

Венцеров М.С., Иванов А.С., Орешкин Д.Н., Сидоров А.О.,  
Ширинский С.В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
(асинхронные машины)**

Практикум

по курсу «Электрические машины»  
для студентов, обучающихся по направлению  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

2023

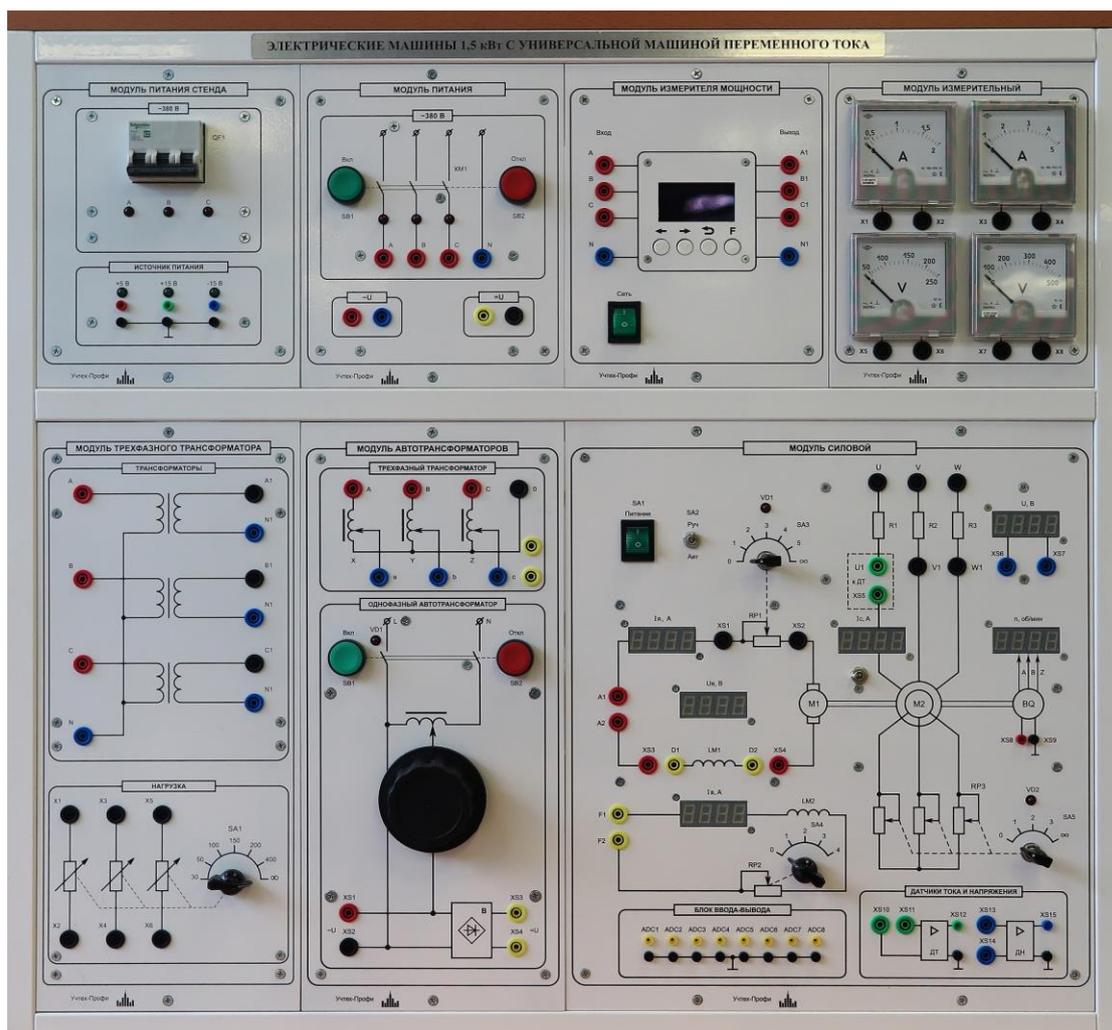
**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	2
Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ .....	6
Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ .....	23
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ .....	30

## ВВЕДЕНИЕ

Машины переменного тока получают питание от трехфазных сетей переменного тока промышленной частоты 50 Гц. К ним относятся асинхронные и синхронные машины, различающиеся скоростью вращения ротора относительно поля статора. Асинхронные машины преимущественно используются в качестве двигателей, преобразующих электрическую энергию сети переменного тока в механическую энергию вращения нагрузки. Синхронные машины чаще используются в качестве генераторов, преобразующих механическую энергию вращающегося вала в электрическую энергию. Однако, все электрические машины обратимы и могут работать как в двигательном, так и в генераторном режимах. В данный сборник включены лабораторные работы по исследованию свойств асинхронных и синхронных машин в различных режимах работы.

Для проведения экспериментальных исследований асинхронной машины используется стенд «Электрические машины 1,5 кВт с универсальной машиной переменного тока» производства ООО НПФ «Учтех-Профи».



Объектом исследований в первых лабораторных работах является асинхронный двигатель с фазным ротором, нагрузкой которого служит машина постоянного тока, работающая в режиме генератора. Паспортные данные асинхронного двигателя с фазным ротором приведены в табл. В1. Паспортные данные машины постоянного тока приведены в табл. В2.

Таблица В1. Паспортные данные асинхронного двигателя с фазным ротором

Тип	5МТН-011-6
Мощность, кВт	1,4
Номинальное напряжение обмотки статора, Δ/Υ, В	220/380
Номинальный ток обмотки статора, Δ/Υ, А	8,0/4,6
Номинальный ток обмотки ротора, А	10,5
Номинальная частота вращения, об/мин	861
Номинальный КПД, %	64,6
Коэффициент мощности	0,67
Сопротивление фазы обмотки статора, Ом	5,78
Сопротивление фазы обмотки ротора, Ом	0,77
Режим работы	S3 40%

Таблица В2. Паспортные данные машины постоянного тока

Тип	П32М
Мощность, кВт	1,1
Номинальное напряжение обмотки якоря, В	220
Номинальный ток обмотки якоря, А	6,53
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В	220
Номинальная частота вращения, об/мин	1000
Максимальная частота вращения, об/мин	2000
Номинальный момент, Нм	10,5
Сопротивление обмотки якоря, Ом	3,5
Сопротивление параллельной обмотки возбуждения, Ом	340
Сопротивление последовательной обмотки возбуждения, Ом	0,6
КПД, %	76,5
Момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup>	0,029
Режим работы	S1

Для регулирования токов в цепях обмоток якоря и возбуждения машины постоянного тока, а также в цепи обмотки ротора асинхронного двигателя используются магазины сопротивлений, паспортные данные которых приведены в таблицах В3-В5

Таблица В3. Паспортные данные магазина добавочных сопротивлений обмотки якоря МПТ

Положение переключателя SA3	Сопротивление, Ом	Мощность, Вт	Допустимый ток, А
0	0	-	-
1	11	3600	10
2	20	2000	10
3	25	1600	8
4	50	800	4
5	100	400	2
$\infty$	$\infty$	-	-

Таблица В4. Паспортные данные магазина добавочных сопротивлений обмотки возбуждения МПТ

Положение переключателя SA4	Сопротивление, Ом	Мощность, Вт	Допустимый ток, А
0	0	-	-
1	110	15	0,45
2	160	35	0,45
3	275	55	0,45
4	370	80	0,45

Таблица В5. Паспортные данные магазина добавочных сопротивлений цепи обмотки ротора асинхронного двигателя

Положение переключателя SA5	Сопротивление, Ом	Мощность, Вт	Допустимый ток, А
0	0	-	-
1	4	400	15
2	8	800	15
3	12	1200	15
$\infty$	-	-	-

При выполнении лабораторных работ должны соблюдаться требования Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок (утв. Приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 15 декабря 2020 г. №903н).

После выполнения работы и обработки экспериментальных данных составляется отчет, используемый при защите работы. Титульный лист отчета содержит информацию о названии работы, дате выполнения и исполнителях. Структура отчета включает цель работы, схемы проведения опытов, расчетные формулы с подстановкой значений в цифрах, таблицы с опытными и расчетными данными, построенные характеристики, общий вывод. Таблицы и графики должны быть грамотно оформлены и иметь поясняющие надписи. Оси графиков должны быть подписаны с указанием обозначения и размерности физических величин, сами графики должны быть построены в наглядном масштабе, содержать координатную сетку.

## Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Асинхронные электродвигатели благодаря простоте своей конструкции, надежности в эксплуатации являются самым распространенным видом приводного двигателя в промышленности.

Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может быть произведен непосредственно включением в сеть (прямой пуск). Такой способ пуска является преобладающим для двигателей малой и средней мощности. Он отличается простотой реализации, но сопровождается значительными пусковыми токами, превышающими номинальные в 5...7 раз.

Чрезмерные значения пускового тока могут быть опасны для недостаточно мощных электрических сетей, в которых в случае прямого пуска броски пускового тока могут вызвать значительное падение напряжения, нежелательное для других потребителей. Для ограничения пускового тока применяют пуск при пониженном напряжении, который может быть реализован включением в цепь статора на время пуска активных или реактивных сопротивлений, использованием понижающего трансформатора или переключением обмотки статора при пуске с рабочей схемы  $\Delta$  на пусковую  $Y$ . Недостатком указанных способов является значительное уменьшение пускового и максимального моментов двигателя, пропорциональных квадрату приложенного напряжения, поэтому их можно использовать только при пуске без нагрузки.

