

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»  
(РУТ (МИИТ))**

Одобрено кафедрой  
**«ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»**

Протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Автор: \_\_\_\_\_

**ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ С МЕТОДИЧЕСКИМИ  
УКАЗАНИЯМИ**

**ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**Электрические машины**

---

**Уровень ВО:** *Специалитет*

**Форма обучения:** *Заочная*

**Курс:** *5*

**Специальность/Направление:** *23.05.03 Подвижной состав железных дорог  
(ПСС)*

**Специализация/Профиль/Магистерская программа:** *Все специализации*

Москва

Составители: д.тех.н, проф. Бугреев В.А.; к.т.н. Сальников И.А., к.т.н.  
Новиков Е.В

## Содержание

|                                                                                          | Стр. |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 Цель работы                                                                            | 4    |
| 2 Основные теоретические сведения                                                        | 5    |
| 2.1. Общие положения                                                                     | 5    |
| 2.2. Режим холостого хода                                                                | 8    |
| 2.3. Режим короткого замыкания                                                           | 12   |
| 2.4 Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором | 16   |
| 2.5. Построение круговой диаграммы                                                       |      |
| 3. Порядок выполнения лабораторной работы                                                | 20   |
| 3.1. Опыт холостого хода                                                                 | 20   |
| 3.2. Опыт короткого замыкания                                                            | 24   |
| 3.3. Исследование рабочих характеристик                                                  | 26   |

## 1. Цель работы.

Изучить конструкцию трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и освоить приемы снятия его характеристик

## 2. Основные теоретические сведения

### 2.1. Общие положения

Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представлено на Рисунок 1.

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей, разделенных воздушным зазором: неподвижного статора и вращающегося ротора. Каждая из этих частей имеет сердечник и обмотку. При этом обмотка статора включается в сеть и является первичной, а обмотка ротора вторичной

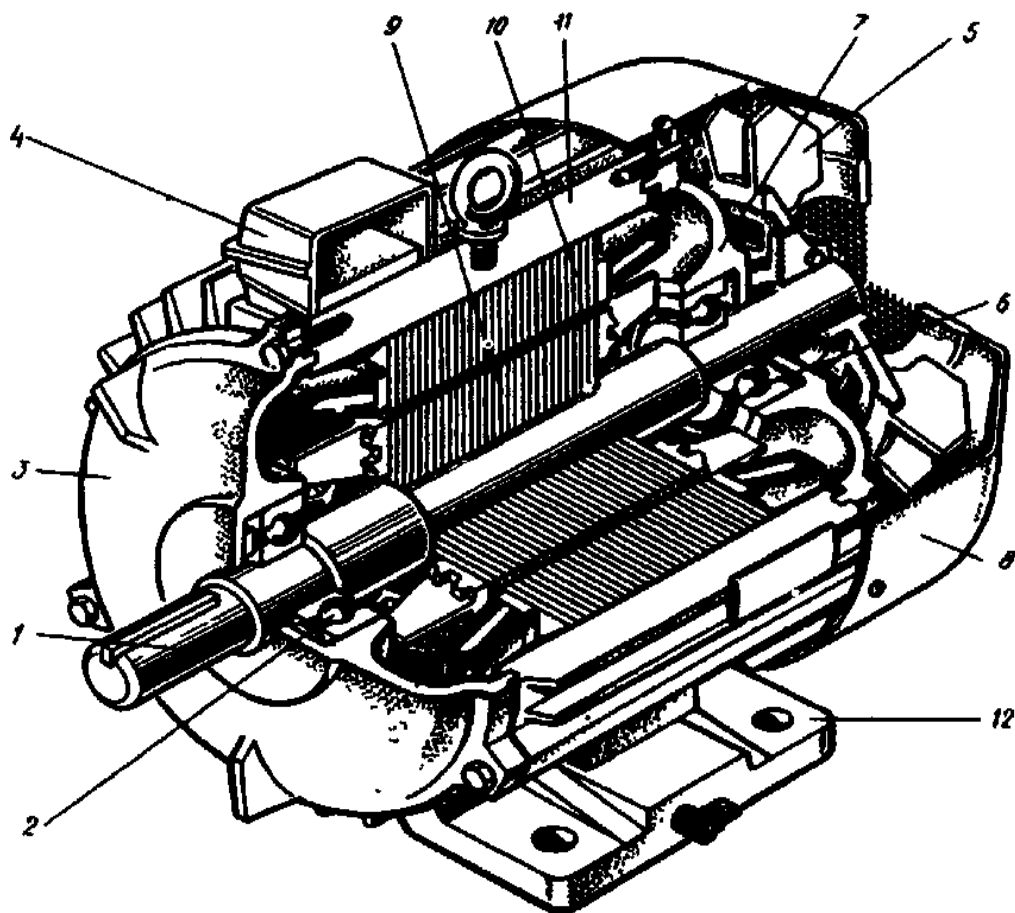


Рисунок 1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Неподвижная часть двигателя — статор — состоит из корпуса 11 и сердечника 10 с трехфазной обмоткой. Корпус двигателя отливают из алюминиевого сплава или из чугуна, либо делают сварным.

Рассматриваемый двигатель имеет закрытое обдуваемое исполнение. Поэтому поверхность его корпуса имеет ряд продольных ребер, назначение которых состоит в том, чтобы увеличить поверхность охлаждения двигателя.

В корпусе расположен сердечник статора 10, имеющий шихтованную конструкцию (отштампованные листы из электротехнической стали толщиной обычно 0,5 мм покрыты слоем изоляционного лака). Сердечник статора собран в пакет и скреплен специальными скобами или продольными сварными швами по наружной поверхности пакета. Такая конструкция сердечника способствует значительному уменьшению вихревых токов, возникающих в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. На внутренней поверхности сердечника статора имеются продольные пазы, в которых расположены пазовые части обмотки статора. Лобовые части находятся за пределами сердечника по его торцовым сторонам.

В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя — ротор, состоящий из вала 1 и сердечника 9 с короткозамкнутой обмоткой. Такая обмотка, называемая «беличье колесо», представляет собой ряд металлических (алюминиевых или медных) стержней, расположенных в пазах сердечника ротора, замкнутых с двух сторон короткозамыкающими кольцами. Сердечник ротора также имеет шихтованную конструкцию, но листы ротора не покрыты изоляционным лаком, а имеют на своей поверхности тонкую пленку окисла. Это является достаточной изоляцией, ограничивающей вихревые токи, так как величина их невелика из-за малой частоты перемагничивания сердечника ротора. Например, при частоте сети 50 Гц и номинальном скольжении 6% частота перемагничивания сердечника ротора составляет 3 Гц. Короткозамкнутая обмотка ротора в большинстве двигателей выполняется заливкой собранного сердечника ротора расплавленным алюминиевым сплавом. При этом одновременно со стержнями обмотки отливаются

короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопасти. Вал ротора вращается в подшипниках качения 2 и 6, расположенных в подшипниковых щитах 3 и 7.

