АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Учебное пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2013

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электроника и нетрадиционная энергетика»

АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Учебное пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2013

УДК 621.313
А90

А90 **Асинхронные электромеханические преобразователи:** учеб. пособие / Сост. Ю.В. Зубков. – 2-е изд. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 146 с.: ил.

ISBN 978-5-7964-1634-1

Содержатся теоретические сведения об асинхронных электромеханических преобразователях. Рассмотрены различные режимы работы асинхронных машин, способы пуска и регулирования частоты вращения. Даны практические рекомендации по экспериментальному определению рабочих и механических характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором, исследованию пусковых характеристик этих двигателей, а также контрольные вопросы и указания по обработке экспериментальных данных.

Составлено в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Электромеханика».

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», и преподавателей университета.

Рецензент д-р техн. наук В.Е. Высоцкий

УДК 621.313
А90

ISBN 978-5-7964-1634-1

© Ю.В. Зубков, составление, 2013
© Самарский государственный технический университет, 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная книга предназначена в качестве учебного пособия для студентов вузов и также может быть полезна инженерам-электромеханикам, работающим в области производства и эксплуатации асинхронных электромеханических преобразователей. Содержание учебного пособия излагается в такой последовательности: основы теории асинхронных электромеханических преобразователей, пуск трехфазных асинхронных двигателей, регулирование угловой скорости вращения асинхронных двигателей, однофазные асинхронные двигатели, асинхронная машина в режиме генератора, специальные режимы работы асинхронных электромеханических преобразователей, лабораторный практикум.

Раздел лабораторного практикума содержит четыре лабораторные работы по определению основных характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором и исследованию их пусковых свойств.

Опыт преподавательской работы в вузе показывает, что наиболее трудными для понимания и усвоения являются многообразные физические явления и процессы, происходящие в электромеханических преобразователях. Поэтому автор стремился изложить их в простой и ясной форме. Это должно облегчить использование пособия студентам заочных факультетов.

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные электромеханические преобразователи используются в основном как двигатели. В настоящее время асинхронные двигатели являются наиболее распространенными электрическими машинами. Они потребляют около 50% электрической энергии, вырабатываемой электрическими станциями страны. Потребность в асинхронных двигателях непрерывно растет. Такое широкое распространение они получили благодаря конструктивной простоте, низкой стоимости и высокой эксплуатационной надежности при минимальном обслуживании. Широк диапазон мощностей, на которые выпускаются эти двигатели, – от долей ватта до десятков тысяч киловатт. Они имеют относительно высокий КПД: при мощностях более 1 кВт он составляет 0,7-0,95 и только в микродвигателях снижается до 0,2-0,65.

Наряду с большими достоинствами асинхронные двигатели имеют и некоторые недостатки. К их числу следует отнести потребление из сети реактивного тока, необходимого для создания магнитного потока, в результате чего асинхронные двигатели работают с $\cos\varphi < 1$ (при мощности от 1 кВт и выше $\cos\varphi = 0{,}7 - 0{,}9$, а в микродвигателях 0,3-0,7).

Асинхронные двигатели изготовляются для работы от однофазных, двухфазных и трехфазных сетей переменного тока. Но главным образом они выпускаются для работы от трехфазных сетей.

Появление трехфазных асинхронных двигателей связано с именем М.О. Доливо-Добровольского. Эти двигатели были изобретены им в 1889 г. Предложенная М.О. Доливо-Добровольским конструкция асинхронных двигателей в основных чертах сохранилась до наших дней.

Асинхронные электромеханические преобразователи являются обратимыми в энергетическом отношении. Они могут работать в генераторном и других специальных режимах.

Часть I
1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Асинхронной машиной называется двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна обмотка (первичная) получает питание от электрической сети с постоянной частотой f_1, а вторая обмотка (вторичная) замыкается накоротко или на электрические сопротивления. Токи во вторичной обмотке появляются в результате электромагнитной индукции. Их частота f_2 является функцией угловой скорости ротора Ω, которая в свою очередь зависит от вращающего момента, приложенного к валу.

Наибольшее распространение получили асинхронные машины с трехфазной симметричной разноименнополюсной обмоткой на статоре, питаемой от сети переменного тока, и с трехфазной или многофазной симметричной разноименнополюсной обмоткой на роторе.

Машины такого исполнения называют просто «асинхронными машинами», в то время как асинхронные машины иных исполнений относятся к «специальным асинхронным машинам».

Асинхронные машины используются в основном как двигатели, в качестве генераторов они применяются редко.

Асинхронный двигатель является наиболее распространенным типом двигателя переменного тока.

Разноименнополюсная обмотка ротора асинхронного двигателя может быть короткозамкнутой («беличья клетка») или фазной (присоединяется к контактным кольцам). Наибольшее распространение имеют дешевые в производстве и надежные в эксплуатации двигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе, или короткозамкнутые двигатели (рис. 1.1).

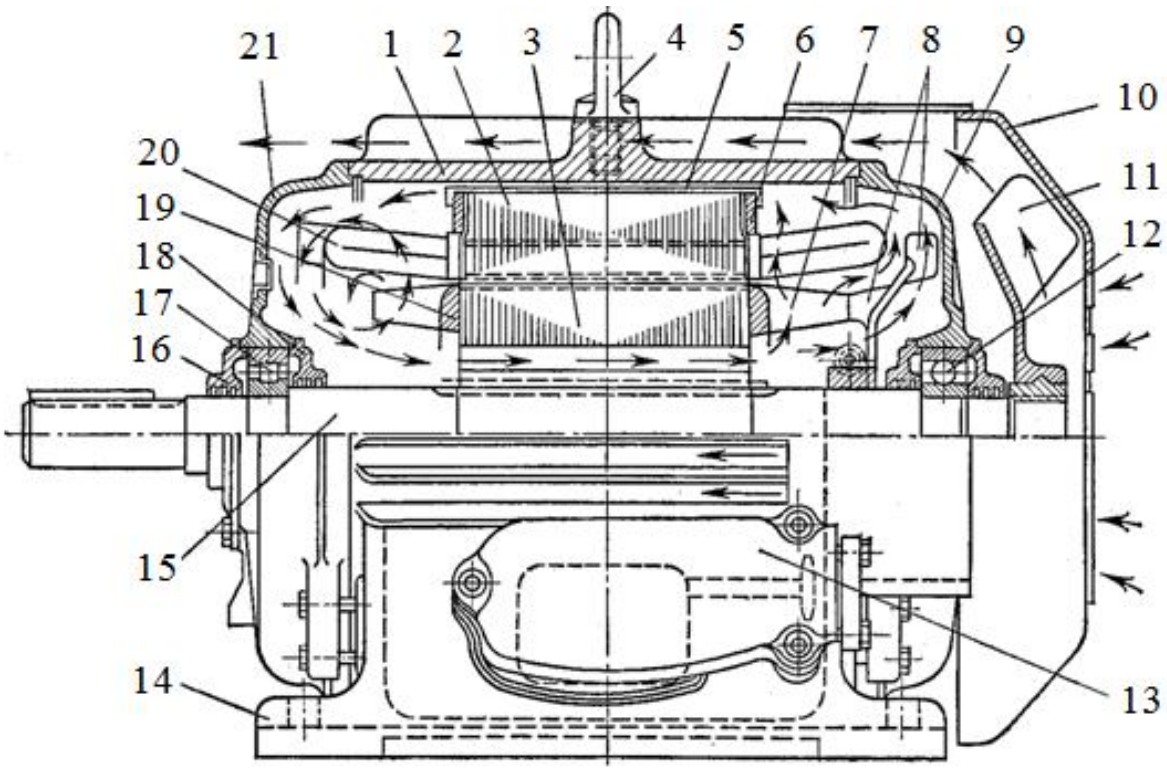


Рис. 1.1 Асинхронный двигатель с коротзамкнутым ротором

Эти двигатели обладают жесткой механической характеристикой (при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной их частота вращения уменьшается всего на 2-5%).

Двигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе обладают также довольно высоким начальным пусковым вращающим моментом. Их основные недостатки: трудность осуществления плавного регулирования частоты вращения в широких пределах; потребление больших токов из сети при пуске (в 5-7 раз превышающих номинальный ток).

Двигатели с фазной обмоткой на роторе или двигатели с контактными кольцами (рис. 1.2) избавлены от этих недостатков ценой усложнения конструкции ротора, что приводит к их заметному удорожанию по сравнению с короткозамкнутыми двигателями (примерно в 1,5 раза). Поэтому двигатели с контактными кольцами на роторе находят применение лишь при тяжелых условиях пуска, а также при необходимости плавного регулирования частоты вращения.

