P$ ), служащей для определения коэффициента мощности. Опускают перпендикуляр из этой точки на шкалу коэффициента мощности;

б) коэффициент мощности  $\cos \varphi_{ном}$  определяется по шкале коэффициента мощности.

**2) Определяют скольжения  $s$  при номинальной мощности двигателя  $P_{2ном}$ :**

а) проводят линию  $ON$ . Точка пересечения этой линии со шкалой скольжения определяет скольжение  $s_{ном}$  при номинальной мощности двигателя.

**3) Определение коэффициента полезного действия двигателя  $\eta$  при номинальной мощности двигателя:**

КПД двигателя подсчитывается по методу отдельных потерь по формуле

$$\eta = 1,0 - \Sigma p / P_{1ном}$$

где  $\Sigma p = p_{\Delta 1} + p_m + p_{мх} + p_{\Delta 2} + p_{\Delta б}$  - сумма всех потерь в двигателе;

$p_{\Delta 1} = 3I_{1\phi_{ном}}^2 R_{l(75^\circ)}$  - электрические потери в обмотке статора; номинальный фазный ток в обмотке статора определяется из круговой диаграммы как  $I_{1\phi_{ном}} = m_i O_1 N$ ;

$p_{мг}$  и  $p_{мх}$  - магнитные (в стали) и механические потери (см. [табл.2.2, графа Расчет](#));

$p_{\Delta 2} = s_{ном} P_{\Sigma м} = s_{ном} (P_{1ном} - p_{мг} - p_{\Delta 1})$  - электрические потери в обмотке ротора; скольжение  $s_{ном}$  определено из круговой диаграммы (см. [п. 2](#));

$p_{\Delta б} = 0,005 P_{1ном}$  - добавочные потери;

$P_{1ном}$  - потребляемая из сети мощность определяется из круговой диаграммы как  $m_p LN$ .

Заносятся в [табл.2.7](#) и сопоставляются следующие значения коэффициента мощности, коэффициента полезного действия и скольжения: а) гарантированные заводом – изготовителем ([приводятся в паспорте двигателя](#)); б) определенные по круговой диаграмме ([см. п. 4.6.4](#)); в) полученные. на основе опыта снятия рабочих характеристик ([см. п. 4.4](#)).

Таблица 2.7

Величина определена	cos φ	s	η
	-	-	-
по паспорту двигателя (гарантированное значение)	0,82	0,087	0,78
из круговой диаграммы			
на основе опыта снятия рабочих характеристик ( <a href="#">см. табл. 2.4</a> )			

**4.6.5. Определение по круговой диаграмме максимального электромагнитного момента, характеристик  $s = f(M_{эм})$ ,  $s = f(I_1)$  и кратностей пускового момента и пускового тока**

**1) Определение электромагнитного момента при номинальной мощности двигателя:**

Электромагнитный момент  $M_{ном}$  пропорционален отрезку  $Nn_3$

$$M_{ном} = m_m Nn_3,$$

где  $m_m = p \cdot m_p / 2\pi f_1$ , Н·м/см – масштаб момента,  $p = 2$  – число пар полюсов двигателя,  $f_1 = 50$  Гц;

**2) Определение максимального электромагнитного момента:**

**а)** Максимальный электромагнитный момент  $M_{max}$  пропорционален отрезку  $N'n'_3$ . Для нахождения этого отрезка необходимо провести к годографу токов касательную параллельно линии электромагнитной мощности  $OB$ , и из точки касания  $N'$  опустить перпендикуляр на диаметр  $OD$ . Пересечение перпендикуляра с линией  $OB$  определяет точку  $n'_3$

$$M_{max} = m_m N'n'_3;$$

**б)** Кратность максимального электромагнитного момента (перегрузочная способность двигателя) определяется отношением

$$k_m = M_{max} / M_{ном} = N'n'_3 / Nn_3 .$$

**3) Определение пускового электромагнитного момента**

**а)** Пусковой электромагнитный момент  $M_n$  пропорционален отрезку  $Kn''_3$ . Пересечение перпендикуляра  $KH_1$  к диаметру  $OD$  с линией электромагнитной мощности  $OB$  определяет точку  $n''_3$

