

17/8/14

Одобрено кафедрой  
«Электрификация  
и электроснабжение»

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОД  
АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ**

Руководство к лабораторным работам № 7 и 8  
для студентов III курса

специальностей

190402.65 АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ (ТС)

190401.65 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭЛ)

для студентов IV курса специальностей

190303.65 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ЖЕЛЕЗНЫХ  
ДОРОГ (ТЭ)

190301.65 ЛОКОМОТИВЫ (ЛТ)

190302.65 ВАГОНЫ (ВГ)

*2-е издание, стереотипное*

РОАТ

Москва – 2011

Составитель — канд. техн. наук, доц. В.В. Шумейко

---

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОД  
АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Руководство к лабораторным работам № 7 и 8

Редактор *Г.В. Тимченко*  
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

---

Тип. зак. <i>515</i>	Тираж 100 экз.
Подписано в печать 09.06.11	Гарнитура NewtonС
Усл. печ. л. 1,75	Формат 60×90 <sub>1/16</sub>

---

Редакционный отдел  
Информационно-методического управления РОАТ,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати  
Информационно-методического управления РОАТ,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

# 1. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ, ИХ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Асинхронной называется бесколлекторная машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора не равна скорости вращения магнитного поля. Основными частями машины являются статор и ротор, которые состоят из сердечников цилиндрической формы с пазами, в которых размещены обмотки. Трехфазная обмотка статора асинхронного двигателя подключается к трехфазной сети переменного тока. Сердечники статора и ротора набирают из листов, которые штампуют из электротехнической стали марок 2013, 2312, 2411 и др. толщиной 0,5 мм (для частоты 50 Гц).

Наибольшее число асинхронных двигателей общего применения единой серии 4А выпускается на номинальные напряжения 220 и 380 В, что соответствует соединению обмотки статора треугольником или звездой и указывается на заводском щитке двигателя.

Роторы асинхронных двигателей чаще всего имеют короткозамкнутую обмотку типа беличьей клетки или фазную обмотку. Пазы для короткозамкнутой обмотки имеют овальную, прямоугольную или фигурную форму, обеспечивающие улучшенные пусковые характеристики за счет вытеснения тока в стержнях беличьей клетки в период пуска. Беличья клетка выполняется обычно путем заливки пазов ротора алюминиевым сплавом и иногда в виде сварных конструкций с медными стержнями. С обеих сторон ротора стержни обмотки замыкаются алюминиевыми или медными кольцами, выполняемыми вместе с лопатками вентилятора.

Фазная обмотка ротора выполняется из изолированного медного провода и обычно соединяется в звезду с присоединением начал обмоток трех фаз к контактными кольцам, расположенным на валу машины на изолирующих втулках. Контактные кольца через неподвижные щетки связаны с пусковым или регулировочным реостатом. Двигатели с фазным ротором применяются для привода механизмов с тяжелыми условиями пуска и в крановых установках.

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*При подключении трехфазной обмотки статора к трехфазной сети в машине возникает вращающееся магнитное поле. Магнитное поле пересекает стержни обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Возникший в стержнях ротора ток при взаимодействии с магнитным потоком создает вращающий момент.*

Магнитное поле, возникающее в машине, вращается с частотой вращения, которую называют синхронной

$$n_1 = 60 f_1 / p,$$

где  $f_1$  — частота питающей сети;

$p$  — число пар полюсов обмотки статора.

Например, для одной пары полюсов при частоте сети  $f_1 = 50$  Гц частота вращения магнитного поля  $n_1 = 3000$  об/мин, а при  $p = 2$  —  $n_1 = 1500$  об/мин.

Под действием электромагнитного момента ротор двигателя вращается в том же направлении, что и магнитное поле, но с меньшей скоростью.

Относительная разность частот вращения магнитного поля и ротора называется скольжением

$$s = (n_1 - n) / n_1,$$

где  $n$  — частота вращения ротора.

Номинальное скольжение асинхронных двигателей нормального исполнения обычно составляет  $(0,01 \div 0,06)$ .

Значение синхронной скорости вращения  $n_1$  при соответствующем числе полюсов  $2p$  определяют по номинальной скорости вращения ротора  $n_H$ , указанной на заводском щитке двигателя (ближайшее большее значение к  $n_H$ ).

Для расчета и анализа зависимости электромагнитного момента от скольжения используют его выражение через электромагнитную мощность  $P_{эм}$ , передаваемую магнитным полем от статора к ротору:



$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = \frac{m_2 I_2^2 r_2 / s}{\Omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2' / s}{\Omega_1}, \quad (1)$$

где  $\Omega_1$  — угловая скорость вращения магнитного поля;

$m_2$  — число фаз обмотки ротора (при короткозамкнутом роторе  $m_2 = N_2$  — количество стержней беличьей клетки, у фазного ротора  $m_1 = 3$ );

$m_1$  — число фаз обмотки статора ( $m_1 = 3$ ),

$I_2' = I_2 \cdot (m_2/m_1) \cdot 1/k$  — приведенное к статору (по числам витков и фаз обмоток) действующее значение тока ротора;

$r_2$  — активное сопротивление фазы обмотки ротора;

$r_2' = r_2 \cdot (m_2/m_1) \cdot k^2$  — приведенное к статору активное сопротивление ротора;

$k = k_{об1} w_1 / (k_{об2} w_2)$  — коэффициент трансформации фазных ЭДС статора и ротора ( $w_1, w_2$  — числа витков фаз;  $k_{об1}, k_{об2}$  — обмоточные коэффициенты, учитывающие распределение обмотки по окружности и укорочение и шага).

На основании уравнений для напряжений и МДС фазы ротора и статора составлена Т-образная схема замещения (рис. 1).