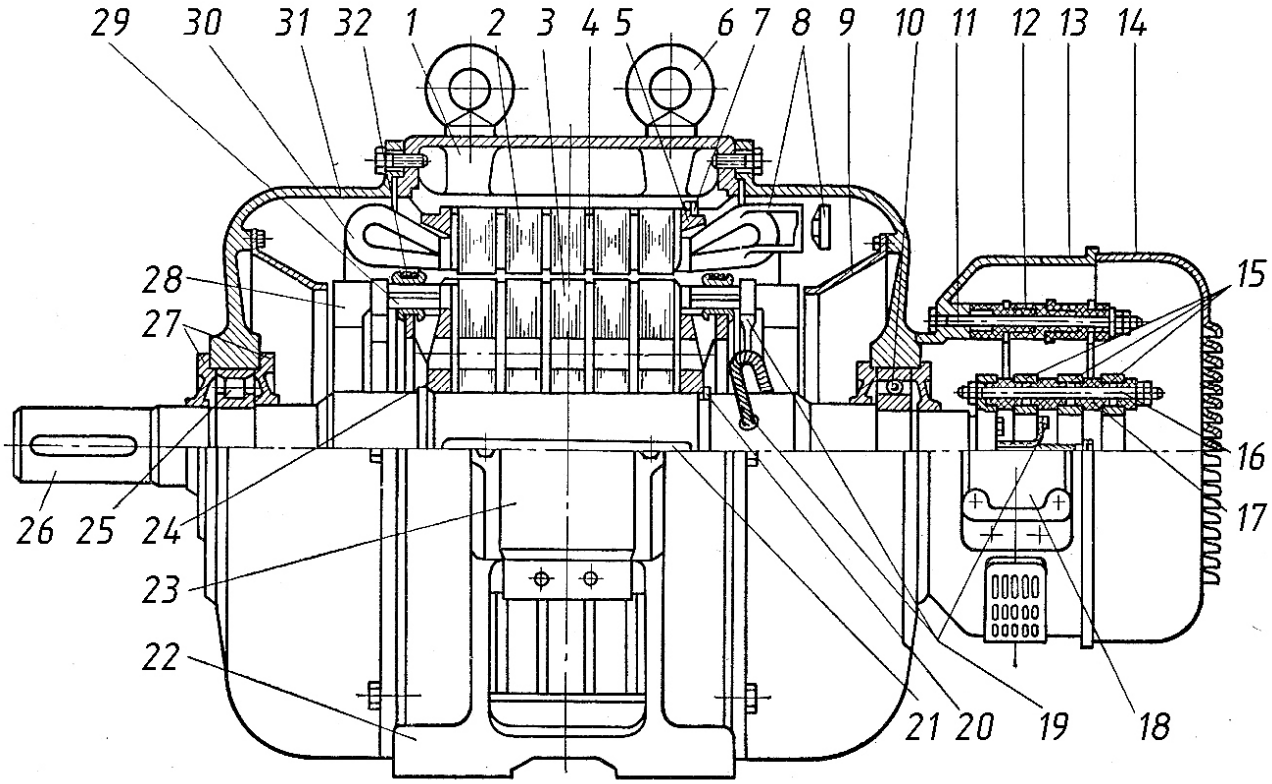


Рис. 1.2. Асинхронный двигатель с фазным ротором

Двигатели с контактными кольцами иногда применяют в каскаде с другими машинами. Каскадные соединения асинхронной машины позволяют плавно регулировать частоту вращения в широком диапазоне при высоком коэффициенте мощности, однако из-за значительной стоимости не имеют сколько-нибудь заметного распространения.

В двигателях с контактными кольцами выводные концы обмотки ротора, фазы которой соединяются обычно в «звезду», присоединяются к трем контактным кольцам. С помощью щеток, соприкасающихся с кольцами, в цепь обмотки ротора можно вводить добавочное сопротивление или дополнительную ЭДС для изменения пусковых или рабочих свойств машины. Щетки позволяют также замкнуть обмотку накоротко.

В большинстве случаев добавочное сопротивление вводится в обмотку ротора только при пуске двигателя, что приводит к увеличению пускового момента и уменьшению пусковых токов и облегчает пуск двигателя. При работе асинхронного двигателя пусковой

реостат должен быть полностью выведен, а обмотка ротора замкнута накоротко. Иногда асинхронные двигатели снабжаются специальным устройством, которое позволяет после завершения пуска замкнуть между собой контактные кольца и приподнять щетки. В таких двигателях удается повысить КПД за счет исключения потерь от трения колец о щетки и электрических потерь в переходном контакте щеток.

Выпускаемые заводами асинхронные двигатели предназначаются для работы в определенных условиях с определенными техническими данными, называемыми номинальными. К числу номинальных данных асинхронных двигателей, которые указываются в заводской табличке машины, укрепленной на ее корпусе, относятся:

механическая мощность, развиваемая двигателем $P_N = P_{2N}$;

частота сети f_1;

линейное напряжение статора U_{1N};

линейный ток статора I_{1N};

частота вращения ротора n_N;

коэффициент мощности $\cos\varphi_{1N}$;

коэффициент полезного действия η_N.

Если у трехфазной обмотки статора выведены начала и концы фаз, то она может быть включена в «звезду» или «треугольник». В этом случае указываются линейные напряжения и токи для каждого из возможных соединений (Y/Δ) в виде дроби $U_{лY}/U_{л\Delta}$ и $I_{лY}/I_{л\Delta}$.

Кроме того, для двигателя с контактными кольцами приводится напряжение на разомкнутых кольцах при неподвижном роторе и линейный ток ротора в номинальном режиме.

Номинальные данные асинхронных двигателей варьируются в очень широких пределах. Номинальная мощность – от долей ватта до десятков тысяч киловатт. Номинальная синхронная частота вращения $n_1 = 60f_1/p$ при частоте сети 50 Гц – от 3000 до 500 об/мин и менее в особых случаях; при повышенных частотах – до 100 000 об/мин и бо-

лее (номинальная частота вращения ротора обычно на 2-5% меньше синхронной; в микродвигателях – на 5-20%). Номинальное напряжение – от 24В до 10 кВ (большие значения при больших мощностях).

Номинальный КПД асинхронных двигателей возрастает с ростом их мощности и частоты вращения. При мощности более 0,5 кВт КПД составляет 0,65-0,95, в микродвигателях 0,2-0,65.

Номинальный коэффициент мощности асинхронных двигателей, равный отношению активной мощности к полной мощности, потребляемой из сети,

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}$$

также возрастает с ростом мощности и частоты вращения двигателей; при мощности более 1 кВт он составляет 0,7-0,9; в микродвигателях 0,3-0,7.

1.2. КОНСТРУКЦИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Конструктивная компоновка асинхронной машины с короткозамкнутым ротором представлена на рис. 1.1. В основных чертах она совпадает с типичной компоновкой вращающейся электрической машины.

Статор машины состоит из магнитопровода *2*, трехфазной разноименнополюсной обмотки *20*, выводные концы которой с помощью выводной коробки *13* присоединяются к сети переменного тока, и станины *1*.

Активными элементами статора, специально предназначенными для образования вращающегося магнитного поля, являются магнитопровод *2* и обмотка *20*; станина выполняет только конструктивные функции, фиксируя активные части в определенном положении (с помощью лап *14* станина неподвижно закрепляется на фундаменте).

Магнитопровод *2* набирается из изолированных пластин электротехнической стали обычно толщиной 0,5 мм. Пластины штампуются из листовой или рулонной электротехнической стали со стандартизованными размерами и изолируются с обеих сторон лаком.

При наружном диаметре магнитопровода менее 1 м, что имеет место во всех асинхронных двигателях, за исключением самых крупных, его набирают из цельных кольцеобразных пластин, на внутренней стороне которых вырублены пазы нужной формы (рис. 1.3, б).

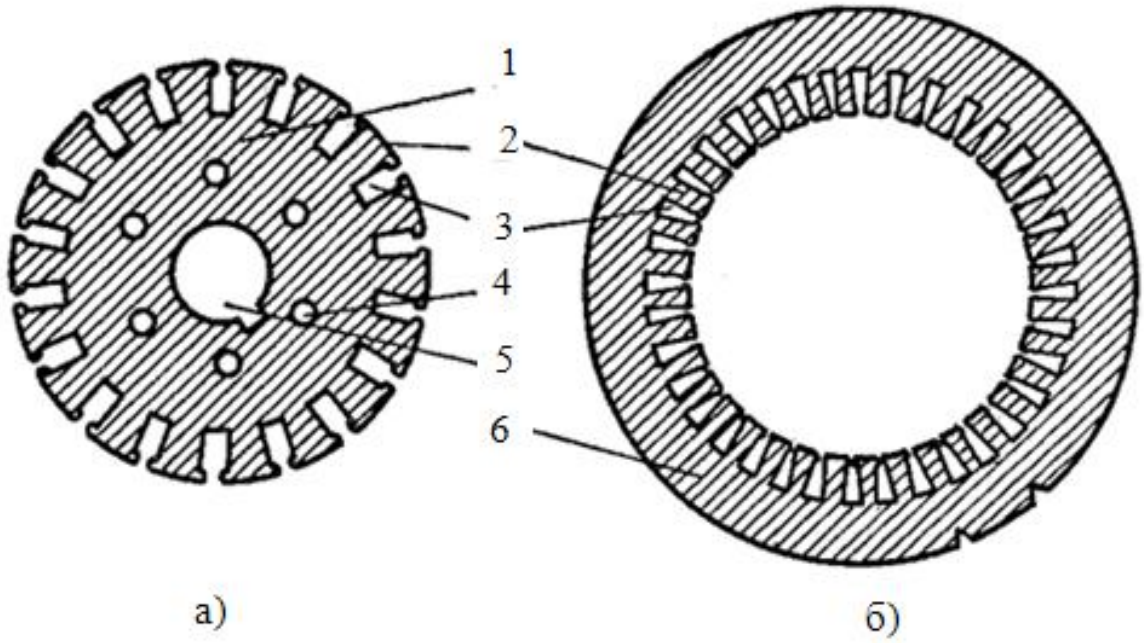


Рис. 1.3. Листы ротора и статора

В конструкции по рис. 1.3 радиальные каналы в магнитопроводе отсутствуют. В этом случае кольцевые пластины собираются в пакет и прессуются вне станины на специальной цилиндрической оправке. В спрессованном состоянии пакет пластин удерживается с помощью нажимных колец *6* и стяжных скоб *5*, и лишь после укладки обмотки вставляется в станину.