$$M_n = m_m Kn''_3;$$

**б)** Кратность пускового электромагнитного момента определяется отношением

$$k_n = M_n / M_{ном} = Kn''_3 / Nn_3 .$$

**4) Определение пускового тока обмотки статора**

**а)** Пусковой ток обмотки статора  $I_{1n}$  пропорционален отрезку  $O_1K$

$$I_{1n} = m_i O_1K ;$$



б) Кратность пускового тока определяется отношением

$$k_i = I_n / I_1 \phi_{ном} = O_1 K / O_1 N.$$

**5) Определение характеристики  $s = f(M_{эм})$**

Задаваясь разными значениями скольжения двигателя (см. табл. 2.8), необходимо определить по круговой диаграмме соответствующие им значения электромагнитного момента. Для определения значений момента необходимо произвести построения подобные описанным в [разделе 4.6.3, п. 2\) в\)](#) и выполнить расчеты подобные описанным в [разделе 4.6.5, п. 1\)](#). Результаты записываются в табл. 2.8.

Таблица 2.8

$s$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
$M_{эм}, Н·м$										
$I_1, А$										

На графике зависимости  $s = f(M_{эм})$  необходимо показать координаты точек соответствующих значениям номинального [{раздел 4.6.5, п.1}](#), максимального [{раздел 4.6.5, п.2}](#) и пускового моментов [{раздел 4.6.5, п.3}](#). На оси ординат необходимо показать кроме значений скольжения  $s$  также значения частоты вращения ротора  $n$ , выраженные в долях синхронной частоты вращения поля  $n_1$ , то есть  $n/n_1 = 1 - s$ .

**б) Определение характеристики  $s = f(I_1)$**

Задаваясь разными значениями скольжения двигателя (см. табл. 2.8), необходимо определить по круговой диаграмме соответствующие им значения тока обмотки статора  $I_1$ . Для определения значений этого тока осуществляют следующие действия: а) проводят из точки  $O$  лучи упирающиеся в шкалу скольжения в точках соответствующих значениям скольжения, приведенным в табл. 2.8; б) фиксируют на дуге  $OO''K$  точки пересечения этих лучей с дугой (см. на [рис.2.3](#) отрезок  $ON$  и точку  $N$ ); из точки  $O_1$  проводят отрезки в точки пересечения (см. отрезок  $O_1N$ ); длина полученных отрезков пропорциональна значениям тока статора.

Ток статора соответствующий точке  $N$  (и скольжению  $s_{ном}$ ) определяется как  $I_{I\phi_{ном}} = m_i O_1 N$ . Подобным образом определяются значения тока статора при других значениях скольжения. Результаты записываются в табл. 2.8.

На графике  $s = f(I_1)$  необходимо показать координаты точек соответствующих значений номинального и пускового тока {раздел 4.6.5, п.4}.

На рис. 2.4 приведены теоретические зависимости  $s = f(M_{эм})$  и  $s = f(I_1)$ , показаны характерные точки кривых и даны диапазоны значений кратностей  $k_n, k_i, k_m$  для двигателей общепромышленного назначения.

*При оценке точности нахождения значений кратностей пускового момента и тока, а также максимального момента (раздел 4.6.5), которые определены без учета насыщения стали магнитопровода, необходимо учитывать, что при больших токах и скольжениях параметры двигателя (сопротивления обмоток, см. Г-образную схему замещения) перестают быть постоянными, поэтому годограф токов будет более сложной линией, чем окружность.*

**З а м е ч а н и е.** Каждой точке на окружности токов, то есть на годографе векторов тока статора и ротора (см. рис. 2.3), соответствует уравнение равновесия МДС асинхронной машины

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2''), \quad (20)$$

где  $\dot{I}_1$  - вектор тока статора;  $\dot{I}_0$  - вектор тока статора при идеальном холостом ходе ( $s = 0,0$ ) двигателя;  $\dot{I}_2''$  - вектор приведенного тока ротора.