Асинхронные двигатели с фазным ротором позволяют осуществлять реостатный пуск двигателя за счет введения в цепь ротора дополнительного пускового сопротивления и постепенного уменьшения его по мере разгона ротора вплоть до нуля. Такой способ позволяет проводить пуск двигателя даже при значительных моментах сопротивления и обеспечивает ограничение пускового тока до приемлемых значений. Однако этот способ пуска применим лишь для двигателей с фазным ротором, у которых к выводам трехфазной обмотки ротора можно подключиться через контактные кольца и щетки. Такие конструкции оказываются более сложными и дорогими, а наличие скользящих контактов снижает общую надежность двигателя и требует ухода в процессе эксплуатации.

Для исследования свойств электрической машины снимают рабочие характеристики машины. Для асинхронных двигателей применяются два основных метода опытного определения рабочих характеристик: непосредственный и косвенный. Непосредственный метод получения рабочих характеристик путем изменения момента нагрузки на валу применяется обычно для двигателей малой мощности. Для двигателей

средней и большой мощности применяют косвенный метод, при котором по данным опытов холостого хода и короткого замыкания строят круговую диаграмму тока и из нее получают необходимые характеристики.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование пусковых и рабочих свойств асинхронного электродвигателя с фазным ротором.

## **Программа работы**

### **1. Экспериментальные исследования**

1. Осуществить реостатный пуск двигателя. При каждом изменении пускового сопротивления фиксировать значения ударных токов статора.
2. Осуществить пуск двигателя при пониженном напряжении.
3. Провести опыт холостого хода АД и снять характеристики холостого хода  $I_0, P_{10} = f(U_1)$  при  $P_2 = 0$  и  $n = \text{const}$ .
4. Снять рабочие характеристики АД при отсутствии добавочного сопротивления в цепи ротора ( $R_{\text{пуск}} = 0$ )  $I_1, P_1, n = f(P_2)$  при  $U_1 = U_{1н}$ .
5. Снять механические характеристики АД при разных значениях добавочного сопротивления в цепи ротора (значения сопротивлений задаются преподавателем).

### **2. Обработка результатов эксперимента**

1. По результатам опыта холостого хода рассчитать коэффициент мощности. Построить характеристики холостого хода  $I_0, P_{10}, \cos\varphi_0 = f(U_1)$  при  $P_2 = 0$  и  $n = \text{const}$ .
2. По результатам опыта холостого хода по методу разделения потерь определить механические потери АД и потери в стали при номинальном напряжении питания.
3. По результатам исследования рабочих характеристик рассчитать коэффициент мощности, скольжение АД, мощность на валу, момент АД и коэффициент полезного действия. Построить рабочие характеристики  $I_1, P_1, s, \cos\varphi, M, \eta = f(P_2)$  при  $U_1 = U_{1н}$ .
4. По результатам исследования механических характеристик при разных значениях добавочного сопротивления в цепи ротора рассчитать скольжение АД и момент и построить на одном графике все характеристики  $M = f(s)$  при  $U_1 = U_{1н}$  и  $R_{\text{пуск}} = \text{const}$ .

## **Пояснения и указания к работе**

Перед проведением работы необходимо привести модули в исходное состояние. Для этого при выключенном автоматическом выключателе QF1 модуля питания стенда:

- установить ручки автотрансформаторов в нулевое положение, повернув их до конца против часовой стрелки;
- отключить нагрузку генератора постоянного тока, установив переключатель SA3 в положение «∞»;
- вывести добавочное сопротивление из цепи обмотки возбуждения генератора постоянного тока, установив переключатель SA4 силового модуля в положение «0»;
- вывести добавочное сопротивление из цепи ротора асинхронного двигателя, установив переключатель SA5 силового модуля в положение «0».

В работе используется асинхронный двигатель с фазным ротором, паспортные данные которого приведены во введении. Для проведения данной работы на персональном компьютере должно быть запущено программное обеспечение *DeltaProfi* и выбрана соответствующая лабораторная работа.

### Реостатный пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

Схема для исследования реостатного пуска асинхронного двигателя приведена на рис. 1.1.

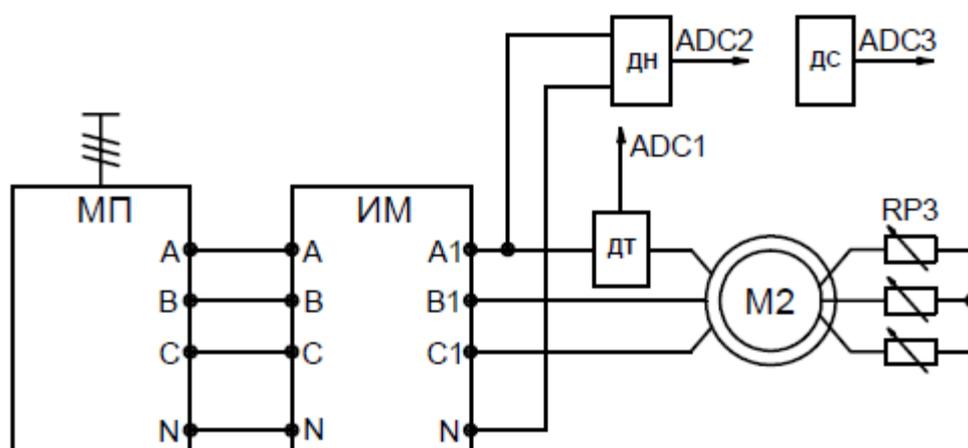


Рис.1.1. Схема для исследования реостатного пуска асинхронного двигателя

Исследуемый асинхронный электродвигатель *M2* получает питание от трехфазного автотрансформатора модуля автотрансформаторов ЛАТР через модуль измерителя мощности ИМ. Автотрансформатор в свою очередь подключен к трехфазному напряжению от модуля питания МП (клеммы *A, B, C*).

Для измерения тока и напряжения в цепи статора можно использовать датчики тока и напряжения силового модуля. Для этого выходы датчиков тока ДТ и напряжения ДН соединяются с входами *ADC1* и *ADC2* блока ввода/вывода для передачи сигнала. Выход датчика скорости *BQ* подключается к входу *ADC3* блока ввода/вывода. Также ток статора, напряжение и скорость вращения ротора можно наблюдать на индикаторах силового модуля. Там же расположены индикаторы тока и напряжения обмотки якоря и тока возбуждения машины постоянного тока, используемой в генераторном режиме в качестве нагрузки для исследуемого асинхронного двигателя.

Перед началом опыта следует убедиться, что обмотка якоря машины постоянного тока разомкнута (переключатель *SA3* в положении «∞»). В этом случае асинхронный двигатель не имеет нагрузки, кроме собственного момента сопротивления электромашинного агрегата.

Для осуществления реостатного пуска асинхронного двигателя необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- включить автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда и нажатием кнопки «Вкл» модуля питания подать напряжение на элементы стенда;

- последовательно перевести переключатель *SA5* силового модуля в положения «3» – «2» – «1» – «0», ступенчато уменьшая добавочное сопротивление *RP3* в цепи ротора асинхронного двигателя вплоть до нулевого значения и наблюдая процесс разгона ротора асинхронного двигателя;

- по окончании разгона зафиксировать значение частоты вращения ротора асинхронного двигателя, напряжение питания и ток холостого хода.

После проведения опыта последовательно отключить модуль питания (кнопка «Откл») и автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда. Дождаться полной остановки ротора.

### **Пуск асинхронного двигателя при пониженном напряжении**

Схема для исследования пуска асинхронного двигателя при пониженном напряжении приведена на рис. 1.2. Она отличается наличием автотрансформатора в цепи питания для изменения напряжения на обмотке статора.

Перед началом опыта следует убедиться, что обмотка якоря машины постоянного тока разомкнута (переключатель *SA3* в положении «∞»). В этом случае асинхронный двигатель не имеет нагрузки, кроме собственного момента сопротивления электромашинного агрегата.

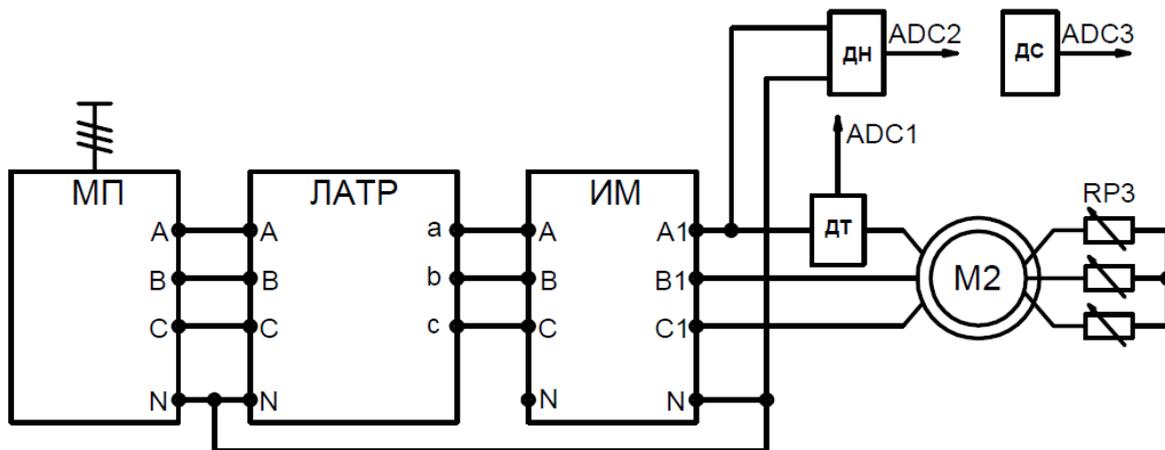


Рис.1.2. Схема для исследования пуска асинхронного двигателя при пониженном напряжении

Для осуществления пуска при пониженном напряжении необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- заранее замкнуть накоротко цепь ротора асинхронного двигателя, установив переключатель *SA5* силового модуля в положение «0»;
- включить автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда и нажатием кнопки «Вкл» модуля питания подать напряжение на элементы стенда;
- ручкой трехфазного автотрансформатора плавно увеличить напряжение на обмотках статора асинхронного двигателя до достижения номинального фазного напряжения 220 В (по показаниям модуля измерителя мощности), наблюдая процесс разгона ротора асинхронного двигателя;
- по окончании разгона зафиксировать значение частоты вращения ротора асинхронного двигателя, напряжение питания и ток холостого хода.