При наружном диаметре магнитопровода более 1 м он набирается из отдельных сегментов, и конструкция статора получается такой же, как в крупных синхронных машинах.

С целью уменьшения пульсаций магнитного поля и добавочных потерь, связанных с зубчатостью магнитопровода, обмотка статора, как правило, укладывается в асинхронных машинах в полузакрытые пазы (рис. 1.4, *а*).

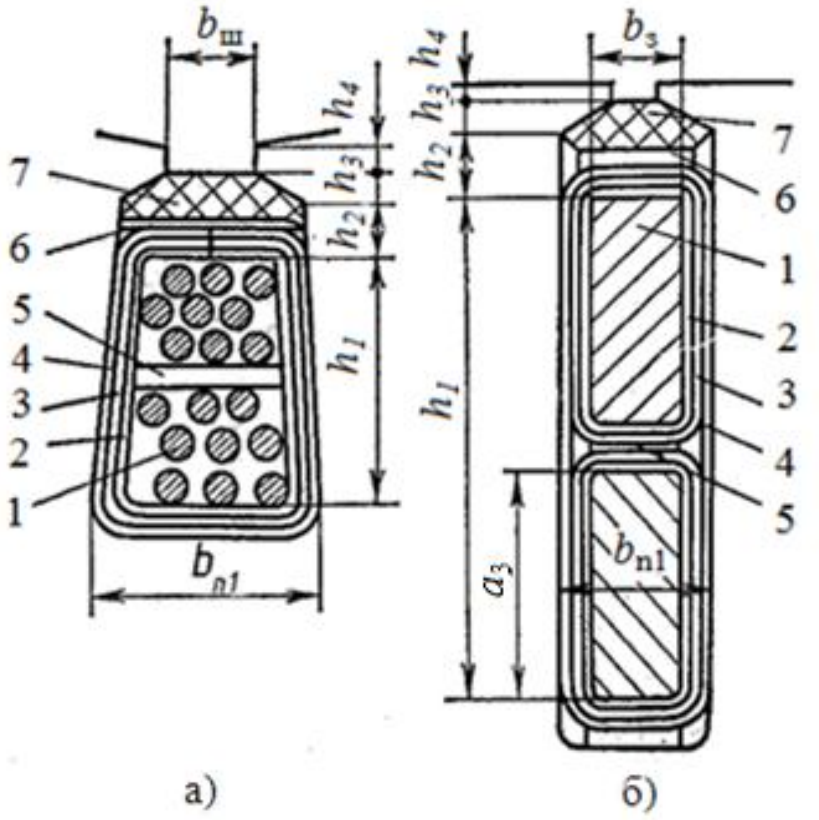


Рис. 1.4. Полузакрытые пазы статора и ротора

Для таких пазов пригодны как однослойные, так и двухслойные многовитковые катушечные всыпные обмотки. Катушки этих обмоток наматываются из изолированного обмоточного провода круглого сечения *1*; каждый проводник катушки «всыпается» в паз по отдельности.

Для изоляции витков катушки друг от друга оказывается достаточной собственная изоляция обмоточных проводников. Изоляция обмотки от заземленных частей, называемая корпусной изоляцией, делается в зоне пазовых и лобовых частей по-разному. Корпусная изоляция пазовой части катушки выполняется в виде «пазовой коробочки», образованной из нескольких слоев 2-4 изоляционных материалов, которая закладывается в паз перед укладкой обмотки. Обмотка закрепляется в пазах с помощью клиньев *7* из изоляционного материала. Под клинья подкладываются изоляционные прокладки *6*. Изоляцией между слоями обмотки служит прокладка *5* (в однослойной обмотке эта прокладка отсутствует).

Ротор машины состоит из магнитопровода *3* (рис. 1.1), в пазах которого размещается неизолированная многофазная короткозамкну-

тая обмотка *19*, пристроенных к ней вентиляционных лопастей *7*, вала *15* и двух вентиляторов *8* и *11*. Активными элементами ротора, принимающими участие в процессе преобразования энергии, являются магнитопровод *3* и обмотка *19*; остальные детали имеют конструктивное назначение: вал *15* передает механическую энергию к исполнительной машине, вентиляторы *7*, *8* и *11* обеспечивают циркуляцию охлаждающей среды. Более детально устройство активных частей ротора показано на рис. 1.5.

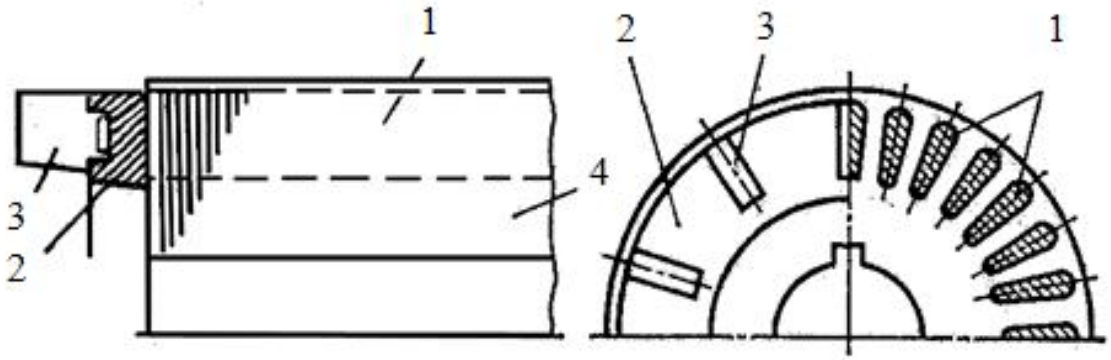


Рис. 1.5. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя

Магнитопровод ротора *4* набирается из цельных кольцевых пластин, отштампованных из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, на наружной стороне которых вырублены пазы нужной формы (на рис. 1.5 – закрытые, на рис. 1.3 – полузакрытые).

Пластины магнитопровода ротора набираются на специальную оправку, спрессовываются на ней и удерживаются в запрессованном состоянии в процессе изготовления короткозамкнутой обмотки. Короткозамкнутая обмотка отливается из алюминия и не изолируется от магнитопровода. Торцевые кольца *2* (рис. 1.5), замыкающие с двух сторон стержни обмотки *1*, отливаются как одно целое со стержнями. Одновременно в виде приливов к короткозамыкающим кольцам отливаются вентиляционные лопасти *3*.

Кроме своего основного назначения, короткозамкнутая обмотка служит также для стягивания пластин ротора после удаления оправки. Это позволяет обойтись без специальных прессующих деталей, удерживающих листы ротора в осевом направлении.

Вал ротора *15* (см. рис. 1.1) опирается на подшипники качения *12*, *17*, которые, в свою очередь, с помощью подшипниковых щитов *9*, *21* и крышек подшипников *16*, *18* сопрягаются со станиной *1*.

Шариковый подшипник *12* центрирует ротор не только в радиальном, но и в осевом направлении, воспринимая наряду с радиальными усилиями также и осевые. Консистентная смазка подшипников закладывается в камеру между подшипниковыми крышками *16*, *18* и не нуждается в замене в течение нескольких лет эксплуатации. Поскольку зазор между магнитопроводами ротора и статора при мощности более 0,5 кВт обычно не превышает 0,3-1 мм (в микромашинах 0,02-0,3 мм), вал ротора должен быть достаточно жестким, а механическая обработка конструктивных частей, обеспечивающих правильное положение оси вала в пространстве, должна производиться с высокой точностью.

На рис. 1.1 представлено типичное для серийных короткозамкнутых асинхронных двигателей исполнение по способу охлаждения и защиты от воздействия внешней среды – обдуваемое исполнение, в котором внутреннее пространство машины защищено от брызг воды и пыли. Внешний обдув двигателя создается наружным вентилятором *11* (кожух *10* защищает обслуживающий персонал от прикосновения к вентилятору и направляет воздух к оребренной поверхности станины). Циркуляция воздуха внутри машины усиливается с помощью внутреннего вентилятора *8* и вентиляционных лопастей *7* (направление движения воздуха показано на рисунке стрелками).

Подъем двигателя при монтаже производится с помощью рыма *4*.

1.3. КОНСТРУКЦИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Конструктивная компоновка асинхронной машины с контактными кольцами представлена на рис. 1.2. Двигатели этого типа отличаются от короткозамкнутых только устройством ротора.

Статор двигателя может иметь те же разновидности конструктивных исполнений, что и в короткозамкнутом двигателе. Статор двигателя по рис. 1.2 – с радиальными каналами в магнитопроводе.