Для номинальной точки  $N$  векторам уравнения (20) соответствуют отрезки  $O_1 N, O_1 O$  и  $ON$ . Для точки короткого замыкания  $K$  - отрезки  $O_1 K, O_1 O$  и  $OK$  и т.д. Как видно из рис.2.3 диаметр годографа токов  $OD$  соответствует наибольшему значению приведенного тока ротора, который является чисто реактивным. Длина диаметра  $OD$  практически обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению короткого замыкания  $X_K = X_1 + X_2'$ . С увеличением скольжения вследствие насыщения зубцовой зоны магнитопровода это сопротивление уменьшается, а диаметр круговой диаграммы уже по этой причине увеличивается по сравнению с его значением при малых скольжениях и поэтому годограф токов будет более сложной линией, чем окружность.

## **5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать программу лабораторной работы, паспортные данные машины, схему испытаний, результаты опытов и теоретических расчетов в соответствующих таблицах, экспериментальные и расчетные графические зависимости, график разделения потерь, круговую диаграмму с соответствующими построениями.

## **6. Контрольные вопросы**

- 1) Перечислить условия образования вращающегося магнитного поля.
- 2) Объяснить принцип действия асинхронного двигателя.
- 3) Нарисовать и объяснить энергетическую диаграмму двигателя.
- 4) С какой целью в цепь ротора при пуске двигателя с фазным ротором включается пусковой реостат?
- 5) Изобразить и объяснить форму механической характеристики двигателя  $n = f(M)$ .
- 6) Изобразить  $\Gamma$ -образную схему замещения двигателя и объяснить физический смысл всех ее параметров.
- 7) Как изменить направление вращения ротора двигателя?
- 8) Объяснить эффект Гёргеса (Görge's).

*Круговая диаграмма асинхронной машины. Общие положения*

При изменении нагрузки асинхронной машины ее первичный  $I_1$  и вторичный  $I_2'$  токи изменяются по величине и по фазе. При  $U_1 = const$  и  $f_1 = const$  (например,  $U_1 = U_{1ном}$  и  $f_1 = f_{1ном}$ ) режим работы и нагрузка асинхронной машины однозначно определяются значением ее скольжения  $s$ . При изменении скольжения в пределах от  $s = +\infty$  до  $s = -\infty$  (см. рис. 2.3) конец вектора  $\dot{I}_1$  описывает непрерывную замкнутую кривую, которая называется *геометрическим местом* этого тока (или *годографом* вектора тока).

При условии постоянства всех параметров (**сопротивлений**)  $\Gamma$ -образной схемы замещения и  $U_1 = const$ ,  $f_1 = const$  годографом вектора тока  $\dot{I}_1$  является **окружность**, которая вместе с некоторыми другими построениями называется круговой диаграммой асинхронной машины (см. раздел 4.6.2).

Круговая диаграмма позволяет определить все электромагнитные величины, характеризующие режим работы машины при любом значении скольжения.

Однако условие постоянства параметров асинхронной машины общепромышленного назначения выполняется только в пределах нормальных и близких к ним рабочих режимов, когда  $I_1 \leq (1,0...1,5)I_{1ном}$  и скольжение  $s \leq (0,05...0,08)$ . Поэтому для этих машин круговая диаграмма справедлива только в области нормальных рабочих режимов.

Круговая диаграмма строится по данным **опытов холостого хода** (раздел 4.2) и **короткого замыкания** (раздел 4.3) асинхронного двигателя и используется в соответствии с ГОСТ 7217-79 для проверки гарантированных заводом - изготовителем значений: коэффициента полезного действия  $\eta$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и скольжения  $s$  при номинальной нагрузке (раздел 4.6.4), а также для определения максимального вращающего момента двигателя (раздел 4.6.5).