После проведения опыта уменьшить до нуля напряжение питания асинхронного двигателя, повернув ручку трехфазного автотрансформатора в крайнее положение против часовой стрелки. Последовательно отключить модуль питания (кнопка «Откл») и автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда. Дождаться полной остановки ротора.

### **Опыт холостого хода асинхронного двигателя**

Для проведения опыта холостого хода АД используется та же схема соединения, что приведена на рис. 1.2. Она позволяет осуществлять пуск двигателя при пониженном напряжении.

Опыт холостого хода проводится при изменении напряжения питания обмотки статора АД в условиях отсутствия нагрузки двигателя при его вращении с постоянной скоростью.

Опыт проводится в следующей последовательности:

- осуществить пуск двигателя при пониженном напряжении;
- ручкой трехфазного трансформатора установить фазное напряжение на обмотке статора АД на уровне 240 В;
- последовательно уменьшая напряжение, снять 7...10 точек характеристики до напряжения, при котором частота вращения ротора начнет заметно снижаться. Для каждой точки, включая номинальное фазное напряжение 220 В, фиксировать величины фазного напряжения  $U_1$ , тока статора  $I_{10}$ , потребляемой активной мощности  $P_{10}$  и частоты вращения  $n$ . Результаты измерений сохранить в таблице 1.1.

После проведения опыта уменьшить до нуля напряжение питания асинхронного двигателя, повернув ручку трехфазного автотрансформатора в крайнее положение против часовой стрелки. Последовательно отключить модуль питания (кнопка «Откл») и автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда.

Таблица 1.1.

<i>Опытные данные</i>					
$U_1$ , В					
$I_{10}$ , А					
$P_{10}$ , Вт					
$n$ , об/мин					
<i>Расчетные данные</i>					
$\cos\varphi_0$					
$\Delta P_{\text{эл}}$ , Вт					
$P_0$ , Вт					
$I_{10}^*$					

В табл. 1.1 приняты следующие обозначения измеряемых величин:  
 $U_1$  – фазное напряжение питания обмотки статора АД, В;  
 $I_{10}$  – ток фазы статора АД в режиме холостого хода, А;  
 $P_{10}$  – активная мощность, потребляемая всеми фазами АД в режиме холостого хода, Вт;  
 $n$  – частота вращения, об/мин.

При обработке экспериментальных данных следует по полученным значениям рассчитать для каждой точки характеристики коэффициент мощности  $\cos\varphi_0$ , электрические потери в обмотке статора  $\Delta P_{\text{эл}}$ ,

потребляемую мощность за исключением потерь в обмотке статора  $P_0 = P_{10} - \Delta P_{\text{эл}}$ , а также относительные значения тока холостого хода  $I_{10}^*$ . Расчетные значения сохранить в таблице 1.1.

Построить на одном графике характеристики холостого хода асинхронного двигателя  $\cos\varphi_0$  и  $I_{10}^*$  в зависимости от напряжения  $U_1$ .

Воспользовавшись методом разделения потерь определить механические потери в электромашинном агрегате  $\Delta P_{\text{мех}}$  и потери в стали статора АД при номинальном напряжении питания  $\Delta P_{\text{ст}}$ .

Коэффициент мощности в режиме холостого хода находят по формуле

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{10}}{3U_1 I_{10}^*},$$

где  $U_1$  и  $I_{10}$  – фазные значения напряжения и тока статора,  $P_{10}$  – потребляемая активная мощность АД.

Относительные значения тока холостого хода находят как

$$I_{10}^* = \frac{I_{10}}{I_{1н}},$$

где  $I_{1н}$  – номинальное значение тока статора.

Электрические потери в обмотке статора

$$\Delta P_{\text{эл}} = 3I_{10}^2 R_1,$$

где  $R_1$  – активное сопротивление фазы статора (см. паспортные данные АД во введении).

В режиме холостого хода вся поступающая в АД активная мощность расходуется только на покрытие потерь: электрических потерь в обмотке статора  $\Delta P_{\text{эл}}$ , потерь в стали статора  $\Delta P_{\text{ст}}$  и механических потерь электромашинного агрегата (асинхронного двигателя, ротор которого соединен муфтой с ротором машины постоянного тока)  $\Delta P_{\text{мех}}$

$$P_{10} = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}}$$

или

$$P_0 = P_{10} - \Delta P_{\text{эл}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}}.$$

Потери в стали пропорциональны квадрату индукции, а значит квадрату напряжения, а механические потери остаются постоянными при неизменной частоте вращения. Отсюда следует, что, экстраполировав до нуля зависимость  $P_0 = f(U_1)$  можно получить значение механических потерь, ведь механические потери остаются постоянными, в то время как потери в стали при  $U_1 = 0$  становятся равны нулю. Эта зависимость показана на рис. 1.3.

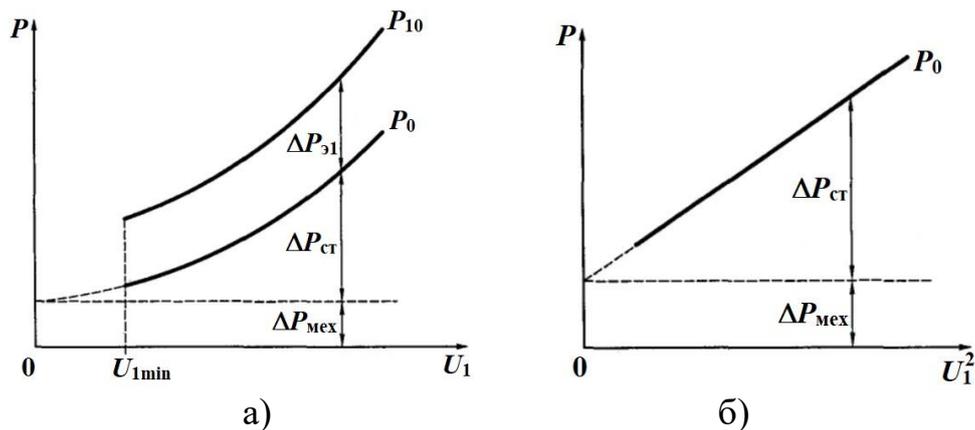


Рис. 1.3. Зависимость потребляемой на холостом ходу активной мощности и составляющих потерь от напряжения (а) и от квадрата напряжения (б)

Еще более точно определить механические потери можно, экстраполировав до нуля зависимость  $P_0 = f(U_1^2)$ , ведь она представляет собой прямую линию, так как потери в стали пропорциональны квадрату напряжения.

После определения механических потерь можно найти потери в стали при номинальном напряжении питания

$$\Delta P_{\text{ст}} = P_0 - \Delta P_{\text{мех}}.$$

Для проверки следует сравнить распределение потерь в АД на холостом ходу с потребляемой активной мощностью при номинальном напряжении.

### Снятие рабочих характеристик асинхронного двигателя

Рабочие характеристики представляют собой зависимость мощности, подводимой к асинхронному двигателю, фазного тока, КПД, скольжения от механической мощности на валу электродвигателя при номинальном напряжении питания от сети с номинальной частотой. Для исследования рабочих характеристики АД используется схема соединения, приведенная на рис. 1.4.

Исследуемый асинхронный электродвигатель  $M2$  получает питание от трехфазного автотрансформатора модуля автотрансформаторов ЛАТР через модуль измерителя мощности ИМ. Автотрансформатор в свою очередь подключен к трехфазному напряжению от модуля питания МП.

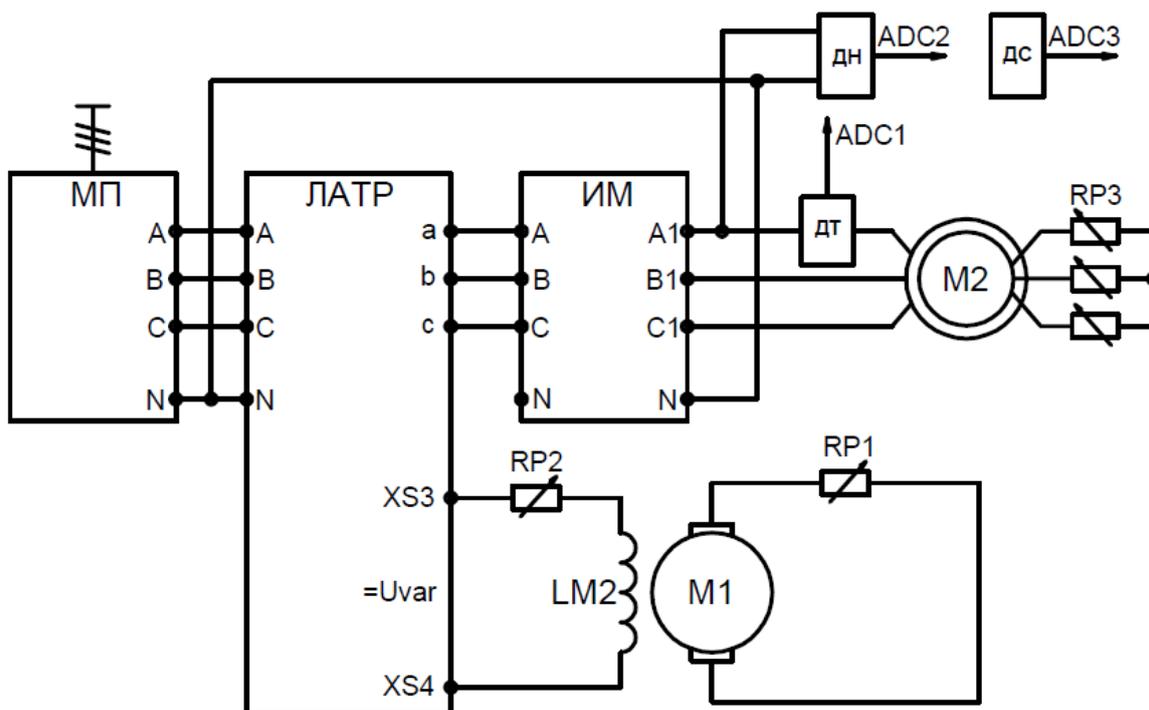


Рис. 1.4. Схема для исследования рабочих характеристик асинхронного двигателя

Для измерения тока и напряжения в цепи статора можно использовать датчики тока и напряжения силового модуля. Для этого выходы датчиков тока ДТ и напряжения ДН соединяются с входами  $ADC1$  и  $ADC2$  блока ввода/вывода для передачи сигнала. Выход датчика скорости  $BQ$  подключается к входу  $ADC3$  блока ввода/вывода. Также ток статора, напряжение и скорость вращения ротора можно наблюдать на индикаторах силового модуля.