Статор состоит из станины *1*, в которой с помощью нажимных шайб *5* и шпонок *7* укреплены пакеты магнитопровода, набранные из кольцевых пластин *2*. Для образования каналов между пакетами служат распорки *4*. В пазы магнитопровода статора уложена двухслойная обмотка, катушки *30* которой связаны между собой соединениями *8*. Выводные концы обмотки статора сосредоточены в выводной коробке *23*. К фундаменту станина крепится лапами *22*. Для подъема двигателя при монтаже служат рымы *6*.

Ротор двигателя состоит из вала *26*, на котором с помощью нажимных колец *24*, шпонки *21* и разрезной шпонки *20* укреплены в запрессованном состоянии пакеты магнитопровода, набранные из кольцевых пластин *3* (см. рис. 1.3, *а*). Радиальные вентиляционные каналы между пакетами образуются дистанционными распорками, помещенными на каждом зубцовом делении. В полузакрытых пазах магнитопровода ротора, показанных в разрезе па рис. 1.4, *б*, размещается трехфазная двухслойная волновая стержневая обмотка *29*, соединенная обычно в «звезду», выводные концы которой посредством электрических кабелей *19*, проведенных через отверстие в валу, присоединены к контактным кольцам *15*.

Стержни *1* обмотки с заранее наложенной витковой изоляцией *2*, *3* (рис. 1.4, *б*) вставляются в пазы с торцевой стороны магнитопровода. Предварительно в пазы вводится пазовая коробочка *4*, играющая роль корпусной изоляции. Для укрепления стержней в радиальном направлении и усиления витковой и корпусной изоляции используются изоляционные прокладки *5*, *6*. Центробежная сила, действующая на пазовую часть обмотки, воспринимается клиньями *7* из изоляционного материала.

Лобовые части обмоток укладываются на нажимные шайбы *24* (рис. 1.2), которые одновременно выполняют роль обмоткодержателей, и охватываются снаружи кольцевыми бандажами *32*, рассчитанными на восприятие центробежной силы.

Электрическое соединение вращающейся обмотки ротора с внешними (неподвижными) электрическими цепями производится с помощью контактных колец, на которые выведены обмотки, и ще-

точного устройства, связанного с неподвижными электрическими цепями. Контактные кольца выполняются как отдельный узел машины. Кольца *15*, изготовленные из стали, отделяются друг от друга и от корпуса с помощью изоляционных прокладок *17*.

Все эти детали стягиваются вместе изолированными шпильками *16* и крепятся с помощью фланца к торцу вала. К кольцам плотно прижимаются щетки, электрически соединенные с токоподводящими шинами *12* щеточной траверсы (кроме этих шин, на рис. 1.2 показаны болты *11* щеточной траверсы и ее изоляционные детали, а также корпус *13* и крышка *14*; щетки и щеткодержатели не показаны). Необходимый электрический контакт щеток с кольцами обеспечивается с помощью щеткодержателей, укрепленных на шинах *12*. Соединение токоподводящих шин *12* щеточной траверсы с пусковым реостатом производится в выводной коробке контактных колец *18*.

Правильное расположение оси ротора по отношению к статору и возможность вращения ротора обеспечиваются с помощью таких же деталей, как в короткозамкнутом двигателе по рис. 1.1 (подшипников качения, роликового *25* и шарикового *10*, подшипниковых крышек *27* и подшипниковых щитов *31*).

По способу охлаждения и защиты от воздействия внешней среды двигатель по рис. 1.2 имеет продуваемое каплезащищенное исполнение. Внутри машины воздух перемещается аксиально-радиально. Наружный воздух поступает в машину с двух сторон через отверстия в подшипниковых щитах *31* и направляется диффузорами *9* к вентиляционным лопастям *28*, промежуткам между лобовыми частями стержней обмотки ротора и к аксиальным каналам в магнитопроводе ротора; далее воздух из аксиальных каналов попадает в радиальные каналы в магнитопроводе ротора и статора; воздух от вентиляционных лопастей *28* и лобовых частей ротора омывает лобовые части обмотки статора. Нагретый потерями в машине воздух попадает в пространство между ярмом статора и корпусом станины, откуда выбрасывается наружу через боковые отверстия в корпусе. Необходимый для циркуляции воздуха напор создается радиальными каналами в роторе, которые играют роль центробежных вентиляторов.

1.4. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Предположим, что ротор асинхронного двигателя неподвижен и к его валу не приложен тормозной момент. Если трехфазную обмотку статора подключить к трехфазной сети, то токи, протекающие по обмотке, создадут вращающееся магнитное поле. Угловая скорость этого поля, называемая синхронной, равна $\omega_1 = {2\pi \cdot f_1}/{p}$ (f_1 – частота сети). Магнитное поле при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. Направление индуцируемой в одном из проводников ротора ЭДС показано на рис. 1.6 (при определении направления ЭДС по правилу правой руки принималось, что поле неподвижно, а движение проводника происходит в сторону, противоположную вращению поля).

Так как обмотка ротора замкнута, то в ней возникает ток I_2, активная составляющая которого будет по направлению совпадать с ЭДС. Ток I_2, взаимодействуя с магнитным полем, создаст вращающий момент M, под действием которого ротор придет во вращение. Как можно установить по правилу левой руки, направление момента и вращения ротора будут совпадать с направлением вращения поля.

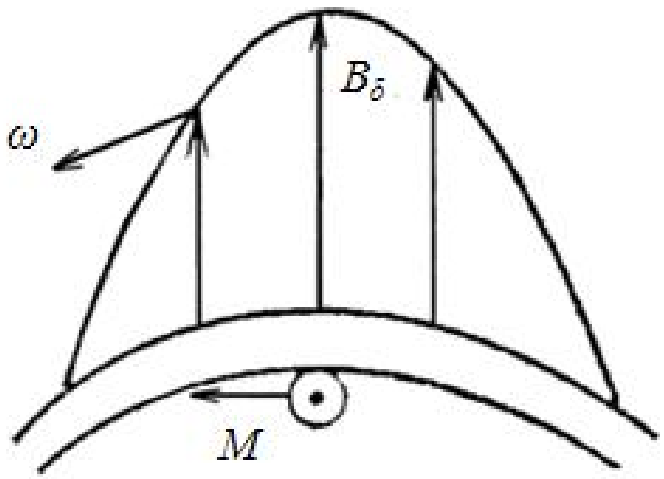


Рис. 1.6. Направление электромагнитного момента, созданного током ротора

По мере разгона ротора его угловая скорость ω будет увеличиваться, но даже при отсутствии нагрузки на валу (холостой ход) он не сможет достигнуть скорости вращения поля. Объясняется это тем, что ток в роторе, а следовательно, и вращающий момент могут возникать только в том случае, если магнитное поле пересекает проводники ротора, т. е. когда $\omega \neq \omega_1$. Так как при холостом ходе в машине существует небольшой тормозной момент M_0, обусловленный механическим трением в подшипниках, трением ротора о воздух и потерями на перемагничивание стали, то для его преодоления двигатель должен создавать вращающий момент, а поэтому должно выполняться неравенство $\omega < \omega_1$.

Ток I_2 и момент двигателя M увеличиваются с ростом ЭДС в роторе, которая пропорциональна разности $\omega - \omega_1$. При увеличении момента нагрузки на валу двигателя M_2 должен увеличиваться электромагнитный момент двигателя $M = M_0 + M_2$, вследствие чего возрастает разность $\omega - \omega_1$.

Таким образом, для рассматриваемого двигателя характерной особенностью является несинхронное (асинхронное) вращение его ротора с магнитным полем. Отсюда и его название – асинхронный двигатель. Разницу между скоростями или частотами вращения ротора и поля принято оценивать величиной, называемой скольжением s:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

где $\omega_1 = {2\pi f_1}/{p} = {2\pi n_1}/{60}, \omega = {2\pi n}/{60}$ – угловые скорости поля и ротора.

Так как частота вращения магнитного поля относительно ротора равна $n_1 - n$, то частота индуцируемых в его обмотке ЭДС и тока

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{pn_1}{60}\frac{(n_1 - n)}{n_1} = f_1 s.$$

Откуда следует, что частота в роторе не постоянна, а изменяется пропорционально скольжению.

Найдем диапазон изменения скольжения в двигательном режиме. При $\omega = 0$ (ротор неподвижен) $s = 1$. Если в идеальном случае $\omega = \omega_1$, то $s = 0$. Следовательно, в двигательном режиме работы машины скольжение изменяется в пределах от 0 до 1. При номинальной нагрузке скольжение обычно находится в пределах 0,015-0,05 или 1,5-5%. При холостом ходе оно равно долям процента.

Скорость ротора ω, выраженная через скольжение s, $\omega = \omega_1(1 - s)$, а частота вращения $n = n_1(1 - s)$. Отсюда видно, что частота вращения ротора близка к частоте вращения поля и мало изменяется при возрастании нагрузки.