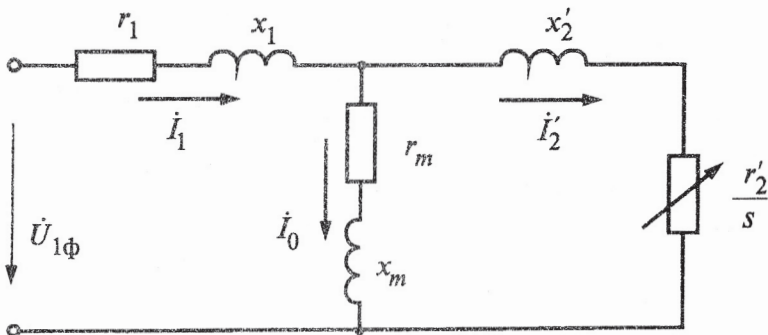


Рис. 1

Из схемы замещения при некоторых допущениях может быть получено следующее выражение для тока ротора

$$I'_2 = \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{c_1 r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2}}, \quad (2)$$

где  $c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_M}$ ;  $U_{1\Phi}$  — фазное напряжение статора.

При включении в цепь фазного ротора пускового или регулировочного реостата (сопротивления  $r_{\text{доб}}$ ) вместо  $r'_2$  подставляется  $r'_2 + r'_{\text{доб}}$ . При малых скольжениях, соответствующих нормальному рабочему режиму,

$$(c_1 r'_2 / s) \gg r_1, \text{ и } (c_1 r'_2 / s)^2 \gg (x_1 + c_1 x'_2)^2,$$

поэтому

$$M \approx m_1 U_{1\Phi}^2 \cdot s / c_1^2 r_2 \Omega_1,$$

то есть скольжение растет с увеличением момента и соответственно момента нагрузки на валу  $M_2 = M_c$  равного моменту сопротивления приводимого механизма.

Из общей формулы (1) для  $M$ , с учетом (2), следует, что при некотором значении скольжения  $s_k$  (критическом скольжении) электромагнитный момент равен максимальному  $M_{\text{max}}$ . Отношение  $M_{\text{max}}$  к номинальному электромагнитному моменту  $M_H$

$$k_M = M_{\text{max}} / M_H$$

называется перегрузочная способность двигателя и указывается в справочниках (каталогах).

При пуске двигателя в ход в первый момент времени ротор неподвижен и в его обмотке индуцируются большие ЭДС и ток. По принципу трансформаторной связи по обмотке статора проходит также большой пусковой ток. Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором нормального исполнения пусковой ток имеет пяти-семикратное значение по отношению к номинальному току.

В процессе пуска скорость вращения двигателя  $\Omega$  увеличивается в соответствии с уравнением движения

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M - M_C - M_0,$$

где  $M_C = M_2$  — статический момент (полезный вращающий момент на валу);

$M_0$  — тормозной момент, обусловленный собственными потерями двигателя;

$J$  — момент инерции вращающихся частей, приведенный к валу двигателя.

При увеличении  $\Omega$  (уменьшении  $s$ ) сопротивление двигателя увеличивается, и ток уменьшается. Для установившегося режима работы  $\frac{d\Omega}{dt} = 0$ , и уравнение движения принимает вид:

$$M = M_0 + M_2 = M_0 + M_C.$$

Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором может быть осуществлен прямым включением в сеть — при пусковом напряжении, равном номинальному  $U_{\Pi} = U_H$  и при пониженном напряжении. Если, например, при неизменном линейном напряжении сети обмотку статора двигателя включить в схему «звезда» вместо допускаемого по напряжению сети соединения треугольником, то при этом напряжение на фазах статора оказывается в  $\sqrt{3}$  меньше номинального. В этом случае действующее значение периодической составляющей начального пускового тока уменьшается примерно в 3 раза:

$$\frac{I_{\Pi\Delta}}{I_{\Pi Y}} = \frac{\sqrt{3}I_{\Phi\Delta}}{I_{\Phi Y}} = \frac{\sqrt{3}U_{\Phi\Delta}Z_{\Phi Y}}{U_{\Phi Y}Z_{\Phi\Delta}} = \frac{\sqrt{3}U_{\Pi\Delta}\sqrt{3}}{U_{\Pi Y}} = 3,$$

где  $Z_{\Phi\Delta}$ ,  $Z_{\Phi Y}$  — полные сопротивления на фазу двигателя при схемах соединения треугольник и звезда. Вместе с уменьшением начального пускового тока снижается и начальный вращающий момент, который пропорционален квадрату приложенного напряжения. Для уменьшения пусковых токов и снижения колебаний напряжения сети в момент пуска мощных асинхронных двигателей в некоторых случаях применяют реакторный пуск.

Свойства асинхронного двигателя могут быть выражены рабочими характеристиками, примерный вид которых показан на рис. 2.

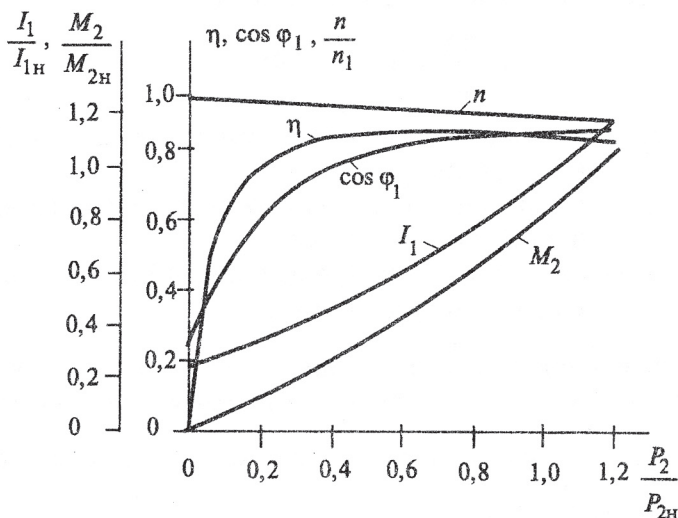


Рис. 2

Рабочие характеристики асинхронных двигателей могут быть определены методом прямого торможения или по расчетам (после определения параметров схемы замещения на основании опытов холостого хода и короткого замыкания).

При снятии характеристик асинхронного двигателя методом прямого торможения, его нагрузка осуществляется обычно с помощью электромагнитного тормоза или машины постоянного тока, работающей в режиме генератора.