Охлаждение двигателя осуществляется методом обдува наружной ребренной поверхности корпуса. Поток воздуха создается центробежным вентилятором 5, прикрытым кожухом 6. На торцевой поверхности этого кожуха имеются отверстия для забора воздуха. Двигатели мощностью 15кВт и более помимо закрытого делают еще и защищенного исполнения с внутренней самовентиляцией. В подшипниковых щитах этих двигателей имеются отверстия (жалюзи), через которые воздух посредством вентилятора прогоняется через внутреннюю полость двигателя. При этом воздух «омывает» нагретые части (обмотки, сердечники) двигателя и охлаждение получается более эффективным, чем при наружном обдуве.

Концы обмоток фаз выводят на зажимы коробки выводов 4. Обычно асинхронные двигатели предназначены для включения в трехфазную сеть на два разных напряжения, отличающиеся в  $\sqrt{3}$  раз. Например, двигатель рассчитан для включения в сеть на напряжения 380/220В. Если в сети линейное напряжение 380В, то обмотку статора следует соединить звездой, а если 220В, то треугольником. В обоих случаях напряжение на обмотке каждой фазы будет 220В. Выводы обмоток фаз располагают в коробке выводов таким образом, чтобы соединения обмоток фаз было удобно выполнять посредством перемычек, без перекрещивания последних. В некоторых двигателях небольшой мощности в коробке выводов имеется лишь три зажима. В этом случае двигатель может быть включен в сеть на одно напряжение (соединение обмотки статора такого двигателя звездой или треугольником выполнено внутри двигателя).

Монтаж двигателя в месте его установки осуществляется либо посредством лап 12, либо посредством фланца. В последнем случае на подшипниковом щите (обычно со стороны выступающего конца вала) делают фланец с отверстиями для крепления двигателя на рабочей машине. Для предохранения обслуживающего персонала от возможного поражения

электрическим током двигателя снабжаются болтами заземления (не менее двух).

При питании обмотки статора асинхронной машины трехфазным током в магнитопроводе создается вращающееся магнитное поле. На замкнутые накоротко проводники ротора действуют электромагнитные силы. Суммарное усилие, приложенное ко всем проводникам ротора, образует электромагнитный момент, увлекающий ротор вслед за вращающимся полем. Если этот момент достаточно велик, то ротор приходит во вращение. Такой режим работы асинхронной машины называется двигательным.

Если ротор асинхронной машины разогнать с помощью внешнего момента до частоты вращения больше чем частота вращения магнитного поля, то изменится направление ЭДС в проводниках ротора и направление активной составляющей тока ротора, то есть машина перейдет в генераторный режим. При этом изменит свое направление и электромагнитный момент, который станет тормозящим.

Характерной особенностью асинхронной машины является наличие скольжения, то есть неравенства частоты вращения ротора и магнитного поля статора. По этой причине машину называют асинхронной.

Существует два метода получения данных для построения рабочих характеристик асинхронных двигателей: метод непосредственной нагрузки и косвенный метод. Метод непосредственной нагрузки заключается в опытном исследовании двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до режима номинальной нагрузки с измерением необходимых параметров. Этот метод обычно применяется для двигателей мощностью не более 10—15 кВт.

С ростом мощности двигателя усложняется задача его нагрузки, растут непроизводительный расход электроэнергии и загрузка электросети. Применение этого метода ограничивается еще и тем, что не всегда представляется возможным создать испытательную установку по причине отсутствия требуемого оборудования и недопустимости перегрузки электросети.

Широкое применение получил более универсальный косвенный метод, применение которого не ограничивается мощностью двигателя. Этот метод заключается в выполнении двух экспериментов: опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

Опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронных двигателей в основном аналогичны таким же опытам трансформаторов. Но они имеют и некоторые особенности, обусловленные главным образом наличием у двигателя вращающейся части — ротора. Кроме того, при переходе из режима холостого хода в режим короткого замыкания параметры обмоток двигателя (активные и индуктивные сопротивления) не остаются неизменными, что объясняется зубчатой поверхностью статора и ротора. Все это создает некоторые затруднения в проведении опытов и в последующей обработке их результатов.

## **2.2. Режим холостого хода**

Данный опыт даёт возможность изучить свойства магнитной цепи машины, определить возникающие при холостом ходе потери и чисто механические свойства асинхронного двигателя при питании от источника регулируемого напряжения номинальной частоты. Асинхронный двигатель потребляет мощность, которая расходуется в основном на покрытие потерь в стали и механических потерь.

Известно, что намагничивающий ток берётся из сети. Для получения характеристики холостого хода производят несколько измерений при  $n=\text{const}$ ,  $f=\text{const}$  и  $U_1=\text{var}$ . Напряжение может снижаться до одной трети  $U_{\text{ном}}$  без нарушения устойчивой работы асинхронного двигателя. Дальнейшее снижение ведёт к некоторым затруднениям и в большинстве случаев не даёт интересных результатов. При проведении опытов следует всегда повышать напряжение сверх номинального, чтобы проследить за характером изменения потерь в стали и намагничивающей силы при увеличении магнитного потока.

Наиболее важной частью характеристики холостого хода является кривая насыщения, называемая также кривой намагничивания или кривой холостого хода. Она показывает зависимость между током намагничивания ( $I_0$ ) и Э.Д.С. ( $E_0$ ), при этом последняя почти всегда приравняется к напряжению  $U_0$  на зажимах АД при холостом ходе, так как падением напряжения на внутреннем активном и индуктивном сопротивлениях за счёт малой величины тока холостого хода можно пренебречь. При  $\cos \varphi$  холостого хода в пределах от 0,01 до 0,15 намагничивающий ток будет равен току холостого хода, при этом ошибка не превышает 1%.

Для всех электрических машин с воздушным зазором кривая насыщения имеет характерную форму. Вначале, с увеличением тока возбуждения (тока холостого хода), напряжение растёт прямолинейно, затем рост его замедляется и практически приближается к предельному значению. В этом состоянии наступает насыщение. Так как для полного использования свойств стали ЭДС двигателя  $E_0$  и поток  $\Phi$  должны по возможности иметь высокие значения, а с другой стороны необходимо избегать слишком больших потерь энергии на возбуждение. Знание кривой намагничивания для оценки этого соотношения очень важно, особенно для новых образцов.

Для полной оценки асинхронного двигателя необходимо знание потерь холостого хода, то есть механических потерь ( $P_{\text{мех}}$ ) и потерь в стали ( $P_{\text{ст}}$ ). Они определяются на холостом ходу мощностью ( $P_0$ ) за вычетом потерь в обмотке статора ( $P_{\text{эл1}}$ ). Так как ( $P_{\text{эл1}}$ ) очень малы, ввиду малости  $I_0$ , (незначительная доля по сравнению с  $P_{\text{мех}}$  и  $P_{\text{ст}}$ ) – ими пренебрегают, и потери холостого хода можно приравнять к ( $P_0$ ).

Питание асинхронного двигателя при опыте холостого хода (Рисунок 2) осуществляется через Инвертор напряжения, позволяющий изменять напряжение и частоту в широких пределах. При этом вал двигателя должен быть свободным от механической нагрузки.