Номинальная частота вращения двигателя зависит от частоты вращения магнитного поля и не может быть выбрана произвольно. При стандартной частоте промышленного тока f_1= 50 Гц возможные частоты вращения магнитного поля $n_1 = {60 f_1}/{p} = {3000}/{p}$ приведены ниже.

p	1	2	3	4	5	6	7	8
n, об/мин	3000	1500	1000	750	600	500	375	300

В зависимости от необходимой номинальной частоты вращения обмотки двигателя выполняют на соответствующее число пар полюсов p. Асинхронные двигатели общего назначения выпускаются с синхронными частотами вращения 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 об/мин.

Асинхронная машина может работать также в генераторном режиме и режиме электромагнитного тормоза.

Генераторный режим возникает в том случае, когда ротор с помощью постороннего двигателя вращается в направлении поля со скоростью, большей скорости поля. Скольжение в этом режиме будет отрицательным. Теоретически можно как угодно увеличивать скорость ротора относительно вращающегося поля. Поэтому при работе асинхронной машины в генераторном режиме скольжение находится в пределах от $s = 0$ до $s = -\infty$.

Если ротор под действием посторонних сил начнет вращаться в сторону, противоположную вращению поля, то возникает режим электромагнитного тормоза. Так как скорость ротора отрицательна, то скольжение в этом режиме будет $s>1$. Режим электромагнитного тормоза начинается при $\omega = 0$ и может продолжаться теоретически до $\omega = -\infty$, при этом скольжение изменяется от 1 до $+\infty$. Таким образом, пределы изменения скольжения в асинхронной машине – от $s = -\infty$ до $s = \infty$. На рис. 1.7 дана шкала скольжений, а также показаны направления скоростей ротора и поля для различных режимов работы машины.

1.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Выражение для электромагнитного момента асинхронной машины может быть получено через электромагнитную мощность:

$$P_{ЭМ} = m_1 I_2^{!2} \frac{r_2^!}{s}. \qquad (1.1)$$

Из Г-образной схемы замещения асинхронной машины [1] найдем приведенный ток ротора

$$I_2^! = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + c_1 \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + c_1 x_2^!)^2}}, \qquad (1.2)$$

где r_1, r_2^1 – активные сопротивления обмотки статора и приведенной обмотки ротора;

x_1, x_2^1 – индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора и приведенной обмотки ротора;

U_1 – фазное напряжение обмотки статора;

c_1 – комплексный коэффициент, модуль которого равен отношению первичного напряжения U_1 к первичной ЭДС E_1 при идеальном холостом ходе.

Поделим (1.1) на угловую скорость поля и заменим ток $I_2^!$ его значением из (1.2). Тогда выражение для электромагнитного момента асинхронной машины имеет вид

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2^!}{s}}{\omega_1[(r_1 + c_1 \frac{r_2^!}{s})^2 + (x_1 + c_1 x_2^!)^2]}. \qquad (1.3)$$

Если принять, что параметры машины являются постоянными, то момент при U_1= const является функцией только скольжения s. Поэтому эта формула удобна для построения механической характеристики машины $M = f(s)$. Выясним характер изменения этой зависимости. При малых значениях скольжения ($s << 1$) в квадратных скобках знаменателя (1.3) можно пренебречь всеми слагаемыми, кроме $(c_1 \frac{r_2^!}{s})^2$. Тогда получим $M \approx \frac{pm_1 U_1^2}{\omega_1 c_1^2 r_2^!} s$; т. е. при малых s электромагнитный момент изменяется пропорционально скольжению и зависимость $M = f(s)$ имеет линейный характер.

При скольжениях, близких или больших единицы, можно пренебречь активными сопротивлениями обмоток r_1, r_2^1 по сравнению с их индуктивными сопротивлениями x_1, x_2^1. Тогда можно записать $M \approx \frac{pm_1 U_1^2 r_2^!}{\omega_1 (x_1 + c_1 x_2^!)^2} \frac{1}{s}$, откуда следует, что при больших s момент обратно пропорционален скольжению и кривая $M = f(s)$ имеет вид гиперболы.

На основании изложенного кривая $M = f(s)$ при $U_1 = const$ имеет характер, изображенный на рис. 1.7.

Физически такой сложный вид этой характеристики объясняется аналогичным характером изменения активной составляющей тока ротора. С увеличением скольжения активная составляющая тока I_2 сначала растет, а затем вследствие увеличения частоты f_2 индуктивное сопротивление ротора возрастает, угол ψ_2 увеличивается и активная составляющая тока начинает уменьшаться, несмотря на увеличение полного тока I_2.

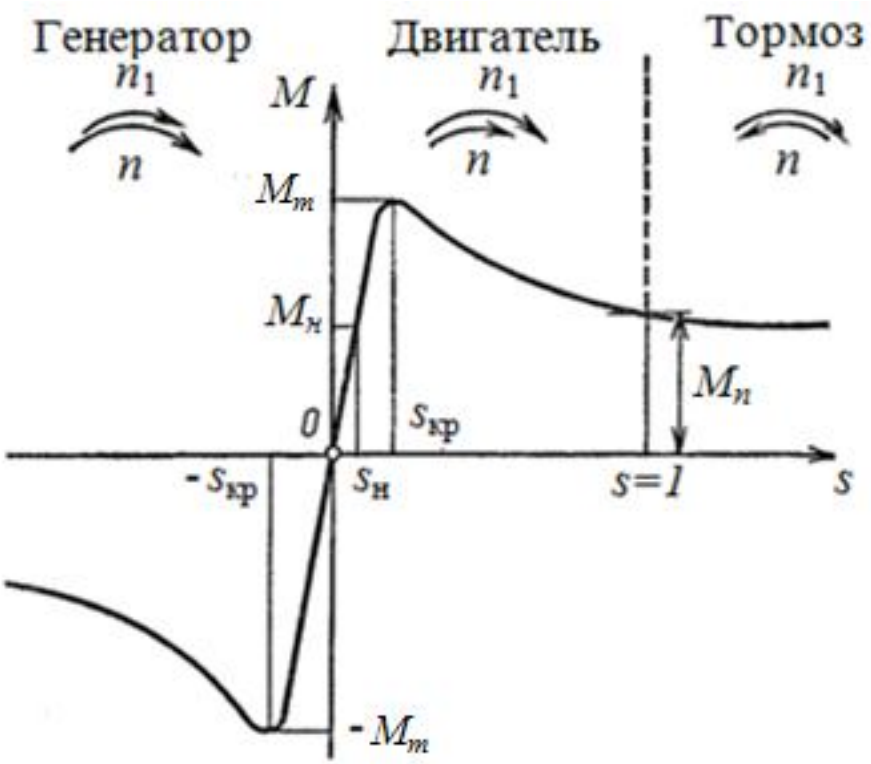


Рис. 1.7. Механическая характеристика асинхронной машины

Зависимость $M = f(s)$ на рис. 1.7 построена для трех возможных режимов работы асинхронной машины. В области скольжений от 0 до 1 характеристика соответствует двигательному режиму работы ($\omega < \omega_1$), в области скольжений от 1 до ∞ – режиму электромагнитного тормоза (ротор вращается в сторону, противоположную вращению поля) и в области от 0 до -∞ – генераторному режиму ($\omega > \omega_1$).

Согласно выражению (1.3), электромагнитный момент при любом значении скольжения пропорционален квадрату приложенного напряжения U_1.

На механической характеристике рис. 1.7 показаны три наиболее важные точки двигательного режима. Нормальная работа двигателя обычно протекает на прямолинейной части характеристики. Здесь располагается точка, соответствующая номинальному моменту M_N. Скольжение при этом моменте s_N = 0,015-0,05. Перегрузочная способность двигателя оценивается по максимальному моменту M_m. Скольжение, соответствующее этому моменту, называется критиче-

ским, и обычно $s_{кр}$ = 0,07-0,15. Часто M_m выражают в долях M_N. Кратность максимального момента для асинхронных двигателей $k_m = \frac{M_m}{M_H}$=1,7-3. Более высокие значения k_m соответствуют двигателям с меньшим числом полюсов.

Момент при скольжении s = 1 называется начальным пусковым моментом $M_П$. Он является важной величиной для оценки пусковых свойств двигателя. Момент $M_П$ также выражается в долях M_N. Для асинхронных двигателей общего назначения кратность начального пускового момента $k_П = \frac{M_П}{M_N}$= 1-1,35.

1.6. МАКСИМАЛЬНЫЙ И ПУСКОВОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Кривая $M = f(s)$ имеет два явно выраженных максимума: один – в генераторном, другой – в двигательном режиме. Определение M_m проводится обычным путем. Для этого выражение (1.3) дифференцируют по скольжению s и первую производную функции приравнивают к нулю, т. е. $dM/ds = 0$. В результате получают значение критического скольжения $s_{кр}$:

$$s_{кр} = \pm \frac{c_1 r_2^{!}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^{!})^2}}. \qquad (1.4)$$

Подставив $s_{кр}$ из (1.4) в (1.3), после преобразований получаем максимальный электромагнитный момент:

$$M_m = \pm \frac{p m_1 U_1^2}{2\omega_1[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^{!})^2}]}. \qquad (1.5)$$

Знак плюс в (1.4) и (1.5) относится к двигательному или тормозному режимам работы, знак минус – к генераторному.