В качестве нагрузки для исследуемого асинхронного двигателя используется машина постоянного тока, якорь которой механически соединен с ротором асинхронного двигателя. Машина постоянного тока работает в режиме генератора. Обмотка возбуждения  $LM2$  машины постоянного тока подключается к выходу регулируемого источника напряжения модуля автотрансформаторов (клеммы  $XS3$ ,  $XS4$ ). Обмотка якоря замыкается на регулируемое сопротивление  $RP1$  силового модуля. Ток и напряжение обмотки якоря, как и ток обмотки возбуждения измеряются с помощью соответствующих индикаторов силового модуля.

Опыт начинается с пуска асинхронного двигателя при пониженном напряжении, для чего необходимо:

- заранее замкнуть накоротко цепь ротора асинхронного двигателя, установив переключатель  $SA5$  силового модуля в положение «0»;

– включить автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда и нажатием кнопки «Вкл» модуля питания подать напряжение на элементы стенда;

– ручкой трехфазного автотрансформатора плавно увеличить напряжение на обмотке статора асинхронного двигателя до достижения фазного напряжения 220 В, наблюдая процесс разгона ротора асинхронного двигателя.

Исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя проводят при номинальном напряжении питания в следующей последовательности:

– ручкой однофазного трансформатора увеличить напряжение на обмотке возбуждения генератора постоянного тока так, чтобы ток возбуждения достиг номинального значения  $I_B = 0,65$  А;

– зафиксировать первую точку характеристики – точку холостого хода, когда обмотка якоря генератора постоянного тока остается разомкнутой (переключатель  $SA3$  находится в положении « $\infty$ »). При этом фиксируются величины напряжения  $U_1$  и тока статора  $I_1$  асинхронного двигателя, потребляемая мощность  $P_1$ , частота вращения  $n$ , напряжение якоря  $U_a$  генератора постоянного тока (ток якоря  $I_a$  при этом равен нулю);

– последовательно увеличивая нагрузку генератора постоянного тока с помощью переключателя  $SA3$ , снять несколько точек характеристики, но не допуская превышения током якоря генератора значения  $I_a = 7$  А. Для каждой точки фиксировать величины напряжения  $U_1$  и тока статора  $I_1$  асинхронного двигателя, потребляемую мощность  $P_1$ , частоту вращения  $n$ , ток  $I_a$  и напряжение якоря  $U_a$  генератора постоянного тока. Результаты измерений сохранить в таблице 1.2.

После проведения опыта отключить нагрузку генератора постоянного тока, переведя переключатель  $SA3$  в положение « $\infty$ », уменьшить до нуля напряжение питания асинхронного двигателя и напряжение на обмотке возбуждения генератора постоянного тока, повернув ручки автотрансформаторов в крайнее положение против часовой стрелки. Последовательно отключить модуль питания (кнопка «Откл») и автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда.

Таблица 1.2.

Опытные данные					
$U_1, В$					
$I_1, А$					
$P_1, Вт$					
$n, об/мин$					

$U_a, В$					
$I_a, А$					
<i>Расчетные данные</i>					
$s$					
$\cos\varphi$					
$\Delta P_{\text{с1}}, ВТ$					
$\Delta P_{\text{с2}}, ВТ$					
$P_2, ВТ$					
$M, Нм$					
КПД					

В табл. 1.2 приняты следующие обозначения измеряемых величин:

$U_1$  – фазное напряжение питания обмотки статора АД, В;

$I_1$  – ток фазы статора АД, А;

$P_1$  – активная мощность, потребляемая всеми фазами АД, Вт;

$n$  – частота вращения, об/мин;

$U_a$  – напряжение обмотки якоря ГПТ, В;

$I_a$  – ток якоря ГПТ, А.

При обработке экспериментальных данных следует по полученным значениям рассчитать для каждой точки характеристики скольжение  $s$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , электрические потери в обмотке статора  $\Delta P_{\text{с1}}$  и ротора  $\Delta P_{\text{с2}}$ , мощность на валу асинхронного двигателя  $P_2$ , вращающий момент  $M$ , а также коэффициент полезного действия асинхронного двигателя. Расчетные значения сохранить в таблице 1.2.

Построить на одном графике рабочие характеристики асинхронного двигателя  $I_1, P_1, s, \cos\varphi, M, \eta$  в зависимости от мощности на валу  $P_2$  при  $U_1 = U_{1н}$ .

Коэффициент мощности находят по формуле

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{3U_1I_1},$$

где  $U_1$  и  $I_1$  – фазные значения напряжения и тока статора,  $P_1$  – потребляемая активная мощность АД.

Скольжение ротора асинхронного двигателя

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

где  $n_1 = 60f/p$  – частота вращения поля статора.

Электрические потери в обмотке статора асинхронного двигателя

$$\Delta P_{\text{с1}} = 3I_1^2 R_1,$$

где  $R_1$  – активное сопротивление фазы статора.

Электрические потери в обмотке ротора асинхронного двигателя пропорциональны скольжению и могут быть найдены через электромагнитную мощность как

$$\Delta P_{\text{э}2} = P_{\text{ЭМ}} s = (P_1 - \Delta P_{\text{ст}} - \Delta P_{\text{э}1}) s,$$

где  $P_{\text{ЭМ}}$  – электромагнитная мощность асинхронного двигателя;

$P_1$  – потребляемая активная мощность;

$\Delta P_{\text{ст}}$  – потери в стали статора при номинальном напряжении питания, найденные ранее в опыте холостого хода;

$\Delta P_{\text{э}1}$  – электрические потери в обмотке статора;

$s$  – скольжение ротора.

Мощность на валу асинхронного двигателя рассчитывают на основе данных о потребляемой мощности с учетом потерь в стали, электрических потерь в обмотках статора и ротора и механических потерь асинхронного двигателя

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{\text{ст}} - \Delta P_{\text{э}1} - \Delta P_{\text{э}2} - \Delta P_{\text{мех}} / 2$$

или

$$P_2 = P_{\text{ЭМ}}(1 - s) - \Delta P_{\text{мех}} / 2,$$

где  $\Delta P_{\text{мех}}$  – найденные ранее механические потери электромашинного агрегата, состоящего из асинхронного двигателя и машины постоянного тока.

На основании механической мощности можно рассчитать вращающий момент асинхронного двигателя

$$M = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2}{2\pi n/60},$$

где  $\Omega$  – угловая скорость вращения ротора.

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

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

Для проверки следует по построенным рабочим характеристикам определить значения частоты вращения  $n$ , тока статора  $I_1$ , коэффициента мощности  $\cos\phi$  и КПД при номинальной мощности асинхронного двигателя и сравнить их с паспортными данными исследуемого двигателя.

### **Снятие механических характеристик асинхронного двигателя**

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость вращающего момента от скольжения,

полученную при неизменном напряжении  $U_1 = \text{const}$  и частоте  $f_1 = \text{const}$  питающей сети. Естественная механическая характеристика  $M = f(s)$ , соответствующая номинальным значениям напряжения и частоты при отсутствии дополнительных сопротивлений в цепи ротора, фактически уже была получена при снятии рабочих характеристик. В данном опыте предстоит снять аналогичные характеристики при разных значениях дополнительного сопротивления  $R_{\text{пуск}}$  в цепи ротора, используемого при реостатном пуске. Для снятия механических характеристик АД используется схема соединения, приведенная на рис. 1.4.

Исследуемый асинхронный электродвигатель  $M2$  получает питание от трехфазного автотрансформатора модуля автотрансформаторов ЛАТР через модуль измерителя мощности ИМ. Автотрансформатор в свою очередь подключен к трехфазному напряжению от модуля питания МП. В цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором включается дополнительное активное сопротивление с помощью переключателя  $SA5$ . В положении «0» ротор АД оказывается замкнут, дополнительное сопротивление отсутствует, что соответствует естественной механической характеристике. В положении «∞» цепь ротора оказывается разомкнутой, ток ротора протекать не может и асинхронный двигатель не развивает вращающий момент. Переводя переключатель  $SA5$  в положения «1», «2», «3» можно вводить в цепь ротора все большее активное сопротивление. Для этих дополнительных сопротивлений и снимаются механические характеристики в данном опыте.