Опыт начинают с напряжения питания  $U = 1,15 \cdot U_{\text{ном}}$ , затем постепенно понижают напряжение до  $U = 0,4 \cdot U_{\text{ном}}$  так, чтобы снять показания приборов в

5—7 точках. При этом один из замеров должен соответствовать номинальному напряжению  $U_{ном}$ .

Измеряют линейные значения напряжений и токов, а затем (в зависимости от схемы соединения обмотки статора) определяют фазные значения напряжения и тока холостого хода:

при соединении в звезду:

$$U_{\Phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \text{ и } I_{\Phi} = I_L \quad (1)$$

при соединении в треугольник:

$$U_{\Phi} = U_L \text{ и } I_{\Phi} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Активная мощность  $P_0$  измеряется в опыте холостого хода ватт метром и включает в себя электрические потери в обмотке статора:

$$P_{эл1} = 3 \cdot r_1 \cdot I_{\Phi}^2, \text{ Вт} \quad (3)$$

Здесь  $r_1$  — активное сопротивление фазы обмотки статора (Ом) измеренное непосредственно после отключения двигателя от сети, чтобы обмотка не успела охладиться.

магнитные потери в сердечнике статора  $P_{ст}$  и механические потери  $P_{мех}$ :

$$P_0 = P_{эл1} + P_{ст} + P_{мех}, \text{ Вт} \quad (4)$$

Сумма магнитных и механических потерь двигателя:

$$P_{ст} + P_{мех} = P_0 - P_{эл1}, \text{ Вт} \quad (5)$$

Коэффициент мощности для режима холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_{\Phi 0} \cdot I_{\Phi 0}} \quad (6)$$

По результатам измерений и вычислений строят характеристики холостого хода  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_1)$ , на которых отмечают значения величин  $I_{0ном}$ ,  $P_{0ном}$ ,  $(P_{ст} + P_{мех.ном})$  и  $\cos \varphi_{ном}$ , соответствующих номинальному напряжению  $U_{1ном}$ .

Если график  $(P_{ст} + P_{мех}) = f(U_1)$  продолжить до пересечения с осью ординат ( $U_1 = 0$ ), то получим величину потерь  $P_{мех}$ .

Это разделение магнитных и механических потерь основано на том, что при неизменной частоте сети  $f_1$  частота вращения ротора двигателя в режиме холостого хода  $n_0$ , а следовательно, и механические потери  $P_{\text{мех}}$  неизменны. В то же время магнитный поток  $\Phi$  прямо пропорционален ЭДС статора  $E_1$ .

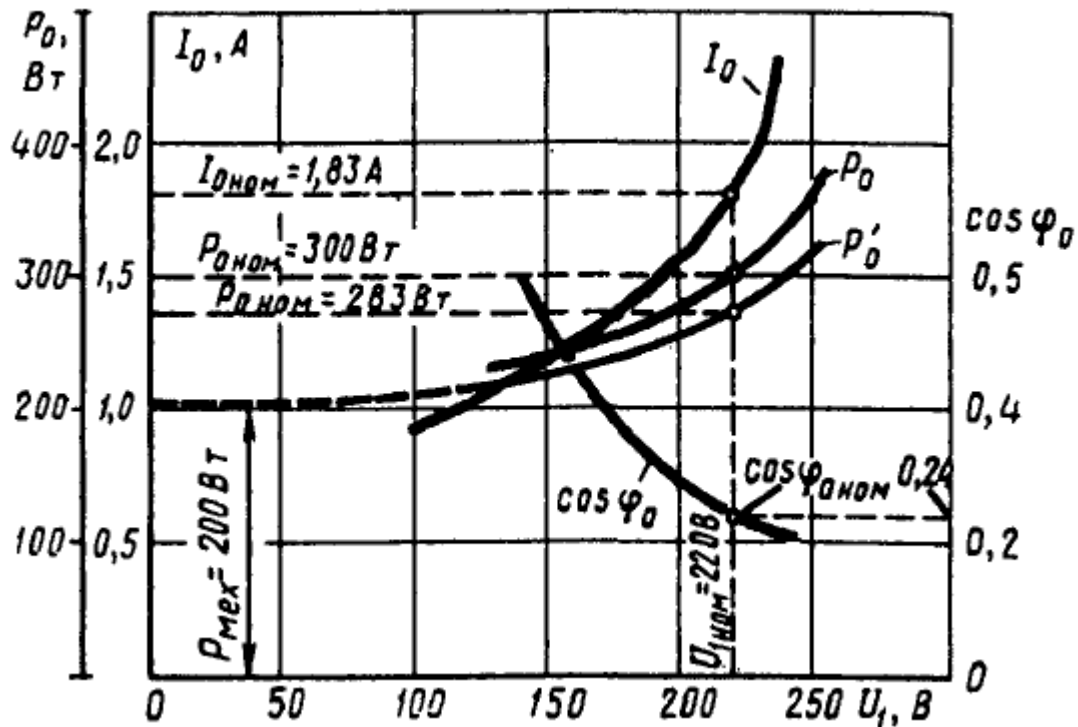


Рисунок 2. Характеристики холостого хода трехфазного асинхронного двигателя (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/мин)

Для режима холостого хода  $U_1 = E_1$ , а поэтому при  $U_1 = 0$  и магнитный поток  $\Phi = 0$ , а следовательно, и магнитные потери  $P_{\text{ст}} = 0$ . Определив величину механических потерь  $P_{\text{мех}}$ , можно вычислить магнитные потери  $P_{\text{ст}}$ :

$$P_{\text{ст}} = P_0 - P_{\text{мех}}, \text{ Вт.} \quad (7)$$

Согласно ГОСТ 7217-79 перед проведением опытов необходимо провести обкатку асинхронного двигателя для прогрева подшипников:

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| для АД до 11 кВт     | 15 минут, |
| от 11 кВт до 110 кВт | 30 минут, |
| свыше 110 кВт        | 75 минут. |

### 2.3.Режим короткого замыкания

Опыт короткого замыкания проводится по такой же схеме, как и в опыте холостого хода, но при этом измерительные приборы должны быть выбраны в соответствии с пределами измерения тока, напряжения и мощности. Ротор двигателя следует жестко закрепить. Предельное значение тока статора при опыте короткого замыкания устанавливают исходя из допустимой токовой нагрузки питающей сети и возможности провести опыт в минимальный срок, чтобы не вызвать опасного перегрева двигателя. Для двигателей мощностью до 1 кВт возможно проведение опыта начиная с номинального напряжения  $U_K = U_{ном}$ . В этом случае предельный ток  $I_K = (5 \div 7) \cdot I_{ном}$ . При выполнении опыта короткого замыкания желательно соединение обмотки статора звездой.

Определив диапазон изменения тока статора при опыте короткого замыкания, опыт начинают с предельного значения этого тока, установив соответствующее напряжение короткого замыкания  $U_K$ . Затем постепенно снижают это напряжение до значения, при котором ток достигнет нижнего предела установленного диапазона его значений. При этом снимают показания приборов для 5—7 точек, одна из которых должна соответствовать номинальному току статора ( $I_K = I_{ном}$ ).