Из (1.4) и (1.5) следует, что значения $s_{кр}$ как в двигательном, так и в генераторном режиме одинаковы, а максимальный момент в генераторном режиме больше, чем в двигательном. Обычно из-за малого сопротивления r_1 разница в моментах получается небольшой. Из (1.5) также следует, что максимальный момент не зависит от активного сопротивления цепи ротора r_2^1, однако согласно (1.4) это сопротивление оказывает влияние на скольжение $s_{кр}$, при котором асинхронная машина развивает момент M_m.

На рис. 1.8 приведены кривые $M = f(s)$ для различных значений $r_2^!$ при работе машины с s>0. Они показывают, что с увеличением $r_2^!$ максимум момента смещается в область больших скольжений, сохраняя при этом свое значение.

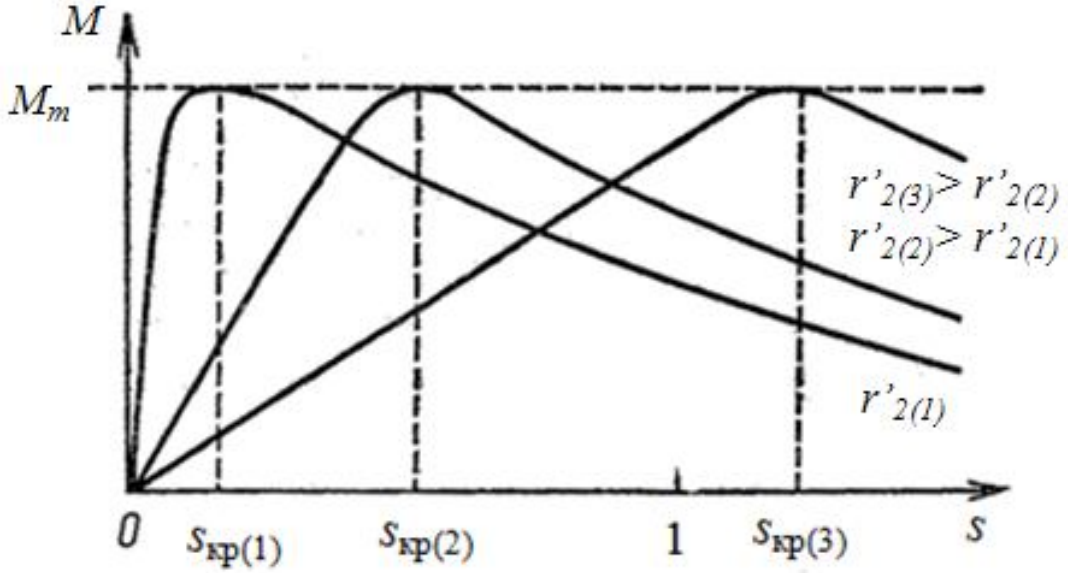


Рис. 1.8. Механические характеристики асинхронного двигателя при различном значении добавочного сопротивления в цепи ротора

В соответствии с (1.5) M_m пропорционален квадрату приложенного к обмотке статора напряжения. Поэтому снижение напряжения приводит к более сильному уменьшению кратности максимального момента k_m и перегрузочной способности двигателя.

В асинхронных машинах активное сопротивление статора r_1 в несколько раз меньше индуктивных сопротивлений x_1, x_2^1. Поэтому для практических целей, полагая $r_1 = 0$ из (1.4) и (1.5), получим:

$$s_{кр} \approx \pm \frac{c_1 r_2^!}{x_1 + c_1 x_2^!}; \qquad (1.6)$$

$$M_m \approx \pm \frac{p m_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 (x_1 + c_1 x_2^!)}. \qquad (1.7)$$

Из (1.7) видно, что максимальный момент обратно пропорционален индуктивным сопротивлениям рассеяния обмоток статора и ротора x_1, x_2^1. Поэтому при проектировании машины для увеличения M_m в первую очередь следует уменьшать эти сопротивления.

Начальный пусковой электромагнитный момент $M_П$ соответствует значению электромагнитного момента в начальный момент пуска двигателя, т. е. при $s = 1$, согласно выражению (1.3),

$$M_П = \frac{p m_1 U_1^2 r_2^!}{\omega_1 [(r_1 + c_1 r_2^!)^2 + (x_1 + c_1 x_2^!)^2]}. \qquad (1.8)$$

Пусковой момент при данных значениях параметров машины также пропорционален квадрату приложенного напряжения.

Из выражения (1.8) следует, что с увеличением $r_2^!$ момент $M_П$ растет до тех пор, пока при $s_{кр} = 1$ не будет $M_П = M_m$. При этом, согласно равенству (1.4),

$$r_2^! = \frac{1}{c_1} \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^!)^2}.$$

При дальнейшем увеличении $r_2^!$ момент $M_П$ будет снова уменьшаться.

Полезный вращающий момент на валу двигателя M_2 меньше электромагнитного момента М на величину $M_0 = \frac{p_{мех} + p_д}{\Omega}$, которая

соответствует механическим и добавочным потерям, покрываемым за счет механической мощности $P_{мех}$ на роторе. Поэтому $M_2 = M - M_0$.

Механическая характеристика двигателя представляет собой зависимость $n, s = f(M_2)$ или, наоборот, $M_2 = f(n, s)$.

Так как при нагрузке момент M_0 мал по сравнению с M и M_2, то можно положить $M_0 \approx 0$ или включить M_0 в значение статического тормозного момента $M_{ст}$, который развивается рабочей машиной или механизмом, приводимым во вращение асинхронным двигателем. Поэтому ниже в качестве механической характеристики двигателя будем рассматривать зависимость между n (или s) и электромагнитным моментом M: $n = f(M), M = f(n)$. Изображенные на рис. 1.7, 1.8 кривые момента M при указанных условиях и представляют собой механические характеристики асинхронного двигателя с постоянными параметрами.

Очевидно, что вид механических характеристик существенно зависит от значения активного сопротивления обмотки ротора.

1.7. ПРОЦЕСС ПУСКА И УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрим процесс пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутой вторичной обмоткой при его включении на полное напряжение сети. Так производится пуск подавляющего большинства находящихся в эксплуатации асинхронных двигателей. При рассмотрении процесса пуска не будем принимать во внимание электромагнитные переходные процессы, связанные с тем, что при включении любой электрической цепи электромагнитного механизма под напряжение и при изменении режима его работы токи достигают практически установившихся значений не сразу, а после истечения некоторого времени, которое пропорционально электромагнитной постоянной времени T, зависящей от индуктивности и активного сопротивления цепи. Обычно при пуске асинхронного двигателя время его разбега до нор-

мальной скорости значительно больше длительности электромагнитных переходных процессов, и поэтому влияние этих процессов на процесс пуска невелико. Следовательно, процесс пуска можно рассматривать на основе полученных выше зависимостей для вращающего момента и токов в условиях работы двигателя при установившемся режиме с заданным скольжением.

На рис. 1.9 показана механическая характеристика $M = f(n)$ асинхронного двигателя и механическая характеристика $M_{ст} = f(n)$ некоторого производственного механизма, приводимого во вращение двигателем.

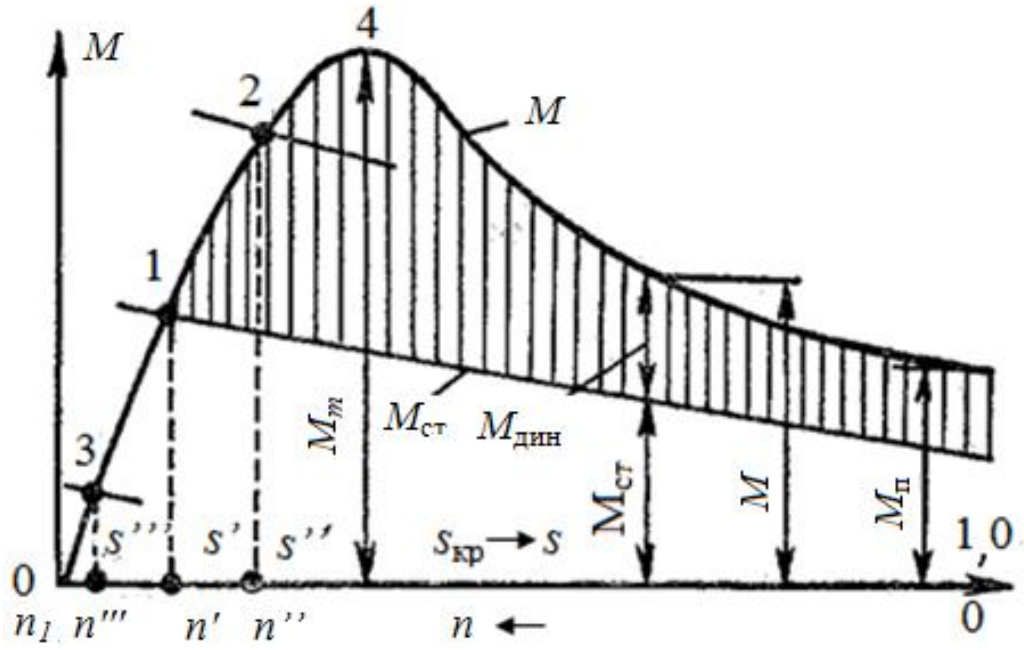


Рис. 1.9. Механические характеристики асинхронного двигателя и механизма

Уравнение моментов агрегата «двигатель – производственный механизм» имеет вид

$$M = M_{ст} + M_{дин}, \text{ где}$$

$$M_{дин} = J\frac{d\Omega}{dt} = 2\pi J\frac{dn}{dt}$$

представляет собой динамический вращающий момент агрегата, пропорциональный моменту его инерции J. Если при $n = 0$, как это пока-

зано на рис. 1.9, пусковой момент $M_П > M_{ст}$, то $M_{дин} > 0$, $\frac{dn}{dt} > 0$ и ротор двигателя придет во вращение. Ускорение ротора происходит до тех пор, пока (заштрихованная область на рис. 1.9)

$$M_{дин} = M - M_{ст} > 0.$$

В точке 1 (рис. 1.9) достигается равновесие моментов.