Для измерения тока и напряжения в цепи статора можно использовать датчики тока и напряжения силового модуля. Для этого выходы датчиков тока ДТ и напряжения ДН соединяются с входами  $ADC1$  и  $ADC2$  блока ввода/вывода для передачи сигнала. Выход датчика скорости  $BQ$  подключается к входу  $ADC3$  блока ввода/вывода. Также ток статора, напряжение и скорость вращения ротора можно наблюдать на индикаторах силового модуля.

В качестве нагрузки для исследуемого асинхронного двигателя используется машина постоянного тока, якорь которой механически соединен с ротором асинхронного двигателя. Машина постоянного тока работает в режиме генератора. Обмотка возбуждения  $LM2$  машины постоянного тока подключается к выходу регулируемого источника напряжения модуля автотрансформаторов (клеммы  $XS3$ ,  $XS4$ ). Обмотка якоря замыкается на регулируемое сопротивление  $RP1$  силового модуля. Ток и напряжение обмотки якоря, как и ток обмотки возбуждения измеряются с помощью соответствующих индикаторов силового модуля.

Опыт начинается с пуска асинхронного двигателя при пониженном напряжении, для чего необходимо:

- заранее замкнуть накоротко цепь ротора асинхронного двигателя, установив переключатель *SA5* силового модуля в положение «0»;
- включить автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда и нажатием кнопки «Вкл» модуля питания подать напряжение на элементы стенда;
- ручкой трехфазного автотрансформатора плавно увеличить напряжение на обмотке статора асинхронного двигателя до достижения фазного напряжения 220 В, наблюдая процесс разгона ротора асинхронного двигателя.

Процесс снятия механических характеристик асинхронного двигателя проводят в следующей последовательности:

- установить переключатель *SA5* в положение «1»;
- ручкой однофазного трансформатора увеличить напряжение на обмотке возбуждения генератора постоянного тока так, чтобы ток возбуждения достиг номинального значения  $I_B = 0,65$  А;
- зафиксировать первую точку характеристики – точку холостого хода, когда обмотка якоря генератора постоянного тока остается разомкнутой (переключатель *SA3* находится в положении «∞»). При этом фиксируются величины напряжения  $U_1$  и тока статора  $I_1$  асинхронного двигателя, потребляемая мощность  $P_1$ , частота вращения  $n$ , напряжение якоря  $U_a$  генератора постоянного тока (ток якоря  $I_a$  при этом равен нулю);
- последовательно увеличивая нагрузку генератора постоянного тока с помощью переключателя *SA3*, снять несколько точек характеристики, но не допуская превышения током якоря генератора значения  $I_a = 7$  А. Для каждой точки фиксировать величины напряжения  $U_1$  и тока статора  $I_1$  асинхронного двигателя, потребляемую мощность  $P_1$ , частоту вращения  $n$ , ток  $I_a$  и напряжение якоря  $U_a$  генератора постоянного тока. Результаты измерений сохранить в таблице, аналогичной табл. 1.2;
- установить переключатель *SA5* в положение «2», введя в цепь ротора большее добавочное сопротивление;
- повторить процесс снятия механической характеристики для этого значения добавочного сопротивления, сохранив результаты измерений в таблице, аналогичной табл. 1.2;
- установить переключатель *SA5* в положение «3» и еще раз повторить процесс снятия механической характеристики, сохранив результаты измерений в таблице, аналогичной табл. 1.2.

После проведения опыта отключить нагрузку генератора постоянного тока, переведя переключатель *SA3* в положение «∞»,

уменьшить до нуля напряжение питания асинхронного двигателя и напряжение на обмотке возбуждения генератора постоянного тока, повернув ручки автотрансформаторов в крайнее положение против часовой стрелки. Последовательно отключить модуль питания (кнопка «Откл») и автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда.

При обработке экспериментальных данных следует по полученным значениям рассчитать для каждой точки характеристики скольжение  $s$ , электрические потери в обмотке статора  $\Delta P_{\sigma 1}$  и ротора  $\Delta P_{\sigma 2}$ , мощность на валу асинхронного двигателя  $P_2$ , вращающий момент  $M$ , а также коэффициент полезного действия асинхронного двигателя. Расчетные значения сохранить в таблице.

Построить на одном графике механические характеристики асинхронного двигателя  $M = f(s)$ , полученные при разных значениях добавочного сопротивления в цепи ротора, включая естественную механическую характеристику, полученную ранее при снятии рабочих характеристик.

По построенным механическим характеристикам следует определить значения частоты вращения  $n$ , соответствующие номинальному моменту асинхронного двигателя при разных значениях полного активного сопротивления ротора. Для тех же частот вращения определить соответствующие значения КПД двигателя.

Номинальный момент может быть найден через номинальные значения мощности асинхронного двигателя и частоты вращения

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\Omega_n} = \frac{P_{2n}}{2\pi n_n / 60}.$$

### Контрольные вопросы

Основные вопросы для защиты

1. Как снималась зависимость тока холостого хода от величины напряжения? Какой характер имеет эта зависимость? Объясните ход кривой.

2. Как снималась зависимость потерь холостого хода от величины напряжения? Какой характер имеет эта зависимость? Объясните ход кривой.

3. Как осуществлялось построение зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя при изменении питающего напряжения в режиме холостого хода?

4. Как снималась зависимость тока, потребляемого двигателем из

сети, от нагрузки на валу? Какой характер имеет эта зависимость? Объясните ход кривой.

5. Как снималась зависимость активной мощности, потребляемой двигателем из сети, от нагрузки на валу? Какой характер имеет эта зависимость? Объясните ход кривой.

6. Как снималась зависимость момента, развиваемого двигателем, от нагрузки на валу? Какой характер имеет эта зависимость? Объясните ход кривой.

7. Как осуществлялось построение зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя при изменении нагрузки на валу двигателя?

8. Почему при пуске асинхронного двигателя возникает бросок тока? Насколько велик пусковой ток?

9. Как осуществлялось построение механической характеристики асинхронного двигателя при выполнении лабораторной работы?

10. Как осуществлялся расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

11. Нарисуйте схему замещения асинхронного двигателя. Перечислите параметры схемы замещения.

Дополнительные вопросы для защиты

1. Почему двигатель называется асинхронным?

2. Как зависит критическое скольжение от активного сопротивления обмотки ротора?

3. Как зависит электромагнитный момент двигателя от активного сопротивления обмотки ротора?

4. Как зависит электромагнитный момент двигателя от напряжения питания?

5. Как зависят электрические потери в роторе от электромагнитной мощности?

6. Запишите уравнения асинхронного двигателя.

7. Какие потери существуют в асинхронном двигателе?

8. Почему магнитными потерями в роторе асинхронного двигателя пренебрегают?

9. Как связана частота токов в роторе с частотой питающей сети?

10. Почему сердечники статора и ротора выполняют из электротехнической стали?

11. Почему сердечники статора и ротора выполняют шихтованными?

12. По какому закону в обмотке ротора наводится ЭДС?

13. Почему асинхронный двигатель, рассчитанный на работу от сети с частотой 60 Гц, будет перегреваться при подключении к питающей сети с частотой 50 Гц?

14. Как можно повысить пусковой момент асинхронного двигателя?
15. Как можно снизить пусковой ток асинхронного двигателя?
16. Как выбор величины воздушного зазора влияет на ток холостого хода асинхронного двигателя?
17. В чем различие между режимами идеального и реального холостого хода?
18. Зачем осуществляется приведение величин обмотки ротора к величинам обмотки статора?

### **Литература**

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§§ 11.1, 11.2, 11.6)
2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§§ 3.1, 3.2, 3.3)
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2017. (§§ 40.7, 44.1, 44.2, 45.2)

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ

Асинхронные генераторы благодаря простоте конструкции и дешевизне часто используются как автономные источники энергии небольшой мощности. Асинхронные генераторы средней и большой мощности используются для работы параллельно с сетью переменного тока в составе ветропарков и микро-ГЭС, не требующих обслуживающего персонала. Основным недостатком асинхронных генераторов является потребление реактивной мощности для создания магнитного поля в машине, что проще обеспечить при работе генератора параллельно с сетью.

Целью работы является изучение способа включения асинхронной машины для работы в генераторном режиме, исследование рабочих свойств асинхронного генератора, работающего параллельно с сетью.

#### **Программа работы**

##### ***1. Экспериментальные исследования***

1. Осуществить перевод асинхронной машины из двигательного в генераторный режим работы.

2. Провести опыт нагрузки асинхронного генератора и снять рабочие характеристики генератора при работе параллельно с сетью.

##### ***2. Обработка результатов эксперимента***

1. По результатам исследования рабочих характеристик рассчитать подводимую мощность, скольжение, коэффициент мощности и КПД асинхронного генератора. Построить рабочие характеристики  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $s$ ,  $\cos\varphi$ ,  $\eta = f(P_2)$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f = \text{const}$ .

#### **Пояснения и указания к работе**

Перед проведением работы необходимо привести модули в исходное состояние. Для этого при выключенном автоматическом выключателе QF1 модуля питания стенда:

– установить ручки автотрансформаторов в нулевое положение, повернув их до конца против часовой стрелки;

– ввести максимальное дополнительное сопротивление в цепь якоря машины постоянного тока, установив переключатель SA3 силового модуля в положение «5»;

– вывести добавочное сопротивление из цепи обмотки возбуждения машины постоянного тока, установив переключатель SA4 силового модуля в положение «0».

В работе используется асинхронная машина с фазным ротором, паспортные данные которой приведены во введении. Для проведения данной работы на персональном компьютере должно быть запущено программное обеспечение *DeltaProfi* и выбрана соответствующая лабораторная работа.

Схема для исследования асинхронного генератора приведена на рис. 2.1.