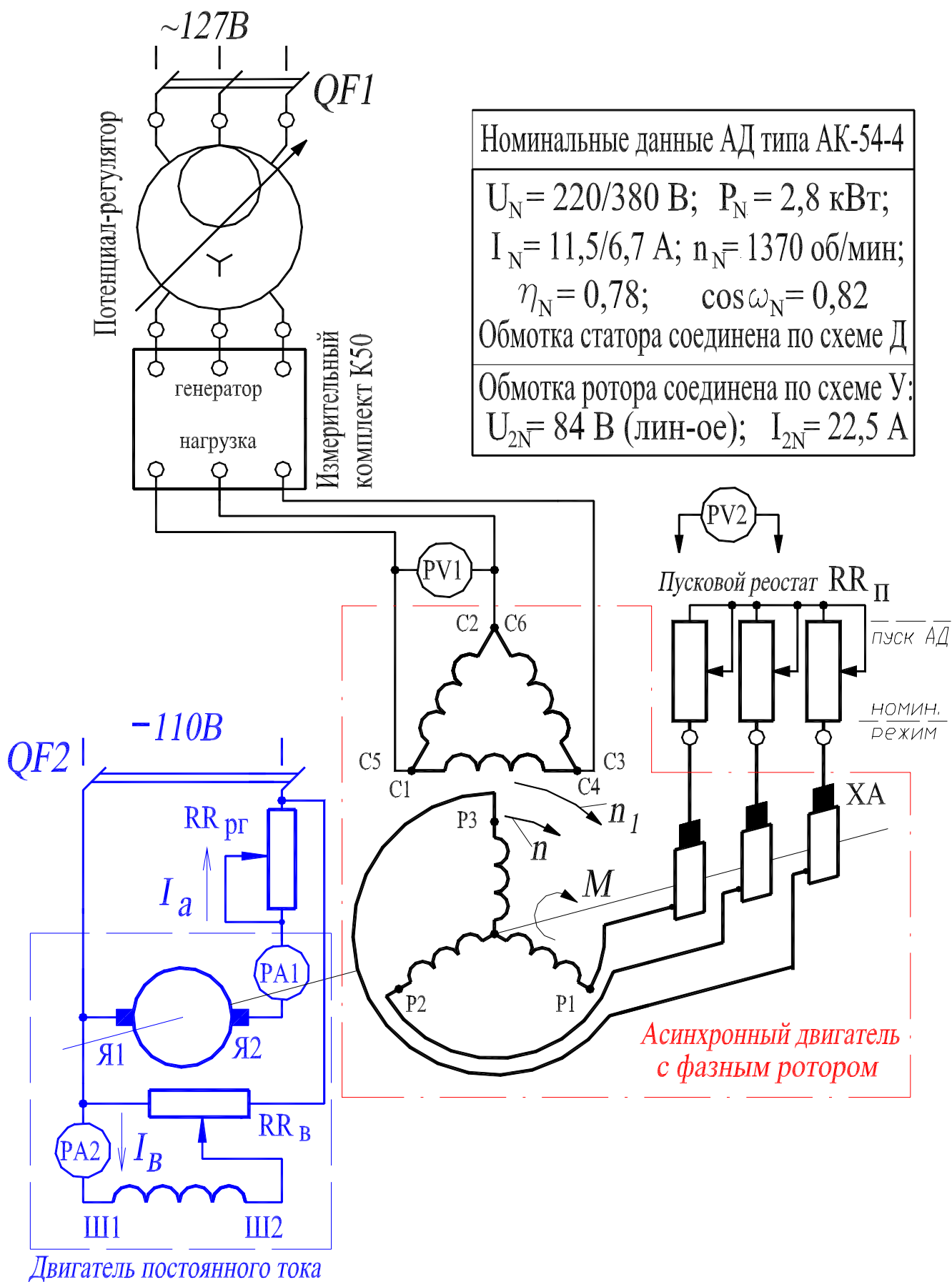


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки для исследования АД с фазным ротором