Если испытуемый двигатель тормозится генератором и устройство для измерения момента на валу отсутствует, то для определения нагрузки двигателя необходимо измерять ток якоря генератора  $I_{ар}$  и его напряжение  $U_{ар}$ , а также знать отдельные виды потерь в генераторе. Нагрузка двигателя при этом регулируется путем изменения тока генератора. Полезную мощность двигателя в этом случае определяют по формуле:

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

где  $R_a$  — суммарное сопротивление цепи якоря генератора, указано на стенде;

$(P_{ст} + P_{мех})$  — сумма механических и магнитных потерь генератора, указана на стенде;

$P_r = U_{ar} I_{ar}$  — мощность, отдаваемая генератором.

Зная величину полезной мощности двигателя и частоту его вращения, можно определить момент на валу двигателя,  $H\cdot м$ ,

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} \approx 9,55 P_2 / n.$$

Основными частями электромагнитного тормоза являются стальной диск, укрепленный на валу двигателя, и электромагниты. При питании катушек электромагнитов постоянным током создается магнитное поле, индуцирующее во вращающемся стальном диске вихревые токи. В результате взаимодействия вихревых токов с магнитным полем возникает момент, величина которого регулируется изменением тока в катушках электромагнита.

Измерение вращающего момента двигателя осуществляют с помощью маятникового измерительного устройства по отклонению стрелки, прикрепленной к магнитопроводу и перемещающейся относительно неподвижной шкалы. В случае использования тормоза с устройством для измерения момента машины, мощность на валу испытуемого, двигателя, в Вт определяется по формуле:

$$P_2 = \Omega M_2 = (2\pi n / 60) \cdot M_2 \approx 0,105 M_2 n.$$

При холостом ходе двигателя ток статора определяется, главным образом, намагничивающим током, который тем больше, чем больше приложенное напряжение. С увеличением нагрузки двигателя увеличивается активная составляющая тока ротора, что вызывает соответствующий рост активной составляющей тока статора и увеличение коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$ .



КПД асинхронного двигателя равен отношению полезной мощности на валу  $P_2$  к подведенной из питающей сети переменного тока мощности  $P_1$ .

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

Максимальное значение КПД достигается при такой мощности  $P_2$ , когда условно-постоянные потери активной мощности (механические и магнитные) равны переменным потерям, пропорциональным квадратам токов в обмотках ротора и статора.

Коэффициент мощности или  $\cos\varphi_1$  может быть определен из выражения для мощности в трехфазной цепи  $P_0 = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + 3I_0^2 r_1$ .

Следует отметить, что для улучшения энергетических характеристик (КПД и  $\cos\varphi_1$ ) недогруженных асинхронных двигателей иногда включают их на пониженное напряжение. При этом уменьшаются величины ЭДС статора, потока и намагничивающего тока машины. Максимумы зависимостей  $\eta = f(P_2)$  и  $\cos\varphi_1 = f(P_2)$  при пониженном напряжении сдвигаются влево. Это улучшение характеристик для малых нагрузок объясняется уменьшением намагничивающего тока. Ухудшение этих характеристик с возрастанием нагрузки, до близкой к номинальной, вызывается увеличением скольжения и тока статора по сравнению с режимом номинального напряжения.

Опыт холостого хода при  $P_2 = 0$  проводят с целью снятия и построения характеристик холостого хода  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos\varphi_1 = f(U_1)$  и для расчета параметров  $r_m$ ,  $x_m$  схемы замещения (рис. 1). Подводимое при этом напряжение изменяют от  $0,5U_H$  до  $1,2U_H$  с помощью индукционного регулятора. Потребляемая мощность  $P_0$  идет на покрытие механических потерь, потерь в стали сердечников статора и ротора и электрических потерь в обмотке статора, так как электрические потери в обмотке ротора весьма малы и могут не учитываться:

$$P_0 = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + 3I_0^2 r_1.$$

Механические потери  $P_{\text{мех}}$  обусловлены трением в подшипниках, трением ротора о воздух и трением щеток о контактные кольца, если при работе двигателя щетки постоянно наложены на кольца, например, в двигателях с регулированием скорости вращения реостатом в цепи ротора или при реостатном пуске.

Механические потери можно считать постоянными, так как скорость вращения ротора изменяется незначительно, исключая регулируемые двигатели.

Потери мощности в стали  $P_{\text{ст}}$  обусловлены циклическим перемагничиванием стали сердечников статора и ротора и возникновением вихревых токов. При номинальной работе скольжение у асинхронных нерегулируемых двигателей не превышает 4–5%, поэтому частота ЭДС в роторе в 20 и более раз меньше частоты тока в статоре и соответственно потери мощности на перемагничивание и вихревые токи в роторе значительно меньше, чем в статоре. Уменьшение потерь  $P_{\text{ст}}$  достигается изготовлением сердечников из листовой электротехнической стали.

Характеристики, полученные из опыта холостого хода, показаны на рис. 3, а. Вычитая из мощности холостого хода  $P_0$  электрические потери  $P_{\text{озл}}$  в обмотке статора, для каждого значения  $U_1$ , получим сумму магнитных и механических потерь

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{мех}} = P_0 - P_{\text{озл}},$$

где  $P_{\text{озл}} = 3I_0^2 r_1$ .