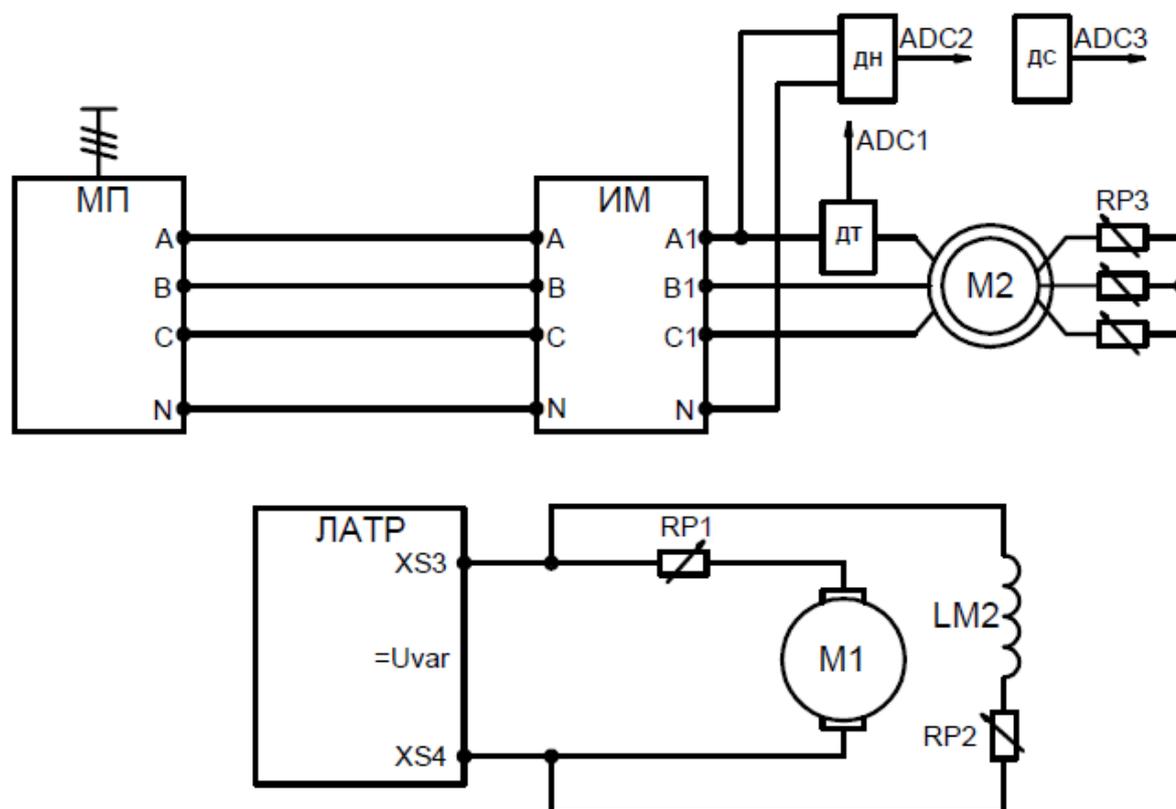


Рис.2.1. Схема для исследования асинхронного генератора

Исследуемая асинхронная машина  $M2$  подключается к клеммам  $A$ ,  $B$ ,  $C$  источника трехфазного напряжения модуля питания через модуль измерителя мощности ИМ. Для вращения ротора исследуемого асинхронного генератора используется машина постоянного тока, работающая в двигательном режиме в качестве приводного двигателя параллельного возбуждения. Обмотка якоря двигателя постоянного тока  $M1$  подключается к выходу регулируемого источника постоянного напряжения модуля автотрансформаторов  $XS3 - XS4$ . Обмотка возбуждения  $LM2$  двигателя постоянного тока подключается к тем же зажимам регулируемого источника постоянного напряжения параллельно обмотке якоря.

Для измерения тока и напряжения в цепи статора можно использовать датчики тока и напряжения силового модуля. Для этого выходы датчиков тока ДТ и напряжения ДН соединяются с входами *ADC1* и *ADC2* блока ввода/вывода для передачи сигнала. Выход датчика скорости *BQ* подключается к входу *ADC3* блока ввода/вывода. Также ток статора, напряжение и скорость вращения ротора можно наблюдать на индикаторах силового модуля. Там же расположены индикаторы тока и напряжения обмотки якоря и тока возбуждения машины постоянного тока.

### **Перевод асинхронной машины в генераторный режим**

Исследование режимов работы асинхронной машины начинается с запуска ее в режиме двигателя. Здесь используется реостатный пуск при отсутствии нагрузки на валу двигателя.

Вначале выполняют реостатный пуск асинхронного двигателя в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда и нажатием кнопки «Вкл» модуля питания подать напряжение на элементы стенда;

- последовательно перевести переключатель *SA5* силового модуля в положения «3» – «2» – «1» – «0», ступенчато уменьшая добавочное сопротивление *RP3* в цепи ротора асинхронного двигателя вплоть до нулевого значения и наблюдая процесс разгона ротора асинхронного двигателя.

По окончании разгона следует убедиться, что асинхронная машина работает в двигательном режиме на холостом ходу, вращаясь со скоростью ниже синхронной.

После пуска асинхронного двигателя включают приводной двигатель – машину постоянного тока параллельного возбуждения, и переводят асинхронную машину в генераторный режим работы, постепенно увеличивая скорость вращения ротора. Для этого необходимо:

- нажатием кнопки «Вкл» модуля автотрансформаторов подать напряжение на однофазный автотрансформатор;

- поворачивая ручку однофазного автотрансформатора подать напряжение на обмотки машины постоянного тока: если при этом скорость электромашинного агрегата будет уменьшаться (машина постоянного тока создает тормозной момент, нагружая асинхронный двигатель), следует повернуть ручку однофазного трансформатора против часовой стрелки до нулевого напряжения, обесточить цепь обмотки якоря машины постоянного тока, нажав кнопку «Откл» модуля

автотрансформаторов, поменять полярность питания обмотки якоря и вновь подать напряжение на обмотку якоря (нажав кнопку «Вкл» модуля автотрансформаторов и поворачивая ручку однофазного автотрансформатора) – скорость вращения электромашинного агрегата должна при этом возрастать;

– постепенно увеличивая момент приводного двигателя постоянного тока путем увеличения напряжения питания с помощью ручки однофазного автотрансформатора переводят асинхронную машину в генераторный режим работы, наблюдая за показаниями на трехфазном измерителе мощности: активная мощность должна уменьшиться до нуля, а затем должна возрастать, скорость вращения при этом непрерывно возрастает. Если с помощью изменения напряжения питания приводного двигателя не удастся перевести асинхронную машину в генераторный режим работы, следует уменьшить ток возбуждения машины постоянного тока с помощью переключателя SA4;

– после перевода асинхронной машины в генераторный режим работы рекомендуется установить такой момент приводного двигателя, при котором активная мощность в каждой из фаз асинхронной машины равна нулю, после чего можно переходить к опыту нагрузки асинхронного генератора.

### **Опыт нагрузки асинхронного генератора**

Рабочие характеристики генератора представляют собой зависимость механической мощности  $P_1$ , подводимой к генератору, тока статора  $I_1$ , скольжения  $s$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и КПД генератора  $\eta$  от полной активной мощности  $P_2$ , отдаваемой генератором в сеть, при неизменных значениях напряжения и частоты сети  $U_1 = \text{const}, f = \text{const}$ .

Для снятия рабочих характеристик асинхронную машину, переведенную в генераторный режим работы, постепенно нагружают, увеличивая момент приводного двигателя путем увеличения питающего напряжения с помощью ручки однофазного автотрансформатора. Увеличение момента приводного двигателя означает увеличение механической мощности, передаваемой асинхронному генератору, что приводит к соответствующему увеличению активной электрической мощности, отдаваемой генератором в сеть. При этом надо следить за токами статора асинхронной машины и током якоря машины постоянного тока, не допуская превышения их номинальных значений.

В процессе снятия рабочих характеристик рекомендуется также зафиксировать показания приборов при нулевом значении отдаваемой мощности, а также снять несколько точек в двигательном режиме работы асинхронной машины при уменьшении напряжения питания приводного двигателя. Для каждой точки фиксировать величины напряжения  $U_1$  и

тока статора  $I_1$  асинхронной машины, активную электрическую мощность  $P_1$  с учетом знака, частоту вращения  $n$ , ток  $I_a$  и напряжение якоря  $U_a$  машины постоянного тока. Результаты измерений сохранить в таблице 2.1.

После проведения опыта отключить питание приводного двигателя, повернув ручку однофазного автотрансформатора в крайнее положение против часовой стрелки и нажав кнопку «Откл» модуля автотрансформаторов, последовательно отключить модуль питания (кнопка «Откл») и автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда.

Таблица 2.1.

<i>Опытные данные</i>					
$U_1, В$					
$I_1, А$					
$P_2, Вт$					
$n, об/мин$					
$U_a, В$					
$I_a, А$					
<i>Расчетные данные</i>					
$s$					
$\cos\varphi$					
$\Delta P_{\sigma 1}, Вт$					
$\Delta P_{\sigma 2}, Вт$					
$P_1, Вт$					
$M, Нм$					
КПД					

В табл. 2.1 приняты следующие обозначения измеряемых величин:  
 $U_1$  – фазное напряжение статора асинхронной машины, В;  
 $I_1$  – ток фазы статора асинхронной машины, А;  
 $P_2$  – активная электрическая мощность, отдаваемая или потребляемая всеми фазами асинхронной машины, Вт;  
 $n$  – частота вращения, об/мин;  
 $U_a$  – напряжение обмотки якоря машины постоянного тока, В;  
 $I_a$  – ток якоря машины постоянного тока, А.