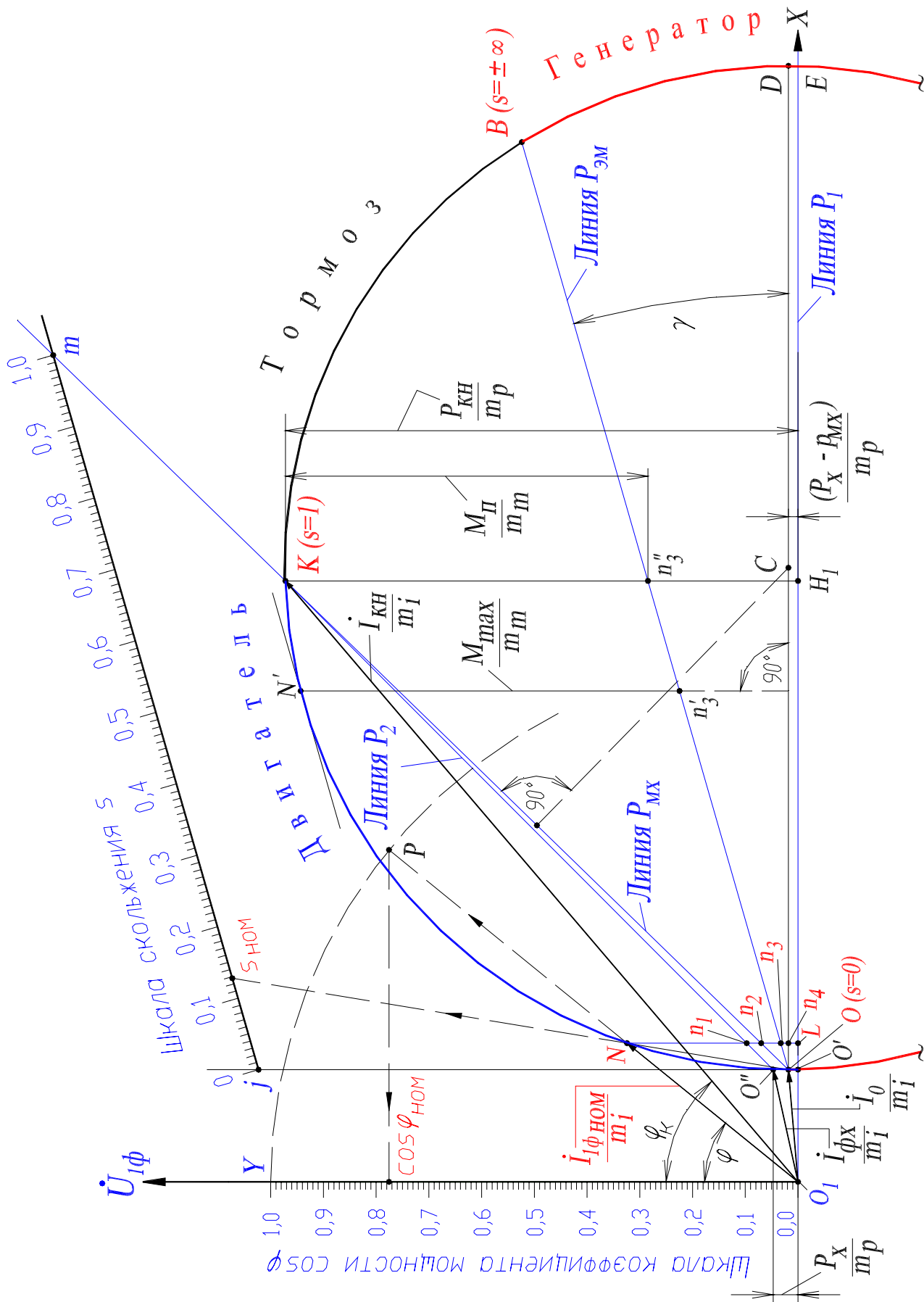


Рис. 2.3. Упрощенная круговая диаграмма асинхронной машины.  
(масштабы: тока  $m_i = 1,87$  А/см; мощности  $m_p = 1234$  Вт/см; момента  $m_m = 7,856$  Н.м/см;