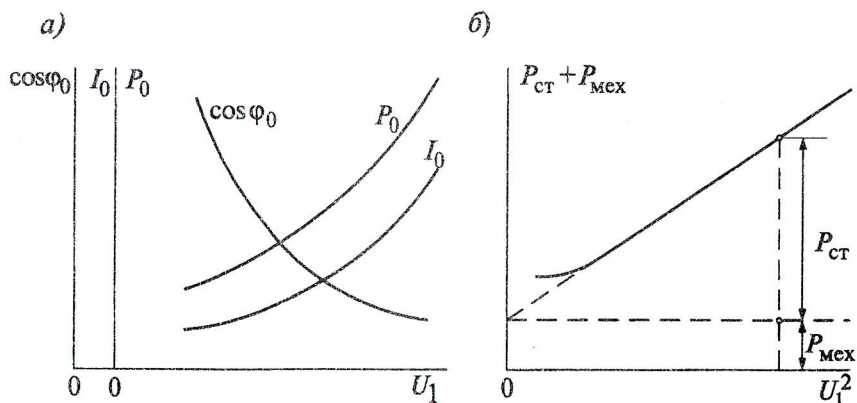


Рис. 3

Разделение этих потерь на  $P_{ст}$  и  $P_{мех}$  может быть произведено путем экстраполяции кривой

$$P_{ст} + P_{мех} = f(U_1^2)$$

до пересечения с осью ординат, как это показано на рис. 3, б. Точка пересечения касательной к кривой  $P_{ст} + P_{мех} = f(U_1^2)$  с осью ординат соответствует механическим потерям, так как, при  $U_1 = 0$  потери в стали равны нулю.

Опыт короткого замыкания, при  $n = 0$  и  $s = 1$ , проводят с целью снятия и построения характеристик короткого замыкания  $I_k, P_k, \cos\phi_k = f(U_k)$  и расчета параметров схемы замещения:  $r_1, r_2, x_1, x_2$ . При опыте короткого замыкания ротор машины должен быть заторможен, а сопротивление пускового реостата полностью выведено. При проведении опыта короткого замыкания следует иметь в виду, что значение сопротивления  $Z_k$  несколько меняется из-за насыщения зубцовой зоны при увеличении тока в обмотках статора и ротора. Это приводит к тому, что зависимость тока  $I_k$  от напряжения  $U_k$  в некоторых случаях заметно отклоняется от прямолинейной, причем сопротивление  $x_k$  вначале уменьшается, а затем остается практически постоянным (рис. 4). В этих случаях определение тока  $I_{кн}$  соответствующего номинальному напряжению, можно производить по формуле:

$$I_{кн} = \frac{0k(U_n - 0m)}{(0n - 0m)}$$

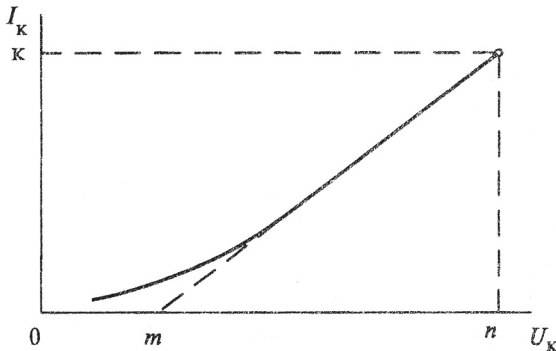


Рис. 4

Если зависимость  $I_k = f(U_k)$  прямолинейна, то отрезок  $Om$  будет равен нулю.

Потребляемая из сети мощность  $P_k$  расходуется на покрытие электрических потерь в обмотках статора и ротора. Напряжение  $U_k$  значительно меньше номинального  $U_H$  оно оценивается в процентах:

$$u_k = \left( \frac{U_{кн}}{U_H} \right) \cdot 100\%.$$

Обычно  $u_k = 15-25\%$  (при  $I_k = I$ ), а поэтому можно не учитывать ток  $I_M$  (см. рис. 1). Обработку полученных результатов в опыте короткого замыкания можно выполнить следующим образом:

Полное сопротивление короткого замыкания (на фазу статора и приведенного к нему ротора)

$$Z_k = \frac{U_{кф}}{I_{кф}}.$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_k = \frac{P_k}{3I_{кф}^2}.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}.$$

Предполагая Т-образную схему замещения симметричной, можно записать

$$r_k \approx 2r_1 \approx 2r_2' \text{ и } x_k \approx 2x_1 \approx 2x_2',$$

тогда

$$r_1 \cong \frac{r_k}{2}, \quad r_2 \cong \frac{r_k}{2k^2}, \quad x_1 \cong \frac{x_k}{2}, \quad x_2 \cong \frac{x_k}{2k^2}.$$

Активное сопротивление требуется привести к температуре  $75^\circ\text{C}$

$$r_{75} = \frac{r_{\theta}(75 + 235)}{(\theta_{\text{окр}} + 235)} \text{ (при медных проводниках обмоток),}$$

где  $r_{\theta}$  — активное сопротивление, при окружающей температуре  $\theta_{\text{окр}}$ .

Для беличьей клетки ротора из алюминиевого сплава

$$r_{75} = \frac{r_{\theta}(75^0 + 225^0)}{(\theta_{\text{окр}} + 225^0)}.$$

Полное сопротивление короткого замыкания при расчетной рабочей температуре  $75^{\circ}\text{C}$  будет

$$Z_{k75^0} = \sqrt{r_{k75^0}^2 + x_k^2}.$$

При изменении температуры меняется также значение коэффициента мощности, поэтому при  $75^{\circ}\text{C}$

$$\cos \varphi_{k75^0} = \frac{r_{k75^0}}{Z_{k75^0}}.$$

По результатам опытов холостого хода и короткого замыкания рассчитываются параметры схемы замещения (см. рис. 1):

$$x_1 \approx x'_2 \approx 0,5x_k \text{ из опыта КЗ для } I_k = (0,5+1)I_H;$$

$$r_m \approx \frac{P_{\text{ст}}}{3I_{\text{оф}}^2}, \quad x_m \approx x_0 - x_1, \quad Z_m = \sqrt{x_m^2 + r_m^2},$$

где  $x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$ ,  $r_0 \approx \frac{P_0}{3I_{\text{оф}}^2}$ ,  $Z_0 \approx \frac{U_{1\Phi, \text{н}}}{I_{\text{оф}}}$  из опыта холостого хода при номинальном фазном напряжении статора  $U_{1\Phi, \text{н}}$  и соответствующих значениях тока холостого хода  $I_{\text{оф}}$  и потерь мощности  $P_0$ .