При обработке экспериментальных данных следует по полученным значениям рассчитать для каждой точки характеристики скольжение  $s$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , электрические потери в обмотке статора  $\Delta P_{\sigma 1}$  и ротора  $\Delta P_{\sigma 2}$ , подводимую механическую мощность на валу

асинхронной машины  $P_1$ , вращающий момент  $M$ , а также коэффициент полезного действия асинхронной машины. Расчетные значения сохранить в таблице 2.1.

Построить на одном графике рабочие характеристики асинхронного генератора  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $s$ ,  $\cos\varphi$ ,  $M$ ,  $\eta$  в зависимости от активной электрической мощности  $P_2$  при  $U_1 = U_{1н}$  (включая отрицательные значения мощности для двигательного режима).

Коэффициент мощности находят по формуле

$$\cos\varphi = \frac{P_2}{3U_1I_1},$$

где  $U_1$  и  $I_1$  – фазные значения напряжения и тока статора,  $P_2$  – отдаваемая активная электрическая мощность генератора.

Скольжение ротора асинхронного генератора

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

где  $n_1 = 60f/p$  – частота вращения поля статора. Скольжение в генераторном режиме становится отрицательным.

Электрические потери в обмотке статора асинхронного генератора

$$\Delta P_{\sigma 1} = 3I_1^2 R_1,$$

где  $R_1$  – активное сопротивление фазы статора (см. паспортные данные асинхронной машины во введении).

Электрические потери в обмотке ротора асинхронного генератора пропорциональны скольжению и могут быть найдены через электромагнитную мощность как

$$\Delta P_{\sigma 2} = P_{\text{ЭМ}} |s| = (P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\sigma 1}) |s|,$$

где  $P_{\text{ЭМ}}$  – электромагнитная мощность асинхронного генератора;

$P_2$  – отдаваемая активная электрическая мощность генератора;

$\Delta P_{\text{ст}}$  – потери в стали статора при номинальном напряжении питания, найденные ранее в опыте холостого хода АД;

$\Delta P_{\sigma 1}$  – электрические потери в обмотке статора;

$s$  – скольжение ротора (берется по модулю).

Мощность на валу асинхронного генератора  $P_1$  можно рассчитать через механическую мощность приводного двигателя, либо на основе данных об отдаваемой активной мощности генератора  $P_2$  с учетом потерь в стали, электрических потерь в обмотках статора и ротора и механических потерь асинхронного генератора

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\sigma 1} + \Delta P_{\sigma 2} + \Delta P_{\text{мех}} / 2,$$

где  $\Delta P_{\text{мех}}$  – найденные ранее механические потери электромашинного агрегата, состоящего из асинхронной машины и машины постоянного тока.

На основании механической мощности генератора  $P_1$  можно рассчитать момент асинхронного генератора

$$M = \frac{P_1}{\Omega} = \frac{P_1}{2\pi n/60},$$

где  $\Omega$  – угловая скорость вращения ротора.

Коэффициент полезного действия асинхронного генератора

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

При расчете точек характеристики, полученных в двигательном режиме работы, следует учитывать обратное направление потока мощности и рассчитывать мощность на валу двигателя, вычитая из полученной активной электрической мощности все потери.

### Контрольные вопросы

1. В каких пределах может изменяться скольжение асинхронной машины?
2. Потребляет ли асинхронная машина электроэнергию при вращении ротора с синхронной скоростью?
3. Как можно использовать асинхронную машину в режиме генератора?
4. Может ли асинхронный генератор работать на автономную сеть?
5. Изобразите векторную диаграмму асинхронного генератора.
6. Сравните достоинства и недостатки генераторов на базе синхронной и асинхронной машины.
7. Какой участок круговой диаграммы асинхронной машины соответствует генераторному режиму?
8. Что называется электромагнитной мощностью в асинхронном генераторе? Как ее можно найти?
9. Перечислите виды потерь мощности в асинхронном генераторе, нарисуйте его энергетическую диаграмму.
10. Нарисуйте энергетическую диаграмму реактивной мощности в асинхронном генераторе.

### Литература

1. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§ 3.18)
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2017. (§§ 49.1)

Лабораторная работа № 3  
ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С  
КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Целью работы является исследование трёхфазного асинхронного двигателя в режимах холостого хода и короткого замыкания, определение его пусковых и рабочих свойств, а также исследование работы двигателя при ненормальном питающем напряжении.

Лабораторная работа является виртуальной и проводится с помощью математических моделей асинхронного двигателя, реализованных на компьютерах кафедры ЭМЭА.

В работе моделируется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 4 кВт, рассчитанный на напряжение 400 В при схеме соединения обмотки статора «звезда». Активное сопротивление фазы обмотки статора 1,4 Ом. Номинальная частота вращения ротора 1430 об/мин.

**Программа работы**

**1. Экспериментальные исследования**

1. Провести опыт нагрузки двигателя и снять зависимости тока, потребляемой мощности и частоты вращения двигателя от момента нагрузки при номинальном напряжении  $U_1 = U_{1н}$ , при повышенном напряжении  $U_1 > U_{1н}$ , при пониженном напряжении  $U_1 < U_{1н}$ .

Значения повышенного и пониженного напряжения указываются преподавателем по вариантам

Вариант	повышенное $U$	пониженное $U$
1	$U_1 = 1,1U_{1н}$	$U_1 = 0,8U_{1н}$
2	$U_1 = 1,2U_{1н}$	$U_1 = 0,9U_{1н}$
3	$U_1 = 1,3U_{1н}$	$U_1 = 0,7U_{1н}$
4	$U_1 = 1,2U_{1н}$	$U_1 = 0,6U_{1н}$
5	$U_1 = 1,1U_{1н}$	$U_1 = 0,5U_{1н}$

2. Провести опыт холостого хода асинхронного двигателя и снять зависимости тока холостого хода и потребляемой мощности от напряжения питания при  $M = 0$ .

3. Провести опыт короткого замыкания асинхронного двигателя и снять зависимости тока короткого замыкания и момента от напряжения питания при  $n = 0$ .

**2. Обработка результатов эксперимента**

1. По данным опыта нагрузки определить номинальные значения КПД и коэффициента мощности исследуемого двигателя и построить рабочие характеристики двигателя  $M, s, n_2, I_1, P_1, \cos\phi_1, \eta = f(P_2)$  при  $U_1 = U_{1н}, U_1 > U_{1н}, U_1 < U_{1н}$ .

2. По данным опыта холостого хода построить характеристики холостого хода  $I_0, P_{10}, \cos\varphi_0 = f(U_1)$  при  $P_2 = 0$  и  $n = \text{const}$ .

3. По данным опыта короткого замыкания построить характеристики короткого замыкания  $I_k, M_k = f(U_1)$  при  $n = 0$ . Определить кратность пускового тока и кратность пускового момента при номинальном напряжении питания  $U_{1н}$ .

4. По результатам опытов холостого хода при номинальном напряжении питания и короткого замыкания при номинальном токе рассчитать параметры схемы замещения асинхронного двигателя.

5. Используя найденные параметры схемы замещения исследуемого двигателя рассчитать и построить механическую характеристику асинхронной машины в диапазоне скольжений от -1 до 1. Сравнить ее с опытной характеристикой, полученной из опыта нагрузки, построив характеристики на одном графике.

### **Пояснения и указания к работе**

Для начала работы необходимо запустить файл с программой, установленной на компьютере.

Интерфейс программы моделирует испытательный стенд для исследования асинхронного двигателя. Он оснащён виртуальными кнопками, переключателями, тумблерами, непрерывными и дискретными регуляторами, виртуальными стрелочными и цифровыми приборами.

Изменение нагрузки двигателя и напряжения питания с помощью виртуальных регуляторов может производиться без остановки модели, эксперименты проводятся условно в «реальном времени» при непрерывном моделировании работы асинхронного двигателя.

Модель асинхронного двигателя реализована с учётом нелинейности кривой намагничивания стали.

Сама модель виртуального испытательного стенда собрана жёстко. С помощью виртуальных переключателей пользователь имеет возможность регулировать подводимое к двигателю напряжение и менять нагрузку, можно задавать режимы работы: холостого хода, короткого замыкания, двигательного режима работы.

### **Опыт нагрузки**

Для проведения опыта нагрузки переключатель «Режим работы» необходимо перевести в положение «НР» (нормальный режим), переключатель «Фаза статора» – в положение «Выкл.», регулятор нагрузки «Момент сопротивления» – в положение «0», установить номинальное напряжение питания, после чего запустить моделирование работы двигателя.

При проведении опыта величина нагрузки задается регулятором «Момент сопротивления». Следует изменять значения момента нагрузки от 0 до  $1,25M_n$  и для каждого выбранного момента измерять ток статора  $I_1$ , потребляемую мощность  $P_1$  и частоту вращения ротора  $n$ .

Номинальный момент двигателя может быть найден по паспортным данным как

$$M_n = \frac{P_{2н}}{\omega_n} = \frac{P_{2н}}{2\pi n_n / 60},$$

где  $P_{2н}$  – номинальная мощность на валу двигателя, Вт;  $\omega_n$  – номинальная угловая скорость ротора, 1/сек;  $n_n$  – номинальная частота вращения, об/мин.

При нагрузке двигателя номинальным моментом и вращении с номинальной скоростью ток, протекающий в обмотке статора, также будет номинальным. Следует записать полученное экспериментально значение номинального тока  $I_{1н}$ .

Опыт следует повторить для пониженного и повышенного напряжения питания в соответствии с выбранным вариантом.

Для построения каждой характеристики достаточно снять 7...10 экспериментальных точек через примерно равные интервалы изменения момента нагрузки.

Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра и ваттметра), значения момента и частоты вращения, а также расчетные данные скольжения,  $\cos\varphi_1$ , КПД и мощности на валу, необходимые для построения рабочих характеристик, сводят в таблицу.