Продолжительность опыта должна быть минимально возможной. После снятия последних показаний приборов двигатель следует отключить и сразу же произвести замер активного сопротивления фазы обмотки статора  $r'_1$ , чтобы определить температуру обмотки. В зависимости от схемы соединения обмотки статора, линейные напряжения и токи пересчитывают на фазные  $U_K$  и  $I_K$ .

Активную мощность короткого замыкания  $P_K$  измеряют ваттметром. По полученным значениям напряжений  $U_K$ , токов  $I_K$  и мощностей  $P_K$  вычисляют следующие параметры:

коэффициент мощности при коротком замыкании:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{3 \cdot U_{ФК} \cdot I_{ФК}}; \quad (8)$$

полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_K = \frac{U_{\Phi K}}{I_{\Phi K}}, \text{ Ом}; \quad (9)$$

активные и индуктивные составляющие этого сопротивления:

$$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}, \text{ Ом}; \quad (10)$$

При опыте короткого замыкания обмотки двигателя быстро нагреваются до рабочей температуры, так как при неподвижном роторе двигатель не вентилируется. Температуру обмотки статора  $T_1$  обычно определяют по сопротивлению фазы  $r'_1$ , измеренному непосредственно после проведения опыта, по формуле:

$$T_1 = \left( (r'_1 - r_{1.20}) \left( \frac{255}{r_{1.20}} \right) \right) + 20, ^\circ\text{C}; \quad (11)$$

где  $r_{1.20}$  - сопротивление фазы обмотки статора в холодном состоянии (обычно при температуре  $20^\circ\text{C}$ ), Ом.

Если же температура обмотки оказалась меньше расчетной рабочей температуры  $T_2$  для соответствующего класса нагревостойкости изоляции двигателя, то активное сопротивление короткого замыкания  $r_K$  пересчитывают на рабочую температуру:

$$r_{KT} = r'_K \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)), \text{ Ом}; \quad (12)$$

где  $r'_K$  — активное сопротивление короткого замыкания при температуре  $T_1$ , отличающейся от расчетной рабочей;  $\alpha=0,004$ .

Затем пересчитывают на рабочую температуру параметры асинхронного двигателя:

полное сопротивление:

$$Z_{KT} = \sqrt{x_K^2 + r_{KT}^2}, \text{ Ом} \quad (13)$$

ток короткого замыкания:

$$I_{KT} = \frac{U_K}{Z_{KT}}, \text{ А}; \quad (14)$$

мощность короткого замыкания:

$$P_{KT} = 3 \cdot r_{KT} \cdot I_{KT}^2, \text{ Вт} \quad (15)$$

На характеристиках короткого замыкания (Рисунок 3) отмечают значения величин  $P_{Kном}$  и  $U_{Kном}$ , соответствующих току короткого замыкания  $I_K = I_{ном}$

Таблица 1

Обязательный отсчёт напряжения при опыте короткого замыкания

|                                                          |     |     |     |     |      |      |
|----------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Номинальное фазное<br>напряжение $U_{1ном}$ , В          | 127 | 220 | 380 | 500 | 3000 | 6000 |
| Фазное напряжение короткого<br>замыкания $U_{K.ном}$ , В | 33  | 58  | 100 | 130 | 800  | 1600 |

Опыт, проведённый при пониженном напряжении, относительно номинального, требует введения поправки на насыщение (ГОСТ7217-79). Эта поправка состоит в том, что выше наибольшего значения, при опыте короткого замыкания, ток предполагается возрастающим по касательной к кривой, изображающей его зависимость от напряжения.

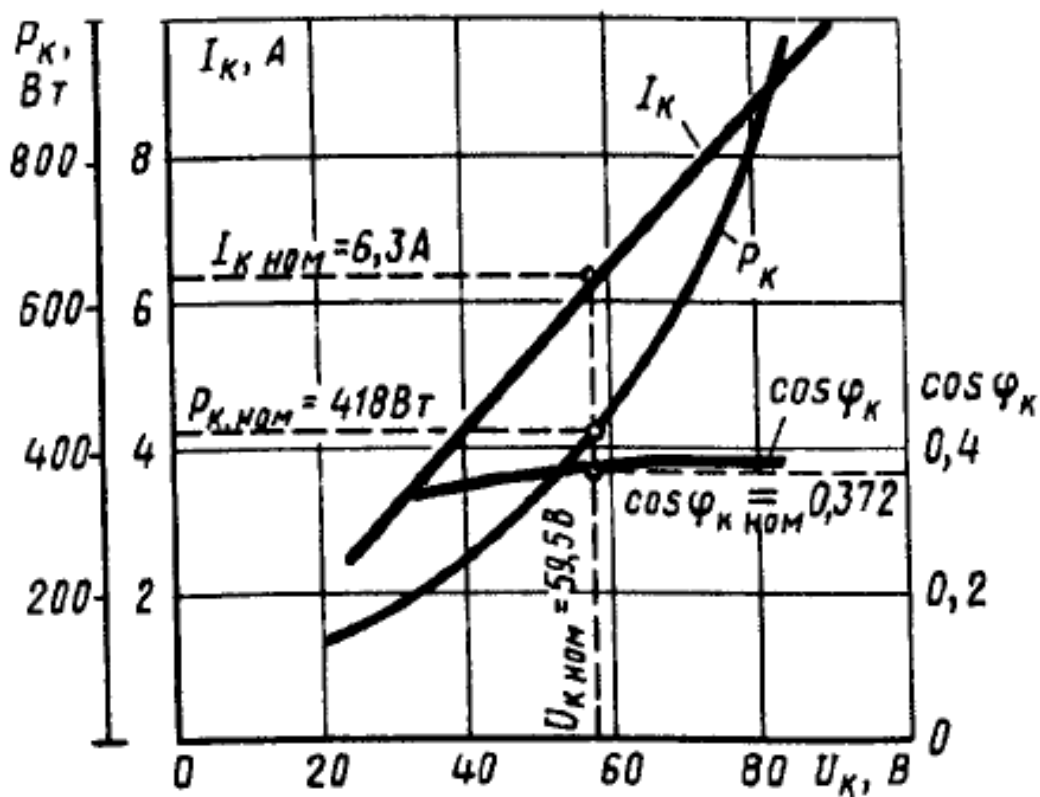


Рисунок 3. Характеристики короткого замыкания трехфазного асинхронного двигателя (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/мин)

Для определения  $U_{K.ном}$  нужно построить график по данным Таблица 1

Ток и мощность короткого замыкания пересчитывают на номинальное напряжение  $U_{1ном}$  по формулам:

$$I_{\Pi} = I_{1ном} \cdot \left( \frac{U_{1ном}}{U_{Kном}} \right), \text{А} \quad (16)$$

$$P_{\Pi} = P_{1ном} \cdot \left( \frac{U_{1ном}}{U_{Kном}} \right)^2, \text{Вт.} \quad (17)$$

Следует иметь в виду, что такой пересчет является приближенным, так как при  $U_K = U_{1ном}$  наступает магнитное насыщение сердечника (особенно зубцовых слоев) статора и ротора. Это приводит к уменьшению индуктивного сопротивления  $X_K$ , что не учитывается формулами (16) и (17).