Сопротивления асинхронного двигателя на одну фазу по схеме рис. 1:

$$\text{активное } r_{\text{дв}} = \text{Re}(Z_{\text{дв}}) = r_1 + r_{\text{эkv}} = r_1 + \frac{(r_2'/s) \cdot Z_M^2 + r_M Z_{2S}^2}{(r_M + r_2'/s)^2 + (x_M + x_2')^2};$$



индуктивное  $x_{дв} = \text{Im}(Z_{дв}) = x_1 + x_{экр} = x_1 + \frac{x_2' Z_M^2 + x_M Z_{2S}^2}{(r_M + r_2'/S)^2 + (x_M + x_2')^2}$ ,

где  $Z_{2S}^2 = (r_2'/S)^2 + x_2'^2$ ;

полное сопротивление

$$Z_{дв} = \sqrt{r_{дв}^2 + x_{дв}^2}.$$

Ток в фазе статора

$$I_{1\phi} = U_{1\phi} / Z_{дв},$$

а его фаза по отношению к  $U_{1\phi}$   $\varphi_1 = \arccos(r_{дв} / Z_{дв})$ .

Активная мощность, потребляемая из сети,  $P_1 = 3 U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1$ .

КПД двигателя  $\eta = P_2 / P_1$ .

При расчетах с целью сравнения с опытными данными значения  $s$ ,  $P_2$ ,  $U_{1\phi}$  принимаются по данным измерений.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов И.П. Электрические машины. — М.: Высшая школа, 2002.

2. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. В 2-х ч. — М.: Высшая школа, 1987.

3. Вольдек А.И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1988.

4. Орлов В.В., Шумейко В.В., Седов В.И. Электрические машины. Ч. I. Машины постоянного тока, трансформаторы: Конспект лекций. — М.: РГОТУПС, 2003. — 63 с.

5. Шумейко В.В., Орлов В.В., Седов В.И. Электрические машины и электропривод. Ч. II. Машины переменного тока: Конспект лекций. — М.: РГОТУПС, 2004. — 72 с.

6. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. — Л.: Энергоиздат, 1984.

7. Серебряков А.С., Шумейко В.В. МАТНСАД и решение задач электротехники: Уч. пос. для вузов ж.-д. транспорта. — М.: Маршрут, 2005. — 240 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

### Задание на лабораторную работу

1. Изучить теорию по рекомендуемой литературе.
2. Ознакомиться с конструкцией и паспортными данными двигателя.
3. Пустить в ход двигатель при соединении обмотки статора звездой и треугольником; измерить пусковые токи двигателя при обоих соединениях обмоток статора.
4. Снять и построить рабочие характеристики  $n$ ,  $I_1$ ,  $\cos\varphi_1$ ,  $\eta = f(P_2)$  при номинальном напряжении  $U = U_{1H}$  и при пониженном  $U_{1ф} = U_{1H} / \sqrt{3}$ , т.е. при соединении обмоток звездой.
5. Снять характеристики двигателя при неполнофазном режиме работы  $P_1$ ,  $I_1$ ,  $n = f(P_2)$  ( по указанию преподавателя).
6. Произвести обработку опытных данных и составить отчет установленной формы.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством двигателя. Записать паспортные данные двигателя. По номинальной частоте вращения двигателя  $n_n$  определить синхронную частоту вращения  $n_1$  (частоту вращения магнитного поля) и число пар полюсов двигателя  $2p$ ; номинальное скольжение  $s_H$  и номинальный момент  $M_{2H}$ . Номинальный момент на валу  $M_{2H}$  можно вычислить по формуле

$$M_{2H} = \frac{9,55P_H}{n_H}.$$

2. Собрать или проверить, уже собранную схему для испытаний двигателя, в соответствии с рис. 5. В схеме рис. 5 вместо трансформаторов тока (ТТ) и измерительных приборов можно

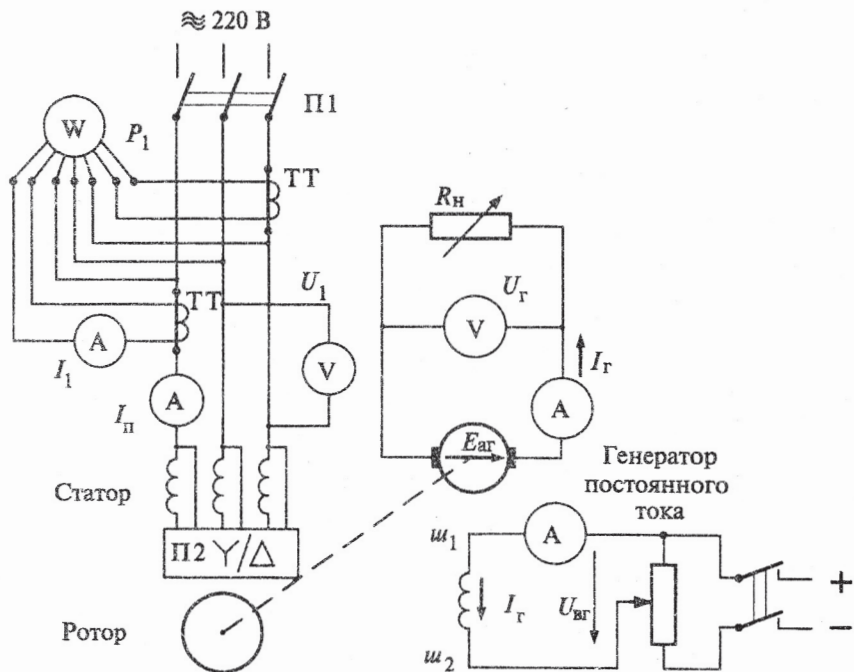


Рис. 5

использовать измерительные комплекты К-50, К-51 или К-505. При использовании в схеме трансформаторов тока (ТТ), на схеме рис. 5, установить их коэффициент трансформации  $k_{\text{ТТ}} = 50/5$ . При использовании комплектов К-50 и К-51 пуск двигателя проводить в положении переключателя на 50А. В случае использования комплекта К-505 переключатель должен быть в нулевом положении. Поставить переключатель П2 в нейтральное положение, включить магнитный пускатель П1 выключателем стенда.