По данным измерений вычисляются скольжение  $s$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$ , коэффициент полезного действия  $\eta$  и мощность на валу двигателя  $P_2$  для построения рабочих характеристик.

Скольжение  $s$  находят через частоту вращения ротора  $n$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

где  $n_1$  – частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения), в качестве которой принимается ближайшая большая по отношению к номинальной частоте вращения  $n_n$  из шкалы синхронных частот при  $f_1 = 50$  Гц.

Коэффициент мощности

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

Мощность на валу двигателя

$$P_2 = M \cdot \omega = M \cdot 2\pi n / 60,$$

где  $\omega$  – угловая скорость ротора, 1/сек,  $n$  – частота вращения ротора, об/мин.

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% .$$

Номинальные значения КПД  $\eta_n$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi_n$  определяются по рабочим характеристикам для режима номинальной мощности  $P_2 = P_{2n}$ .

Для удобства сравнения рабочих характеристик для трёх значений напряжения они должны быть построены на одном графике.

### **Опыт холостого хода**

Для проведения опыта холостого хода переключатель «Режим работы» необходимо перевести в положение «НР» (нормальный режим), переключатель «Фаза статора» – в положение «Выкл.», регулятор нагрузки «Момент сопротивления» – в положение «0», после чего запустить моделирование работы двигателя.

В режиме холостого хода следует изменять напряжение питания с помощью регулятора «Напряжение питания» и фиксировать показания виртуальных приборов: ток статора и потребляемую мощность.

Подводимое напряжение в опыте холостого хода следует изменять в диапазоне от  $1,2U_{1n}$  до некоторого минимального напряжения, при котором частота вращения ротора остается постоянной.

В опыте необходимо снять 7...10 экспериментальных точек.

После проведения опыта следует остановить моделирование, нажав кнопку «Стоп».

Для построения характеристик холостого хода необходимо для каждой экспериментальной точки рассчитать коэффициент мощности

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{10}}{\sqrt{3}U_1I_0} ,$$

где  $P_{10}$  – потребляемая в режиме холостого хода мощность, Вт;  $U_1$  – напряжение питания (линейное), В;  $I_0$  – ток статора (линейный), А.

### **Опыт короткого замыкания**

Опыт короткого замыкания асинхронного двигателя проводится при заторможенном роторе и пониженном напряжении на зажимах статора. Для проведения опыта переключатель «Режим работы» необходимо перевести в положение «КЗ» (короткое замыкание), переключатель «Фаза статора» – в положение «Выкл.», регулятор «Напряжение питания» – в положение «0». Положение регулятора

нагрузки «Момент сопротивления» в данном опыте не важно. После этого можно запустить моделирование работы двигателя.

Подводимое напряжение необходимо изменять от нуля до некоторого значения, при котором ток обмотки статора будет равен номинальному.

Номинальный ток обмотки статора  $I_{1н}$  определяют экспериментально из опыта нагрузки при работе двигателя с номинальным напряжением питания при номинальном моменте нагрузки.

В опыте необходимо снять не менее пяти экспериментальных точек через примерно равные интервалы изменения напряжения.

По данным опыта короткого замыкания определяют пусковые свойства двигателя: кратность пускового тока  $k_i$  и кратность пускового момента  $k_M$  при номинальном напряжении питания.

Если при некотором напряжении питания  $U_1$  измерены ток статора  $I_k$  и момент двигателя  $M_k$ , то пусковой ток двигателя при номинальном напряжении может быть найден как

$$I_{п} = I_k \frac{U_{1н}}{U_1}.$$

Пусковой момент двигателя при номинальном напряжении питания без учета насыщения будет равен

$$M_{п} = M_k \frac{I_{п}^2}{I_k^2}.$$

$$\text{Кратность пускового момента } k_M = \frac{M_{п}}{M_n}.$$

$$\text{Кратность пускового тока } k_i = \frac{I_{п}}{I_{1н}}.$$

### Параметры схемы замещения

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя (рис. 3.1) рассчитывают по результатам опыта холостого хода, проведенного при номинальном напряжении питания, и опыта короткого замыкания при номинальном токе статора.

Для расчета параметров схемы замещения можно воспользоваться известными формулами. Сопротивления обмоток статора и ротора (приведенное) находят из опыта короткого замыкания

$$Z_1 \approx Z_2' \approx \frac{Z_k}{2},$$

где полное сопротивление короткого замыкания  $Z_k = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}I_{1к}}$ , его активная составляющая  $r_k = \frac{P_k}{3I_{1к}^2}$ , реактивная составляющая  $x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}$ .

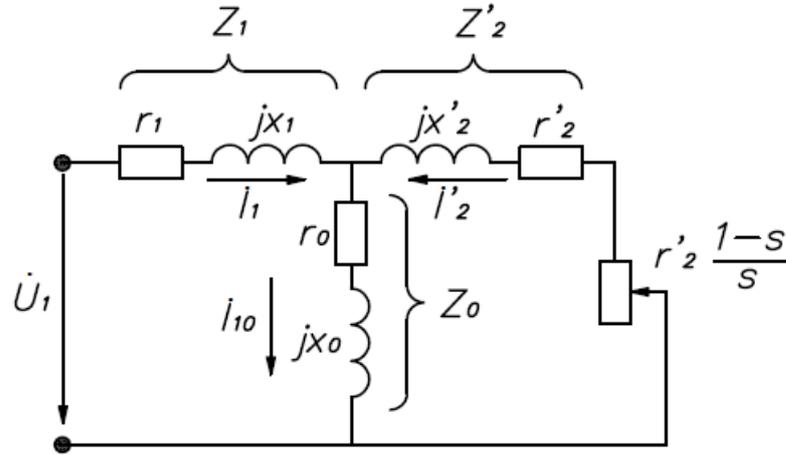


Рис. 3.1. Схема замещения асинхронного двигателя

Сопротивление ветви намагничивания находят из опыта холостого хода  $Z_0 = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}I_0}$ . Активное сопротивление, моделирующее потери в стали, равно  $r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}$ , индуктивное сопротивление взаимоиндукции  $x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$ .

### Механическая характеристика асинхронной машины

Расчет механической характеристики асинхронной машины проводится по известной формуле электромагнитного момента для различных значений скольжения  $s$  в диапазоне от -1 до +1.

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{\omega \left[ \left( r_1 + c_1 \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2 \right]}$$

где  $p$  – число пар полюсов двигателя, соответствующее найденной ранее синхронной скорости;  $m_1 = 3$  – число фаз;  $U_1$  – фазное напряжение питания, В;  $\omega = 2\pi f$  – электрическая угловая скорость ( $f = 50$  Гц);  $r_1$  и  $x_1$  – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора, Ом;  $r'_2$  и  $x'_2$  –

приведенные значения активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора, Ом;  $c_1$  – величина комплексного коэффициента  $c_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_0}$ .

Рекомендуется выбрать шаг по скольжению порядка  $\Delta s = 0,05$  для получения достаточно плавной кривой.

Для сравнения с экспериментом и проверки точности определения параметров двигателя следует построить на том же графике экспериментально полученную зависимость момента двигателя от скольжения, выделив ее точки каким-либо символом.

### Контрольные вопросы

Основные вопросы для защиты

1. Как снимались зависимости активной мощности, потребляемой двигателем из сети, от нагрузки на валу при различных значения питающего напряжения? Какой характер имеют эти зависимости? Объясните изменение этих зависимостей при изменении питающего напряжения.

2. Как снимались зависимости тока, потребляемого двигателем из сети, от нагрузки на валу при различных значения питающего напряжения? Какой характер имеют эти зависимости? Объясните изменение этих зависимостей при изменении питающего напряжения.

3. Как снимались зависимости частоты вращения двигателя от нагрузки на валу при различных значения питающего напряжения? Какой характер имеют эти зависимости? Объясните изменение этих зависимостей при изменении питающего напряжения.

4. Как снималась зависимость тока холостого хода от питающего напряжения? Какой характер имеет эта зависимость? Объясните ход кривой.

5. Как снималась зависимость потерь холостого хода от питающего напряжения? Какой характер имеет эта зависимость? Объясните ход кривой.

6. Как осуществлялось построение зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя от величины напряжения в режиме холостого хода?

7. Как снималась зависимость тока, потребляемого двигателем от сети, от питающего напряжения в режиме короткого замыкания? Какой характер имеет эта зависимость? Объясните ход кривой. Как по ней определяется кратность пускового тока?

8. Как снималась зависимость электромагнитного момента двигателя от питающего напряжения в режиме короткого замыкания? Какой характер имеет эта зависимость? Объясните ход кривой. Как по ней

определяется кратность пускового момента?

9. Как осуществлялся расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

10. Почему при оборванной фазе ротора при пуске асинхронный двигатель может не разогнаться до номинальной частоты вращения? С какой частотой он будет вращаться? Почему?

Дополнительные вопросы для защиты

1. Как зависит электромагнитный момент двигателя от величины напряжения?

2. Как изменится ток, потребляемый двигателем из сети в процессе работы, при увеличении/снижении питающего напряжения?

3. Как изменится частота вращения двигателя при увеличении/снижении питающего напряжения?

4. Как изменится частота вращения двигателя при обрыве фазы статора?

5. Как изменится тепловой режим двигателя при обрыве фазы статора?

6. Что такое эффект Гёргеса?

7. Как по осциллограмме тока статора асинхронного двигателя можно определить наличие у него обрыва фаз ротора?

8. Чему равен пусковой момент у однофазного асинхронного двигателя?

9. Почему нельзя допускать длительную работу асинхронного двигателя в режиме короткого замыкания?

### Литература

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§§ 10.5, 11.1)

2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§§ 3.5, 3.6, 3.10)

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2017. (§§ 40.7, 41.3, 41.4, 42.3, 45.2)