При этом $M_{дин} = 0$, $\frac{dn}{dt} = 0$ и наступает установившийся режим работы двигателя под нагрузкой со скоростью вращения $n^{!}$ и скольжением $s^{!}$. Величина $s^{!}$ будет тем больше, чем больше $M_{ст}$ и чем больше, следовательно, нагрузка двигателя. Если при работе двигателя его нагрузку (статический момент производственного механизма $M_{ст}$) увеличить (кривая 2 на рис. 1.9), то s возрастет, а n уменьшится. При уменьшении нагрузки (кривая 3 на рис. 1.9), наоборот, s уменьшится, а n увеличится.

Переход двигателя к новому установившемуся режиму работы при изменении нагрузки физически происходит следующим образом. Если $M_{ст}$ возрастет, то будет $M < M_{ст}$, $M_{дин} < 0$, $\frac{dn}{dt} < 0$ и движение ротора двигателя станет замедляться. При этом скольжение возрастает, в соответствии с чем увеличиваются также ЭДС E_2 и ток I_2 вторичной цепи. В результате электромагнитный момент M увеличивается и уменьшение n (увеличение s) происходит до тех пор, пока снова не наступит равенство моментов $M = M_{ст}$. При уменьшении нагрузки процесс протекает в обратном направлении.

Как видно из рис. 1.9, при круто поднимающейся начальной (левой) части кривой момента $M = f(s)$ асинхронный двигатель обладает жесткой механической характеристикой, т. е. при изменении нагрузки скорость вращения двигателя изменяется мало. Все нормальные асинхронные двигатели проектируются с жесткой механической характеристикой, когда $r_2^{!}$ и $s_{кр}$ относительно малы. При этом s и, следовательно, электрические потери в роторе при работе также малы и двигатель имеет высокий к. п. д.

1.8. ПЕРЕГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При работе двигателя на нормальном устойчивом участке механической характеристики (влево от точки 4 на рис. 1.9) его нагрузку, определяемую статическим моментом $M_{ст}$ рабочего механизма или машины, можно постепенно поднять до значения $M_{ст} = M_m$ (точка 4 на рис. 1.9), причем устойчивая работа сохраняется вплоть до этой точки. При дальнейшем увеличении нагрузки, когда $M_{ст} > M_m$, двигатель будет быстро затормаживаться и либо остановится, либо перейдет в устойчивый режим работы при малой скорости вращения. В обоих случаях, если двигатель не будет отключен, возникает опасный в отношении нагрева режим.

Таким образом, в принципе работа асинхронного двигателя возможна при $0 < M < M_m$. Однако продолжительная работа при $M \approx M_m$ в отношении нагрева также недопустима.

Кроме того, при работе двигателя необходимо иметь некоторый запас по моменту, так как возможны кратковременные перегрузки случайного характера, а также кратковременные или длительные понижения напряжения сети.

Так как $M_m \sim U_1^2$, то при уменьшении U_1, например, на 15% максимальный момент двигателя снизится до $0{,}85^3 |= 0{,}72$, или 72% от своего первоначального значения.

В связи с изложенным должно выполняться $M_m > M_H$.

Отношение максимального момента при номинальном напряжении к номинальному

$$k_m = \frac{M_m}{M_N}$$

определяет перегрузочную способность двигателя и называется кратностью максимального момента. Для двигателей разных мощностей и скоростей вращения требуется, чтобы k_m> 1,7-2,2. Меньший предел относится к двигателям со скоростью вращения n < 750 об/мин.

1.9. КРАТНОСТИ НАЧАЛЬНОГО ПУСКОВОГО МОМЕНТА И ПУСКОВОГО ТОКА

Часто асинхронные двигатели можно пускать в ход на холостом ходу или с малой нагрузкой на валу и нагружать их до номинальной или иной мощности после достижения нормальной скорости вращения. В других случаях рабочие механизмы и машины (например, вентиляторы) имеют механическую характеристику $M_{ст} = f(n)$ такого вида, что при $n = 0$ статический момент $M_{ст}$ мал и постепенно повышается с увеличением n. При этом не требуется, чтобы двигатель развивал большой пусковой момент. Однако иногда двигатели необходимо пускать в ход под значительной нагрузкой (например, крановые механизмы, подъемники, различные мельницы и т. д.), и в этих случаях требуется, чтобы двигатели имели большие пусковые моменты.

Асинхронные двигатели с фазным ротором можно пускать в ход с помощью реостата, включаемого на время пуска во вторичную цепь двигателя. Как следует из рис. 1.8, при этом пусковой момент двигателя увеличивается, а пусковой ток уменьшается. Поэтому стандарты не регламентируют значений пусковых моментов и токов асинхронных двигателей с фазным ротором. В то же время выпускаемые электромашиностроительными заводами серийные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором должны удовлетворять разнообразным условиям пуска производственных механизмов и их пусковые моменты должны быть достаточно велики.

Короткозамкнутые асинхронные двигатели должны иметь при пуске под номинальным напряжением кратность начального пускового момента

$$k_П = \frac{M_П}{M_N}$$

не менее 0,7-1,8. Меньшие значения относятся к двигателям большей мощности. Кратность пускового тока

$$k_{Пi} = \frac{I_{1П}}{I_{1N}}$$

для двигателей с короткозамкнутым ротором разных мощностей и разных скоростей вращения при этом должна быть не больше 5,5-7,0.

1.10. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При изменении нагрузки двигателя происходит изменение как потребляемых из сети тока I_1 и мощности P_1, так и угловой скорости ω (или скольжения s), КПД η и $\cos\varphi$. Нагрузкой для двигателя служит нагрузочный момент M_2, приложенный к его валу. При увеличении нагрузочного момента соответственно увеличивается электромагнитный момент, создаваемый двигателем:

$$M = M_2 + M_0 = c_m \Phi I_2 \cos\psi_2,$$

где M_0 – момент, обусловленный механическими и добавочными потерями.

Момент M_0 слабо зависит от нагрузки. Он относительно мал, и можно принять, что $M \approx M_2$. От момента M_2 зависит механическая мощность P_2, снимаемая с вала двигателя $P_2 = M_2\,\omega$.

Зависимости ω, M_2, I_1, $\cos\varphi$, η, $P_1 = f(P_2)$ называются рабочими характеристиками двигателя. Примерный их вид показан на рис. 1.10.

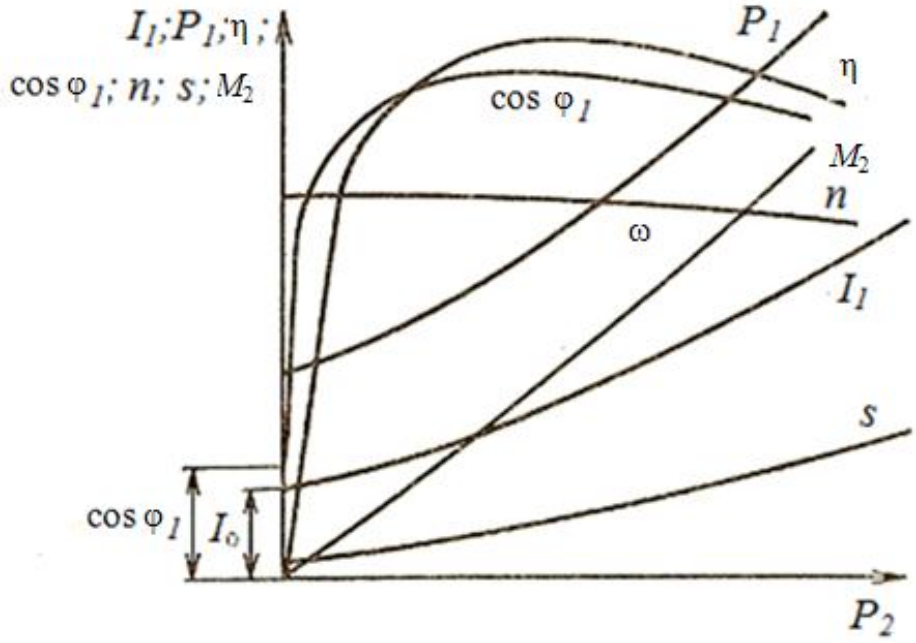


Рис. 1.10. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

При холостом ходе, когда $P_2 = 0$ и $M_2 = 0$, ток I_1 будет равен току холостого хода I_0. Как и у трансформатора, этот ток является в основном намагничивающим и создает основное магнитное поле. Однако из-за наличия воздушного зазора между статором и ротором относительное значение его больше, чем у трансформатора, и составляет 25-50% номинального тока статора.