3. Пустить в ход двигатель при соединении обмотки статора звездой, для чего перевести переключатель П2 в положение У и одновременно измерить пусковой ток по амперметру  $I_{\text{п}}$  (зафиксировать максимальное отклонение стрелки амперметра). Отключить двигатель, дать остановиться ротору и вновь пустить в ход при соединении обмотки статора треугольником. Измерить

пусковой ток  $I_{\Delta n}$  и записать значения пусковых токов  $I_{Yn}$  и  $I_{\Delta n}$  в табл. 1. Двигатель не останавливать.

Таблица 1

Измерено		Вычислено
$I_Y, A$	$I_{\Delta}, A$	$I_{\Delta}/I_Y$

Реверсирование двигателя — изменение направления вращения ротора — достигается переменной направления вращения магнитного потока статора. Для этого необходимо и достаточно изменить порядок чередования фаз токов обмотки статора переключением двух проводников, соединяющих статор с сетью (проводить только по указанию преподавателя).

#### 4. Снятие рабочих характеристик двигателя.

4.1. При соединении обмотки статора треугольником и работающем двигателе установить  $k_{\pi} = 10/5$ . Записать показания приборов при холостом ходе в табл. 2. Затем, нагружая двигатель с помощью генератора, записать показания приборов еще для четырех значений тока  $I_1$ , причем, последнее значение тока двигателя не должно превышать ток  $I_{1н}$  для соединения треугольником. Показания приборов для  $I_1$  и  $P_1$  умножить на  $n_{\pi\pi}$  (При нагрузке двигателя электромагнитным тормозом значение  $M_2$  перенести в раздел «измерено» табл. 2, исключив столбцы  $U_r$  и  $\dot{U}_{ar}$ ).

4.2. Разгрузить двигатель, и не останавливая, переключить обмотку статора на звезду. Также записать показания приборов при холостом ходе в табл. 2, а затем нагружать и записать показания приборов для четырех значений тока, не превышая номинального тока для соединения звездой. Измерения проводить при  $k_{\pi} = 5/5$ .

Таблица 2

Схема	Измерено						Вычислено				
	Двигатель				Генератор		$M_2,$ Нм	$P_2,$ Вт	$\eta$	$\cos\varphi$	$s$
	$U_1,$ В	$I_1,$ А	$P_1,$ Вт	$n,$ об/мин	$U_{ар},$ В	$I_{ар},$ А					
Δ											
Y											

5. Исследование работы двигателя при обрыве одной фазы (по указанию преподавателя):

а) отключается одна фаза питания и производится кратковременная попытка запуска двигателя при соединении обмотки статора в звезду, при этом  $k_{тт} = 50/5$ ;

б) восстанавливается трехфазная схема питания двигателя, а после запуска двигателя отключается одна фаза и проводится запись показаний приборов при соединении обмотки статора треугольником. Далее нагружать двигатель до  $I_{1Л} \approx I_{H\Delta}$  и записать показания приборов в табл. 2, а (по форме табл. 2, но без  $\eta$  и  $\cos\varphi$ ) для двух-трех значений тока нагрузки, кроме холостого хода.

Разгрузить двигатель, переключить обмотку статора на звезду и записать в табл. 2, б (по форме табл. 2) показания приборов при разных нагрузках двигателя  $I_{1Л} \leq I_{1HY}$

### Содержание отчета

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

1. Привести паспортные данные испытуемого двигателя и нагрузочного генератора.



2. Представить электрические схемы и необходимые расчетные формулы.

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

4. Сравнить значения пускового тока при соединении обмотки статора звездой и треугольником и сделать об этом запись в выводах по работе.

5. Построить на одном графике рабочие характеристики двигателя  $I_1$  и  $n = f(P_2)$ , а на втором зависимости  $\eta$ ,  $\cos\varphi_1$ ,  $s = f(P_2)$  для обеих схем соединения обмотки статора.

6. Проверить соответствие полученных значений ( $I_{1H}$ ,  $n_p$ ,  $\eta_H$ ,  $\cos\varphi_{1p}$ ) для мощности  $P_{2H}$  при  $U_1 = U_{1H}$  паспортным данным двигателя и определить отклонение полученных данных от паспортных.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить устройство и принцип работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

2. По напряжению сети в лаборатории (220 В) и техническим данным двигателя определить схему включения двигателя.

3. Как определить в данной работе момент на валу двигателя?

4. Как изменить направление вращения двигателя?

5. От чего зависит частота вращения двигателя?

6. Каким образом в данной работе произвести регулирование и измерение нагрузки двигателя?

7. В каком случае возможно и целесообразно применение способа пуска двигателя переключением со звезды на треугольник?

8. Какие характеристики называют рабочими, порядок их снятия?

9. Почему отношение пусковых токов при схемах соединения обмоток статора ( $\Delta$ ) и ( $Y$ )  $I_{n\Delta} \approx I_{nY} \approx 3$ ?

10. Почему при малой мощности на валу  $\cos\varphi_1(\Delta) < \cos\varphi_1(Y)$ , а с возрастанием мощности  $\cos\varphi_1(\Delta) > \cos\varphi_1(Y)$ ?

11. Почему при небольших нагрузках двигателя  $\eta_Y > \eta_\Delta$  а при нагрузках, близких к номинальной  $\eta_Y < \eta_\Delta$ ?

12. Почему увеличивается скольжение асинхронного двигателя при увеличении нагрузки?
13. Объяснить вид зависимости  $I_1 = f(P_2)$ .
14. От чего зависят потери мощности в асинхронном двигателе?
15. Почему при обрыве одной фазы питающей сети и неизменном моменте на валу частота вращения двигателя снижается?
16. Почему при обрыве одной фазы асинхронный двигатель не запускается даже при отсутствии нагрузки?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

#### Задание на лабораторную работу

1. Изучить теорию асинхронного двигателя по рекомендуемой в литературе.