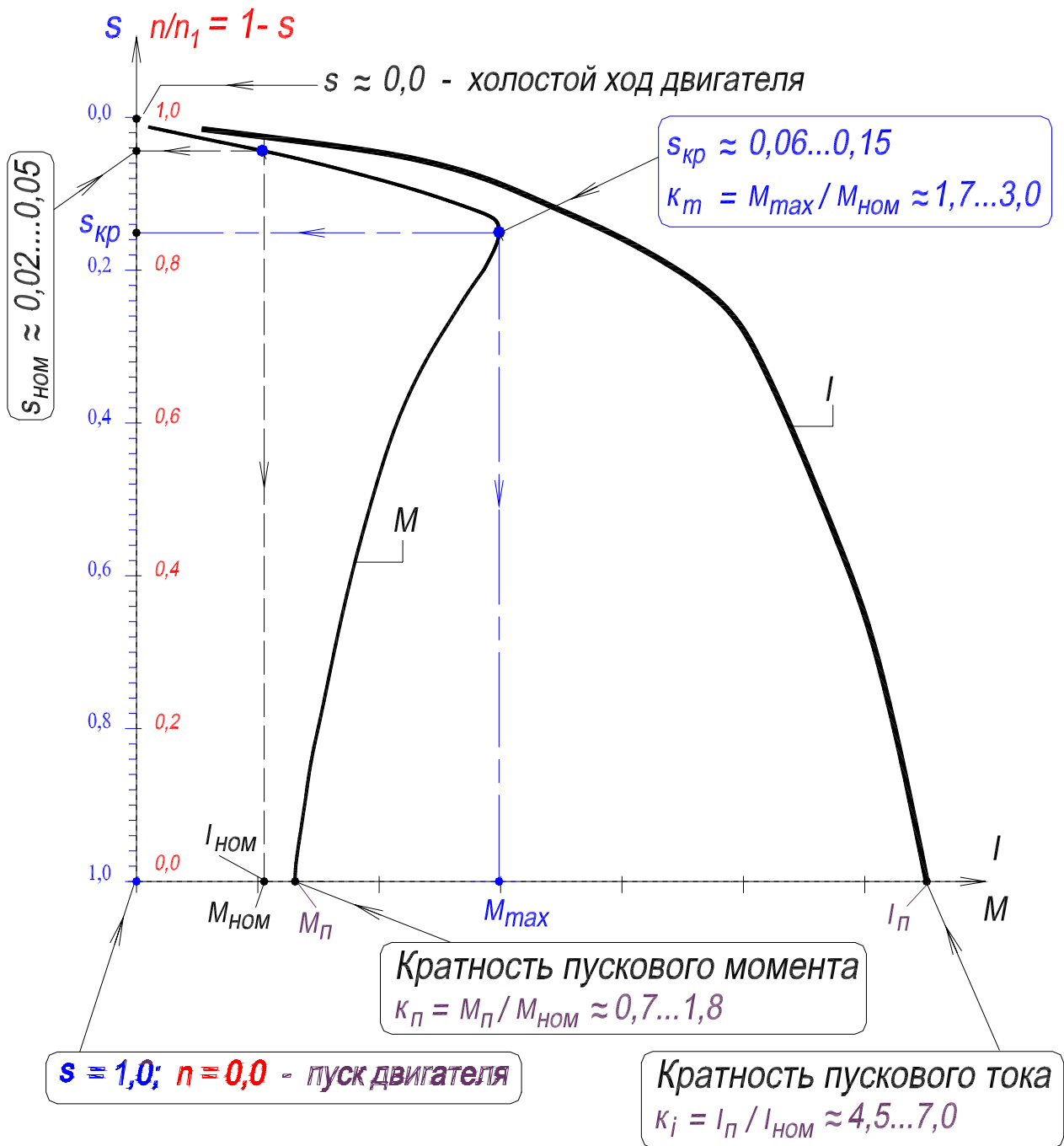


Рис. 2.4. Кривые электромагнитного момента  $M$  и тока статора  $I$  асинхронного двигателя