Кратность пускового тока равна:

$$K_I = \left( \frac{I_{\Pi}}{I_{1ном}} \right). \quad (18)$$

Электромагнитная мощность в режиме короткого замыкания, передаваемая на ротор двигателя, равна электрическим потерям в обмотке ротора  $P_{\Sigma 2K}$ , поэтому электромагнитный момент при опыте короткого замыкания определяется по формуле:

$$M_{\Pi} = \frac{30 \cdot P_{\Sigma 2K}}{\pi \cdot n} = \frac{30 \cdot (P_{K.ном} - P_{\Sigma 1K} - P_{МК})}{\pi \cdot n}, \text{Н} \cdot \text{м} \quad (19)$$

где электрические потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания:

$$P_{\Sigma 1K} = 3 \cdot r_K \cdot I_{K.ном}^2, \text{Вт.} \quad (20)$$

Магнитные потери при опыте короткого замыкания  $P_{стк}$  приближенно определяют по характеристикам холостого хода (Рис.2.) при напряжении  $U_1 = U_K$ .

В режиме холостого хода магнитный поток  $\Phi$  больше, чем в режиме короткого замыкания, но если в режиме холостого хода магнитные потери происходят только в сердечнике статора, то в режиме короткого замыкания ( $s=1$ ) магнитные потери происходят еще и в сердечнике ротора, так как  $f_2 = f_1$ .

Характеристика короткого замыкания воспроизводит начальные пусковые условия асинхронного двигателя и потому позволяет определить – начальный пусковой ток и начальный пусковой момент.

Начальный пусковой момент получают пересчетом момента  $M_{\Pi}$  при начальном пусковом токе  $I_{\Pi}$ :

$$M_{\Pi} = M_{\Pi} \cdot \left(\frac{I_{\Pi}}{I_K}\right)^2, \text{Н}\cdot\text{м} \quad (21)$$

Затем определяют кратность пускового момента:

$$K_M = \left(\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{ном}}}\right) \quad (22)$$

## **2.4.Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**

Под рабочими характеристиками асинхронного двигателя (ГОСТ7217-79) понимают зависимость ряда величин:  $P_1$ ,  $I_1$ ,  $S$ ,  $\cos.\phi$ , КПД от полезной мощности  $P_2$ ., при условии неизменного приложенного напряжения  $U_1$  и его частоты  $f_1$ .

Снятие рабочих характеристик следует производить при нагретых обмотках статора и ротора.

## **2.5. Построение круговой диаграммы**

Круговая диаграмма позволяет определить величины, характеризующие работу асинхронной машины.

При изменении нагрузки асинхронной машины ее первичный и вторичный токи изменяются по величине и по фазе. При  $U_1=\text{const}$  и  $f=\text{const}$  режим работы и величина нагрузки асинхронной машины однозначно определяются величиной ее скольжения  $s$ . При изменении скольжения в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$  конец вектора тока описывает непрерывную замкнутую кривую, которая называется геометрическим местом этого тока. При

постоянных параметрах асинхронной машины геометрическим местом концов векторов тока является окружность, которая вместе с некоторыми другими построениями называется круговой диаграммой асинхронной машины.

Круговая диаграмма (рисунок 4.5) позволяет определить все электромагнитные величины, характеризующие режим работы машины при любом значении скольжения, и дает наглядное представление об изменении этих величин при изменении режима работы машины. Поэтому она имеет большое методическое значение. Кроме того, она имеет также существенное практическое значение для изучения режимов работы асинхронных машин в случаях, когда их параметры можно принять постоянными. Эта диаграмма называется точной, так как в ней учитывается величина модуля и аргумента поправочного коэффициента  $C_1$ . Диаметр окружности такой диаграммы повернут на угол  $2\gamma$  относительно горизонтали.

При изменении скольжения точка D на круговой диаграмме и концы векторов токов  $I_1$  и  $I_2$  скользят по окружности. Область диаграммы ODC соответствует двигателю, область OAB — генераторному и область CB — тормозному режиму работы асинхронной машины.

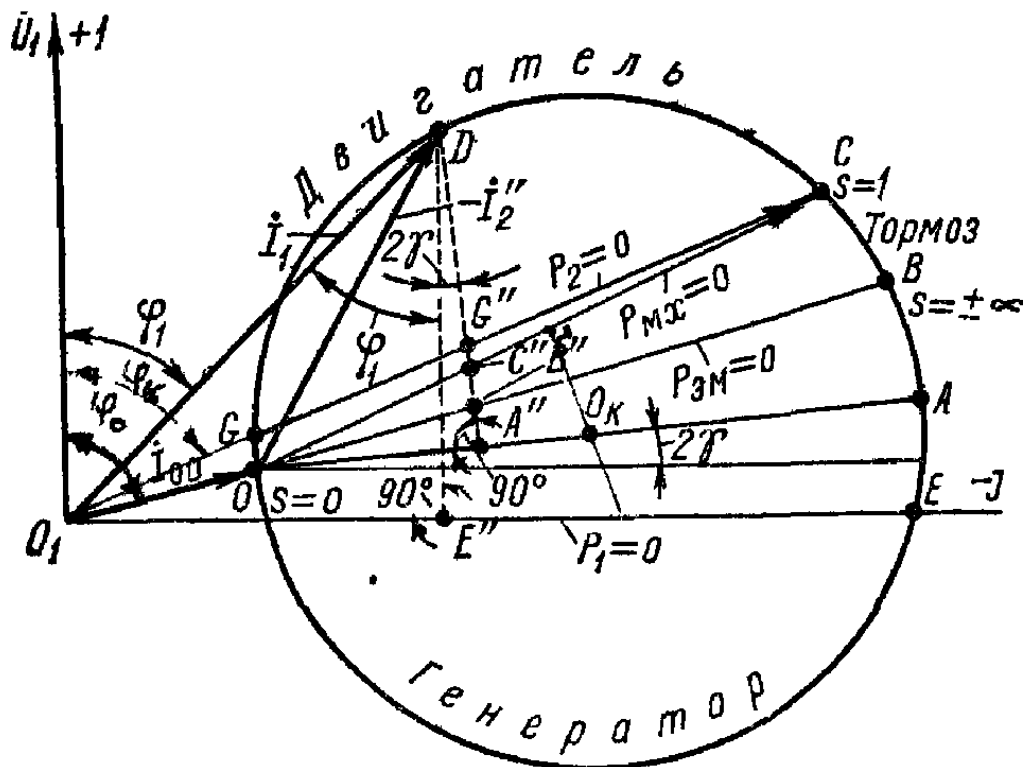


Рисунок 4. Точная круговая диаграмма асинхронной машины

Как следует из изложенного, величина тока  $I_{00}$ , диаметр  $D_k$ , угол  $\varphi$  и сопротивление  $C_1^2$  ( $r_{k2} - r_2'$ ), определяющего положение на круговой диаграмме точки  $s=\pm\infty$ , не зависят от величины  $r_2'$ . Поэтому величина окружности тока, ее расположение и положение на ней точек  $s=0$  и  $s=\pm\infty$  также не зависят от  $r_2'$ . От величины  $r_2'$  зависит лишь положение на круговой диаграмме точки  $s=1$ , причем эта точка с увеличением  $r_2'$  смещается против часовой стрелки по направлению к точке  $s=0$ .