2. Ознакомиться с устройством асинхронного двигателя, записать его паспортные данные и определить:

а) число полюсов двигателя  $2p$ , синхронную скорость  $n_1$  номинальное скольжение  $s_H$  и номинальный момент  $M_{2H}$ ;

б) схему соединения обмотки статора двигателя по напряжению силовой электрической сети лаборатории.

3. Определить коэффициент трансформации ЭДС двигателя.

4. Провести опыт холостого хода, снять и построить характеристики холостого хода  $I_0, P_0, \cos\varphi_0 = f(U_1)$ .

5. Провести опыт короткого замыкания, снять и построить характеристики короткого замыкания  $I_K, P_K, \cos\varphi_K = f(U_K)$ .

6. Определить опытным путем данные двигателя ( $I_1, P_1, \cos\varphi_1, n, \eta$ ) при двух нагрузках на валу (по указанию преподавателя).

7. По результатам опытов холостого хода и короткого замыкания рассчитать параметры Т-образной схемы замещения фазы двигателя (см. рис. 1).

8. Рассчитать два рабочих режима двигателя с фазным ротором, используя схему замещения. Сопоставить значения  $P_1, I_1, \cos\varphi_1, n, \eta$ , полученные расчетом и опытным путем (см. п. 6).

9. Составить отчет установленной формы по выполненной лабораторной работе.

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с устройством двигателя. Записать паспортные данные, указанные на стенде. Произвести внешний осмотр двигателя, обратить внимание на устройство и конструкцию корпуса, подшипниковых щитов, системы вентиляции, кон-

тактных колец, щеточного устройства, пускового реостата и других деталей.

2. Определить  $p$ ,  $n_1$ ,  $s$ . Номинальный момент на валу  $M_{2H}$  можно вычислить по формуле

$$M_{2H} = \frac{9,55P_{2H}}{n_H}.$$

3. Для определения коэффициента трансформации ЭДС асинхронного двигателя  $k = E_{1\phi}/E_{2\phi}$  и проведения последующих опытов необходимо собрать электрические цепи по схеме рис. 6, либо использовать измерительный комплект К-50 или К-51. Для расчета коэффициента  $k$ , согласно рекомендации в [3], необходимо, при отключенном пусковом реостате сначала подвести

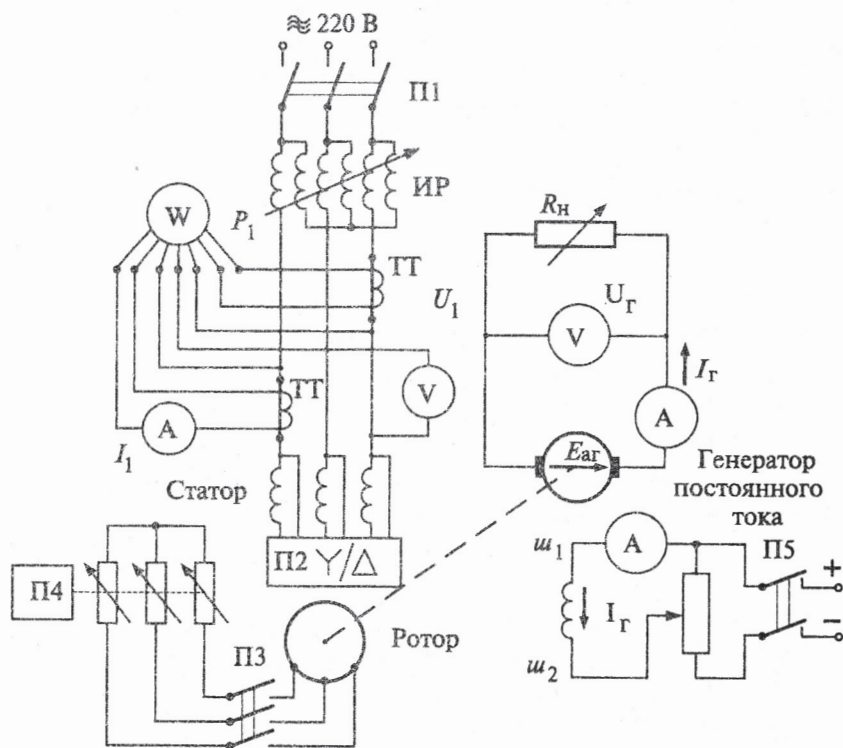


Рис. 6

номинальное линейное напряжение к обмотке статора  $U'_{1Л} = U_H$  измерить линейное напряжение  $U'_{2Л}$  на выводах ротора и определить отношение фазных напряжений  $\kappa' = U'_{1Ф} / U'_{2Ф}$  (с учетом схем соединений фаз обмоток статора и ротора). Значение  $\kappa'$  несколько больше отношения ЭДС из-за падения напряжения в обмотке статора от тока холостого хода. Затем подвести напряжение  $U''_{2Л} = U'_{2Л}$  к выводам обмотки ротора (при отключенном рубильнике Р в схеме рис. 6), измерить напряжение  $U''_{1Л}$  и найти отношение  $\kappa'' = U''_{1Ф} / U''_{2Ф}$ , которое несколько меньше отношения ЭДС. Результаты измерений и расчета занести в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	$U_{1Л}, В$	$U_{1Ф}, В$	$U_{1Л}, В$	$U_{1Ф}, В$	$\kappa'$	$\kappa''$
1						—
2					—	

Фактический коэффициент трансформации

$$\kappa \approx \sqrt{\kappa' \kappa''}.$$

4. Опыт холостого хода проводится применительно к схеме по рис. 6, с включенным переключателем ПЗ.

Перед пуском двигателя в ход следует убедиться, что сопротивление пускового реостата полностью введено, щетки опущены на контактные кольца, индукционный регулятор в положении  $U_H$ , переключатель пределов измерения тока в положении 50 А. Включить П1 и вместе с увеличением скорости вращения ротора уменьшать сопротивление пускового реостата. По достижении ротором максимальной скорости вращения ( $n \approx n_1$ ) индукционным регулятором снизить подводимое к двигателю напряжение  $U_1$  до  $0,50 U_H$ . Затем увеличивать напряжение  $U_1$  до  $1,2 U_H$ , записывая показания приборов в табл. 4 для пяти-шести значений напряжения  $U_1$ , включая  $U_H$ .