По данным опытов холостого хода и короткого замыкания для номинального напряжения строят круговую диаграмму для исследуемого двигателя.

Перед началом построения необходимо выбрать масштаб тока  $m_i$ , который должен быть удобен для работы, для чего желательно, чтобы он был равен или кратен одному из ряда чисел:  $m_i=1; 2; 2,5; 5; 10$  (А/мм) и так далее.

Вектор тока короткого замыкания  $I_{k1}$  (отрезок  $O_1C$ ) в выбранном масштабе должен быть несколько меньше длины того листа бумаги, на котором производится построение диаграммы.

Масштаб мощности определяется по формуле:

$$m_p = 3 \cdot U_1 \cdot m_i, \text{ Вт/мм}; \quad (23)$$

Масштаб момента определяется по формуле:

$$m_M = \frac{9,55 \cdot m_p}{n}, \text{ Н·м/мм}. \quad (24)$$

Полус диаграммы (точка  $O_1$  на рисунке) располагается в левом нижнем углу листа. Через полюс проводятся координатные оси: ось мнимых количеств  $O_1E$  - горизонтально и ось вещественных количеств, или направление вектора приложенного напряжения  $O_1U_1$  -вертикально.

По данным опыта холостого хода из точки  $O_1$  в масштабе тока  $m_i$ , проводят вектор тока холостого хода  $I_{00}$  (отрезок  $O_1O$ ) под углом  $\varphi_0$  к оси ординат. Из точки  $O$ , называемой точкой холостого хода, соответствующей скольжению  $s=0$ , проводят прямую, параллельную оси абсцисс. Затем по данным опыта короткого замыкания в выбранном масштабе тока  $m_i$  из точки  $O_1$

под углом  $\phi_k$  к оси ординат строят вектор тока короткого замыкания  $I_{k \text{ ном}}$ . Эти токи соответствуют номинальному напряжению асинхронной машины. Соединив точки О и С, получим прямую ОС, являющуюся хордой искомой окружности. На полученной диаграмме линия ОС является линией механической мощности.

При холостом ходе сдвиг фаз между  $E_1$  и  $I_0$  с большой точностью составляет 90°. Поэтому:

$$\sin \gamma = \frac{I_{\phi 0} \cdot r_1}{U_{1\phi}} \quad \text{или} \quad \sin 2\gamma = \frac{2 \cdot I_{\phi 0} \cdot r_1}{U_{1\phi}}. \quad (25)$$

Эти соотношения позволяют определить направления диаметра ОА. Центр окружности  $O_k$  будет лежать в точке пересечения прямой ОА, с перпендикуляром, восстановленным из середины хорды ОС. После этого радиусом  $O_k O$  можно начертить окружность тока.

Линию электромагнитной мощности и электромагнитного момента (линия ОВ) проводят под углом  $\delta$  к радиусу  $OO_k$  окружности.

Угол  $\delta$  между диаметром круговой диаграммы  $D_k$  (линией ОА) и линией электромагнитной мощности (линией ОВ) определяется равенством:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{m_i \cdot D_k \cdot r_k}{U_{1\phi}} \quad (26)$$

Точку реального холостого хода G на круговой диаграмме получим если из точки О отложим отрезок OG:

$$OG = \frac{P_{\text{мех}} + P_{\text{д}}}{3 \cdot m_i \cdot U_{1\phi \text{ ном}}} \quad (27)$$

Соединим точки G и С. Прямая GC будет линией полезной механической мощности. Горизонтальная прямая  $O_1 E$ , является линией электрической мощности.

Определение рабочих характеристик по полученной диаграмме выполняют согласно методике, изложенной в дополнительной литературе.

### **3.Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
2. Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.
3. Снять характеристики холостого хода. Определить потери холостого хода.
4. Снять характеристики короткого замыкания при заторможенном роторе. Определить потери короткого замыкания. Определить кратность пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя.
5. Снять и построить рабочие характеристики асинхронного двигателя при номинальном напряжении и частоте сети.
6. Построить круговую диаграмму по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.
7. Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

При анализе результатов необходимо сравнить параметры и данные асинхронного двигателя, полученные из круговой диаграммы, с паспортными данными двигателя.

Анализируя рабочие характеристики, нужно объяснить вид полученных графиков.

#### **3.1. Опыт холостого хода**

1. Для исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (машина М2) собрать схему, представленную на Рис 5.
2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все

тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26, SA38), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA4, SA6, SA7, SA34, SA36, SA37) находятся в выключенном положении, коммутатор SA39 находится в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки.

3. Тумблер SA35 установить в положение «*спарка M1, M2, M3*».
4. Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.
5. Установить выключатель SA30 в положение «*PW1*», SA31 в положение «*PW2*», выключатель SA32 в положение «*PV3*».
6. С помощью регулятора RP4 «*Задание частоты*» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).
7. С помощью регулятора RP5 «*Задание напряжения*» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).
8. Подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.
9. Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «*Задание напряжения*» Инвертора плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до значения  $U=100\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV1). Ротор двигателя в этом случае вращается с частотой, весьма близкой к синхронной. Чтобы достичь синхронной частоты вращения  $n_0$  и компенсировать механические потери  $P_{\text{мех}}$ , нужно подключить к сети вспомогательную машину M3, которая работает в двигательном режиме. Для этого необходимо:
10. Переключатель SA34 перевести в положение «*HB*».
11. Тумблером SA25 включить ШИП2.

- 12.С помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру РА6).
- 13.Установить режим работы ШИП1: SA20 «Отключить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Двигательный режим».
- 14.Тумблером SA23 включить ШИП1.
- 15.С помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1, плавно увеличивая напряжение на выходе, разогнать исследуемый двигатель до синхронной частоты вращения. Для более точного определения синхронной частоты вращения можно воспользоваться ваттметрами РW1, РW2. При приближении к синхронной частоты вращения активная мощность уменьшается до нуля.
- 16.При  $n=n_0$  снять показания приборов. Увеличивая напряжение на исследуемом двигателе М2 от 100В до 220В снять 5-6 точек. Синхронную частоту вращения поддерживать постоянной (контролировать по прибору ВR1), изменяя напряжение на вспомогательном двигателе М3. Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2

Данные опыта холостого хода

| №   | Измерено              |                       |                          |                          |               | Вычислено              |                        |                   |                          |                          |                          |                        |
|-----|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
|     | U <sub>0</sub> ,<br>В | I <sub>0</sub> ,<br>А | P <sub>0.1</sub> ,<br>Вт | P <sub>0.2</sub> ,<br>Вт | M,<br>Н*<br>м | U <sub>ф0</sub> ,<br>В | I <sub>ф0</sub> ,<br>А | cosφ <sub>о</sub> | φ <sub>о</sub> ,<br>град | P <sub>эл1</sub> ,<br>Вт | P <sub>мех</sub> ,<br>Вт | P <sub>м</sub> ,<br>Вт |
| 1   |                       |                       |                          |                          |               |                        |                        |                   |                          |                          |                          |                        |
| 2   |                       |                       |                          |                          |               |                        |                        |                   |                          |                          |                          |                        |
| ... |                       |                       |                          |                          |               |                        |                        |                   |                          |                          |                          |                        |