По окончании опыта холостого хода двигатель остановить, отключив автомат П1 и поставив переключатель пускового реостата П4 в положение наибольшего сопротивления.



Таблица 4

№ п/п	Измерено			Вычислено				
	$U_1$ , В	$I_0$ , А	$P_0$ , Вт	$i_0$ , %	$P_{0Э1}$ , Вт	$\cos\varphi_0$	$P_{СТ}$ , Вт	$P_{МЕХ}$ , Вт
1								
2								
3								
4								
5								

Потери мощности  $P_{0Э1}$  рассчитываются по  $r_1$ , указанному на стенде. По результатам опыта построить характеристики холостого хода:  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ . Произвести разделение потерь согласно указаниям и рис. 3.

Относительное значение тока холостого хода подсчитать по формуле

$$i_{0\%} = \frac{I_0}{I_H} 100\%; \quad \cos\varphi_0 = \frac{P_0}{3I_0U_{1\Phi}}$$

5. Провести опыт короткого замыкания. Схема соединения двигателя, индукционного регулятора и измерительных приборов остается той же, что и при опыте холостого хода.

Установить индукционный регулятор в положение, при котором напряжение на выходе будет иметь минимальное значение. Замкнуть накоротко обмотку ротора, для чего полностью вывести пусковой реостат. Затормозить ротор, включить ПИ и увеличивать напряжение  $U_k$  индукционным регулятором от нуля до значения, при котором ток  $I_k = 1,2I_H$  записывая показания приборов в табл. 5 для четырех значений тока  $I_k = 1,2; 1,0; 0,75$  и  $1,5I_H$ . Снизить напряжение  $U_k$  до нуля и отключить двигатель.

Опыт короткого замыкания следует проводить быстро, не допуская перегрева обмоток статора и ротора.

Таблица 5

№ п/п	Измерено			Вычислено			
	$U_k, В$	$I_k, А$	$P_k, Вт$	$\cos\varphi_k$	$z_k, Ом$	$r_k, Ом$	$x_k, Ом$

Определить параметры обмоток статора и ротора. Для расчета сопротивления  $r'_2 = r_2 \kappa^2$  (по указанному на стенде сопротивлению  $r_2$ ) принять значения  $\kappa$ , полученное в п. 3.

6. Определение характеристик методом прямого торможения. Для проведения опыта собрать электрические цепи по схеме рис. 6 без индукционного регулятора ИР либо с использованием измерительных комплектов К-50, либо К-51 или К-505.

Перед пуском двигателя в ход следует убедиться, что сопротивление пускового реостата полностью введено, переключатель пределов тока установлен на 50 А.

Включить П1 и плавно вывести пусковой реостат. Затем, увеличивая момент на валу двигателя с помощью электромагнитного тормоза или генератора, записать показания приборов в табл. 6 для двух значений момента на валу (по указанию преподавателя).

Таблица 6

№ п/п	Измерено					Вычислено					
	Двигатель					Генератор					
	$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$n, об./мин$	$M_2, Н·М$	$U_{ар}, В$	$I_{ар}, А$	$P_2, Вт$	$\eta$	$\cos\varphi$	$s$

7. Рассчитать параметры схемы замещения (рис. 1)  $r_{175^\circ}, r'_{275^\circ}$ , (при температуре  $75^\circ C$ ),  $x_1, x'_2, r_M, x_M$  и сопротивления на фазу двигателя  $r_{дв}, x_{дв}, z_{дв}$  по формулам, приведенным ранее.

8. Рассчитать два рабочих режима асинхронного двигателя с фазным ротором (найти  $I_{1\phi}, \cos\varphi_1, P_1, \eta$  по формулам (7), (8), (9), (10)).

Результаты расчетов (при  $U_1$ ,  $s$ ,  $M_2$  и  $P_2$  из табл. 6) записать в табл. 7.

Таблица 7

№ п/п	$s$ , %	$P_2$ , Вт	$n$ , об./мин	$M_2$ , Н·М	$\eta$ , %	$I$ , А	$P_1$ , Вт	$\cos\phi_1$

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

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

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

2. Начертить электрические схемы, по которым проводились опыты, и необходимые расчетные формулы.

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

4. Построить характеристики холостого хода:  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos\phi_0 = f(U_1)$ .

5. Построить характеристики короткого замыкания:  $I_k$ ,  $P_k$ ,  $\cos\phi_k = f(U_k)$ .

6. Привести табл. 6 с опытными данными нагрузочных режимов.

7. Привести расчеты параметров схемы замещения и двух рабочих режимов.

8. Проверить соответствие значений  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $\eta$ ,  $\theta$ ,  $\cos\phi_1$  полученных расчетом, опытным данным и определить отклонение вычисленных данных от опытных.

9. Проанализировать результаты лабораторной работы и кратко записать в выводах.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Ознакомьтесь с контрольными вопросами 2–6, 8, 12, 14 к лабораторной работе № 7, затрагивающими общие моменты исследования асинхронных двигателей.

2. Объясните особенности устройства и укажите области применения асинхронного двигателя с фазным ротором.

3. Опишите процесс пуска в ход асинхронного двигателя с фазным ротором, объясняя последовательность отдельных операций.

4. Как снимать характеристики холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя с фазным ротором?

5. Как определить коэффициент трансформации ЭДС исследуемого двигателя? Почему при этом необходимо поочередное питание статора и ротора?

6. Как определить потери мощности в стали статора асинхронного двигателя?

7. Как определить механические потери асинхронного двигателя?

8. Каким устройством (прибором) определялась скорость вращения асинхронного двигателя с фазным ротором?

9. Как рассчитать параметры T-образной схемы замещения?

10. Каков порядок расчета значений  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $\cos\varphi_1$ ,  $s$  аналитическим методом?

11. Каковы возможные причины отличия расчетных параметров режима работы от опытных?