Завершив эксперимент, необходимо:

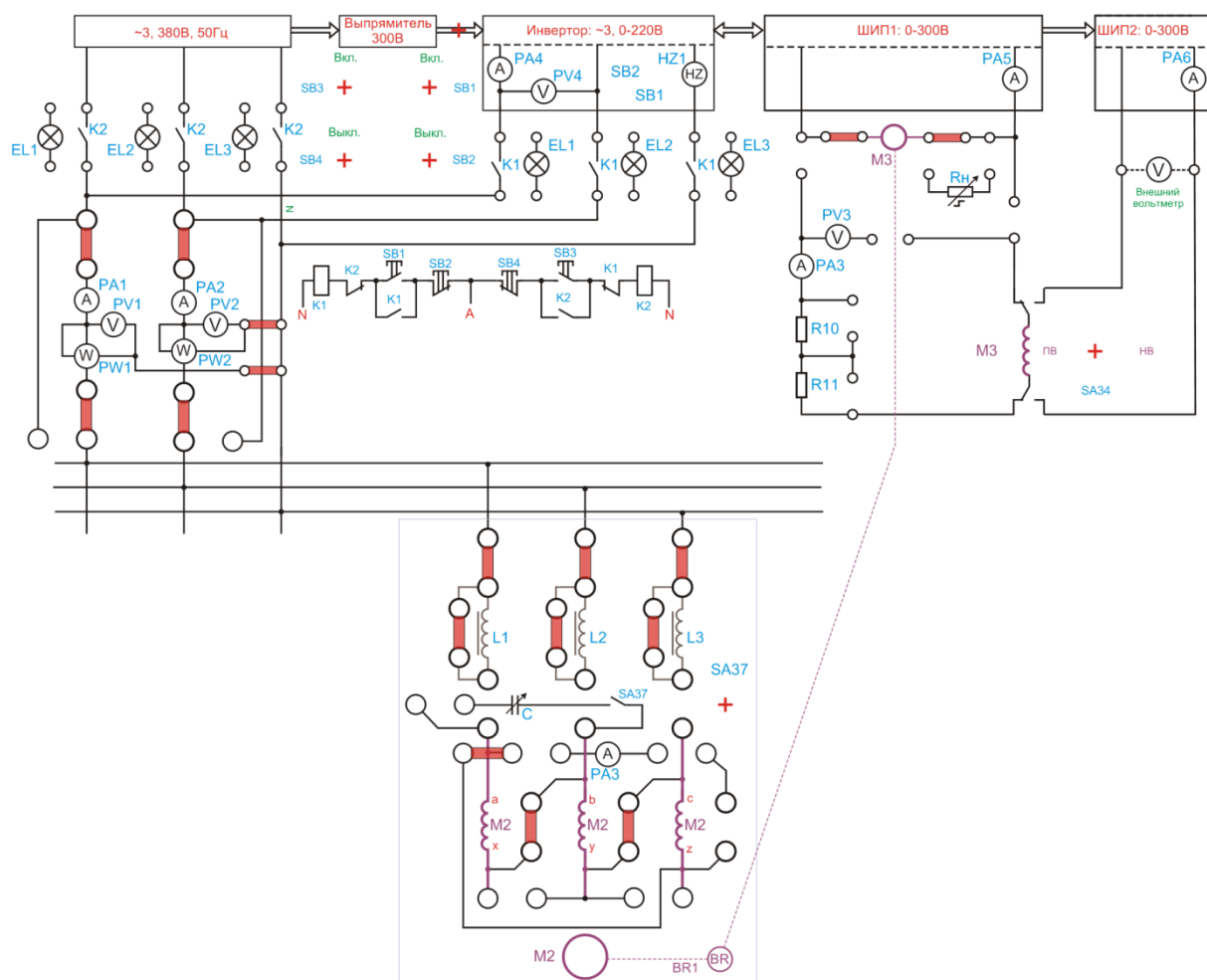


Рисунок 5. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- тумблером SA26 отключить Инвертор;
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины M3 равное нулю (контролировать по амперметру PA6).
- тумблером SA25 отключить ШИП2;

- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений и вычислений построить характеристики холостого хода  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos\varphi_0=f(U_1)$ , на которых необходимо отметить значения величин  $I_{0.НОМ}$ ,  $P_{0.НОМ}$ ,  $(P_M + P_{МЕХ})_{НОМ}$  и  $\cos\varphi_{НОМ}$ , соответствующих номинальному напряжению  $U_{1.НОМ}$ .

### 3.2. Опыт короткого замыкания

#### **ВНИМАНИЕ!**

Ток статора не должен превысить  $1,5 \cdot I_n$  исследуемого двигателя.

Ротор исследуемого двигателя не вращается.

Продолжительность каждого отсчёта не должна превышать **10с.**

Опыт требует хорошей организации и слаженной работы бригады студентов. На каждого наблюдателя возлагается наблюдение за одним - двумя приборами в момент отсчёта (времени включения).

1. Собрать схему, представленную на Рис. 6.
2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26, SA38), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA4, SA6, SA7, SA34, SA36, SA37) находятся в выключенном положении, коммутатор SA39 находится в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта перемычки.
3. Тумблер SA35 установить в положение «*спарка M1, M2, M3*».

4. Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.
5. Установить выключатель SA30 в положение «PW1», SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 в положение «PV3».
6. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).
7. С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

Чтобы ротор двигателя M2 не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину M3, работающую по двухконтурной системе стабилизации скорости. Для этого необходимо:

8. Переключатель SA34 перевести в положение «HB».
9. Установить выключатель SA25 ШИП2 в положение «Включено».
10. С помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины M3 (контролировать по амперметру PA6).
11. Установить режим работы ШИП1: SA20 «Включить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Генераторный режим».
12. Тумблером SA23 включить ШИП1.
13. С помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1, установить значение частоты вращения ротора равное нулю (контролировать по прибору BR1).
14. Тумблером SA26 включить Инвертор.
15. Подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.
16. Увеличивая регулятором RP5 «Задание напряжения» Инвертора напряжение на статоре асинхронного двигателя до значения  $U=90\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV1), снять 5-6 точек. Измеренные данные занести в таблицу 3.

Завершив эксперимент, необходимо:

- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- тумблером SA26 отключить Инвертор;
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3 равное нулю (контролировать по амперметру РА6).
- тумблером SA25 выключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений и вычислений построить характеристики короткого замыкания:  $I_K$ ,  $P_K$  и  $\cos\varphi_K=f(U_K)$ .

Таблица 3

Данные опыта короткого замыкания

| №   | Измерено     |           |               |                    | Вычислено       |                 |                 |                       |               |               |               |
|-----|--------------|-----------|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
|     | $U_K$ ,<br>В | $I_K$ , А | $P_K$ ,<br>Вт | $M$ ,<br>$H^*_{M}$ | $U_{ФК}$ ,<br>В | $I_{ФК}$ ,<br>А | $\cos\varphi_K$ | $\varphi_K$ ,<br>град | $Z_K$ ,<br>Ом | $X_K$ ,<br>Ом | $r_K$ ,<br>Ом |
| 1   |              |           |               |                    |                 |                 |                 |                       |               |               |               |
| 2   |              |           |               |                    |                 |                 |                 |                       |               |               |               |
| ... |              |           |               |                    |                 |                 |                 |                       |               |               |               |

### 3.3. Исследование рабочих характеристик

1. Собрать схему, представленную на Рис. 5
2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26, SA38), находятся в положении «выключено», все

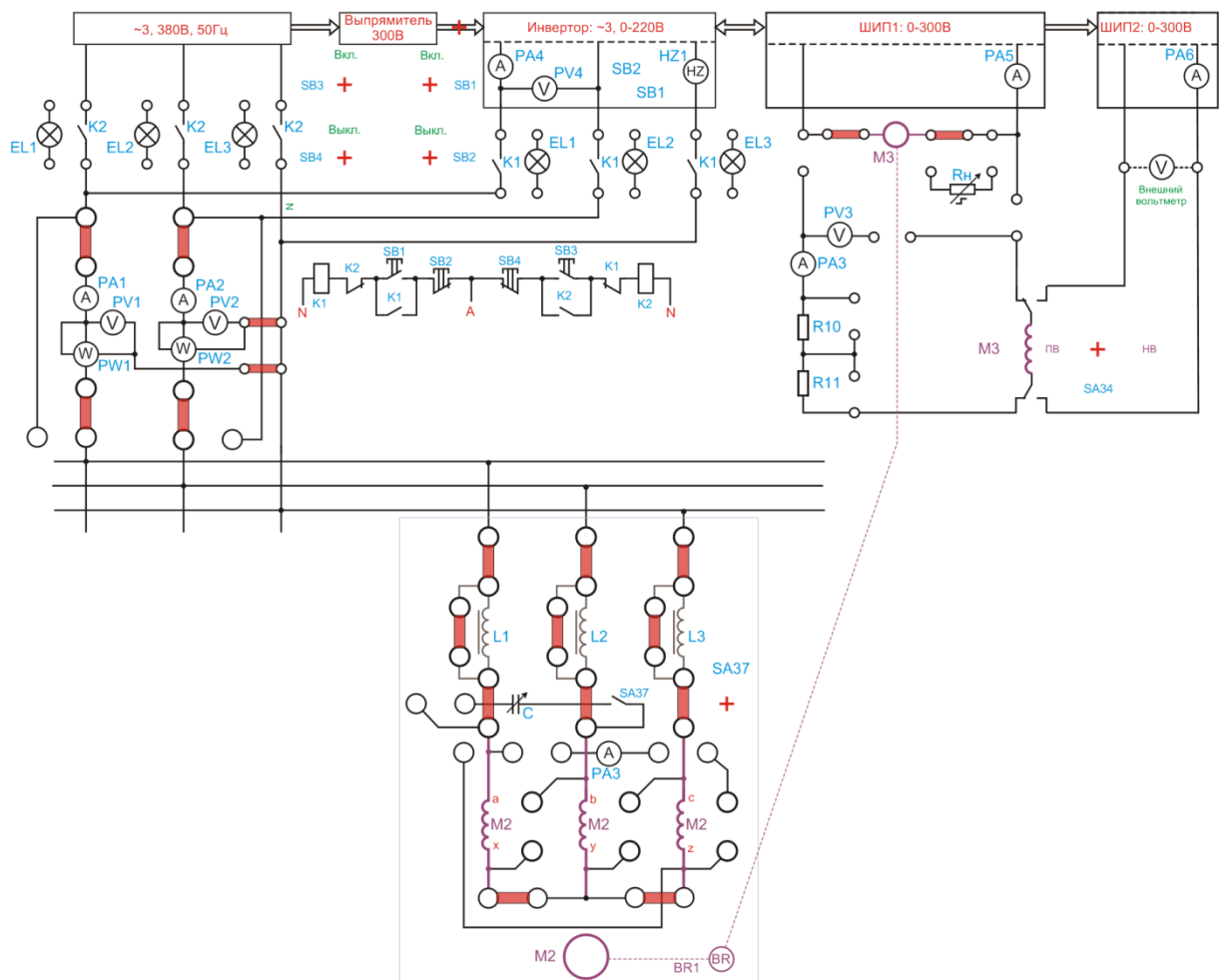


Рисунок 6. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA4, SA6, SA7, SA34, SA36, SA37) находятся в выключенном положении, коммутатор SA39 находится в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта перемычки.

Тумблер SA35 установить в положение «*сварка M1, M2, M3*».

3. Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.
4. Установить выключатель SA30 в положение «PW1», SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 в положение «PV3».

5. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).
6. С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).
7. Тумблером SA26 включить Инвертор.
8. Подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.
9. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U=220\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV1).

Чтобы создать механическую нагрузку на валу исследуемого двигателя, нужно подключить к сети вспомогательную машину МЗ, которая будет работать в генераторном режиме. Для этого необходимо:

10. Переключатель SA34 перевести в положение «НВ».
11. Установить выключатель SA25 ШИП2 в положение «Включено».
12. С помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ (контролировать по амперметру РА6).
13. Установить режим работы ШИП1: SA20 «Отключить замкнутую СУ», SA21 «Задание тока», SA22 «Генераторный режим».
14. Тумблером SA23 включить ШИП1.
15. Увеличивая ток в цепи якоря вспомогательной машины МЗ с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1, снять показания приборов в 5-6 точках и занести их в таблицу 4.

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);

- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- тумблером SA26 выключить Инвертор.
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3 равное нулю (контролировать по амперметру РА6).
- тумблером SA25 выключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По опытным данным построить в одной системе координат рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $n$ ,  $s$ ,  $\cos \varphi$ ,  $M$ ,  $\eta = f(P_2)$ .

Таблица 4

Рабочие характеристики

| №   | Измерено     |              |               |                               |              |                    | Вычислено          |     |                |                     |                |               |        |                         |
|-----|--------------|--------------|---------------|-------------------------------|--------------|--------------------|--------------------|-----|----------------|---------------------|----------------|---------------|--------|-------------------------|
|     | $I_1$ ,<br>А | $U_1$ ,<br>В | $P_1$ ,<br>Вт | $\omega$ ,<br>с <sup>-1</sup> | $M$ ,<br>Н·м | $I_{1\Phi}$ ,<br>А | $U_{1\Phi}$ ,<br>В | $s$ | $\cos \varphi$ | $\Delta M$ ,<br>Н·м | $M_2$ ,<br>Н·м | $P_2$ ,<br>Вт | $\eta$ | $n$ , мин <sup>-1</sup> |
| 1   |              |              |               |                               |              |                    |                    |     |                |                     |                |               |        |                         |
| 2   |              |              |               |                               |              |                    |                    |     |                |                     |                |               |        |                         |
| ... |              |              |               |                               |              |                    |                    |     |                |                     |                |               |        |                         |