Мощность P_1, потребляемая двигателем из сети при холостом ходе, расходуется на потери внутри машины: механические потери, магнитные потери в статоре, электрические потери в обмотке статора от тока I_0.

При увеличении момента M ток ротора I_2 должен увеличиваться. Возрастание тока I_2 происходит за счет увеличения индуцируемой в обмотке ротора ЭДС $E_{2s} = E_2 s$ вследствие снижения угловой скорости ω (увеличения s). Поэтому зависимость $\omega = f(P_2)$ имеет падающий характер. Однако у большинства асинхронных двигателей изменение частоты вращения при нагрузке незначительно, и характеристика $\omega = f(P_2)$ является достаточно жесткой. Скольжение s с ростом P_2 будет возрастать. При холостом ходе из-за наличия механических и магнитных потерь (момент M_0) ток $I_2 \neq 0$, следовательно, $\omega \neq \omega_1$ и $s \neq 0$.

При $\omega = \text{const}$ зависимость $M_2 = f(P_2)$ представляла бы прямую, идущую из начала координат. Так как фактически у асинхронного двигателя $\omega \neq \text{const}$, то реальная характеристика $M_2 = f(P_2)$ несколько отличается от линейной.

При увеличении I_2 будет возрастать ток статора I_1. При малых нагрузках скольжение, а следовательно, и индуктивное сопротивление ротора $x_{2s} = x_2 s$ малы и ток ротора будет практически активным ($\psi_2 \approx 0$), вследствие чего угол сдвига φ_1 между током I_1 и напряжением U_1 (рис. 1.11) будет уменьшаться с ростом нагрузки и $\cos\varphi$ – увеличиваться по сравнению с $\cos\varphi_0$.

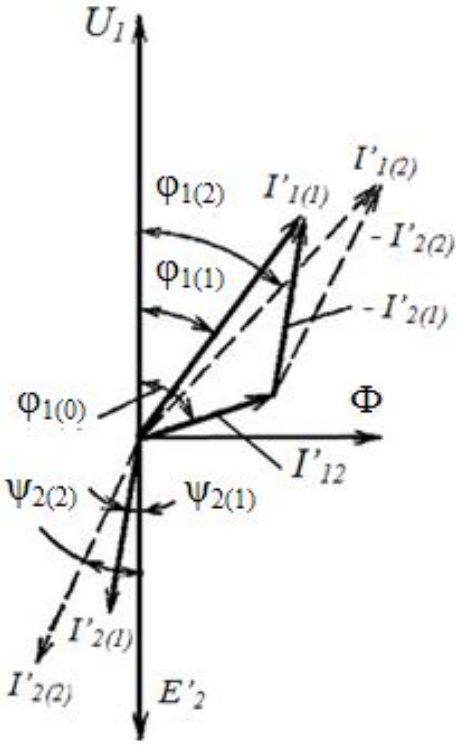


Рис. 1.11. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

При больших нагрузках скольжение и частота индуцируемой в роторе ЭДС возрастают, что приводит к увеличению индуктивного сопротивления обмотки ротора. Вследствие этого реактивная составляющая тока ротора и соответственно тока статора увеличиваются, а $\cos\varphi$ начинает уменьшаться (штриховые линии на рис. 1.11). Подводимая мощность изменяется пропорционально произведению $I_1 \cos\varphi$.

Зависимость $\eta = f(P_2)$ достигает максимального значения при нагрузке, когда постоянные и переменные потери в двигателе будут равны.

Рабочие характеристики могут быть получены экспериментально и рассчитаны с помощью схемы замещения.

2. ПУСК ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУСКА

Основными показателями, характеризующими пусковые свойства асинхронного двигателя, являются начальный пусковой момент $M_П$ и

начальный пусковой ток $I_П$. Величины $M_П$ и $I_П$ определяются при $U = U_{1н}$ и скольжении $s = 1$. Часто они выражаются в долях соответствующих номинальных величин: $k_П = \frac{M_П}{M_N}$ и $k_{Пi} = \frac{I_{1П}}{I_{1N}}$.

Для того чтобы ротор двигателя при пуске пришел во вращение, необходимо, чтобы момент $M_П$ был больше нагрузочного момента сопротивления $M_{ст}$. При прочих равных условиях чем больше будет разность $M_П$-$M_{ст}$, тем быстрее развернется двигатель. Обычно $M_П > M_Н$, а $k_П > 1$. С увеличением $M_П$ пусковые свойства двигателя улучшаются.

При скольжениях $s \approx 1$ в обмотке ротора асинхронного двигателя наводится большая ЭДС, вследствие чего ток $I_П$ в несколько раз превышает свое номинальное значение, что может вызвать при пуске колебания напряжения в питающей сети. Колебания напряжения в сети вредно отражаются на работе подключенных к ней потребителей (уменьшение накала ламп, снижение максимального момента двигателей и т. д.). Поэтому чем меньше будет ток $I_П$, тем лучше будут пусковые свойства двигателя.

Принимая в (1.2) и (1.3) скольжение $s = 1$, имеем:

$$M_П = \frac{pm_1 U_1^2 r_2^!}{\omega_1[(r_1 + c_1 r_2^!)^2 + (x_1 + c_1 x_2^!)^2]}; \qquad (2.1)$$

$$I_П \approx I_{2П}^! = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + c_1 r_2^!)^2 + (x_1 + c_1 x_2^!)^2}}. \qquad (2.2)$$

Из (2.1) и (2.2) следует, что улучшение пусковых свойств асинхронных двигателей, т. е. одновременное увеличение $M_П$ и уменьшение $I_П$, можно получить только за счет увеличения активного сопротивления роторной цепи $r_2^!$. С другой стороны, сильное увеличение активного сопротивления ротора $r_2^!$ целесообразно только на период

пуска, так как при работе повышенные значения $r_2^{!}$ вызывают возрастание потерь в обмотке ротора и снижение КПД двигателя.

Увеличение активного сопротивления ротора при пуске используется в асинхронных двигателях с фазным ротором и двигателях со специальными пазами на роторе.

Рассмотрим применяемые для трехфазных асинхронных двигателей способы пуска.

2.2. ПРЯМОЙ ПУСК

Прямой пуск благодаря своей простоте является основным способом пуска короткозамкнутых трехфазных асинхронных двигателей. При прямом пуске обмотка статора непосредственно, без всяких пусковых устройств, подключается к сети (рис. 2.1).

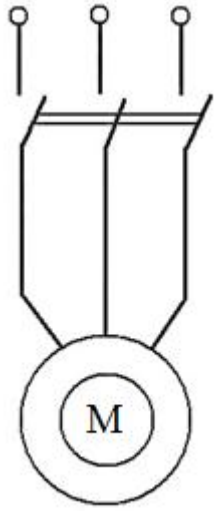


Рис. 2.1. Схема прямого пуска

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором обычно проектируют так, чтобы при прямом пуске $k_П \approx$ 1,0-1,3 и $k_{ПП}$ = 4-7. Прямой пуск протекает быстро. Его продолжительность составляет доли секунды у двигателей небольшой мощности и несколько секунд у более мощных двигателей. При пуске скорость ротора постепенно увеличивается, а его скольжение и ЭДС уменьшаются, вследствие чего происходит снижение токов в роторе и статоре. Пуск закончится,

когда скорость ротора и токи достигнут установившихся значений, определяемых нагрузочным статическим моментом на валу. Обычно эти токи не превышают номинальных значений. Если пуски происходят редко, то, несмотря на большие начальные токи, обмотки не успевают нагреваться выше допустимых температур. Крепления обмоток рассчитывают так, чтобы они могли выдерживать электродинамические усилия между проводниками, возникающие при пуске, следовательно, все асинхронные двигатели рассчитываются так, что они могут выдерживать прямой пуск.

Ограничение для применения прямого пуска обычно накладывает сеть. Если в сети от пусковых токов включаемого двигателя возникают большие падения напряжения, превышающие 10-15%, то этот двигатель прямым пуском в данную сеть включать не рекомендуется. Необходимо принять меры, уменьшающие пусковой ток.

При частых включениях двигателя, исходя из допустимого нагрева обмоток статора, число прямых пусков в час ограничивается. Допустимое число включений двигателей в час определяется в курсе электропривода.

2.3. ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ПОНИЖЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

В тех случаях, когда из-за большого падения напряжения в сети прямой пуск для короткозамкнутых двигателей недопустим, применяют подключение их обмоток статора в первый момент пуска на пониженное напряжение, при этом пусковой ток уменьшается, что приводит к снижению падения напряжения в сети. Недостатком такого способа пуска является снижение начального пускового момента пропорционально квадрату напряжения. Поэтому этот способ пуска применяется в тех случаях, когда отсутствует нагрузочный момент на валу или когда этот момент невелик. Для снижения подводимого к статору двигателя напряжения используются следующие схемы:

– пуск через реактор (рис.2.2);

– пуск через автотрансформатор (рис. 2.3);
– переключение со «звезды» на «треугольник» (рис. 2.4).

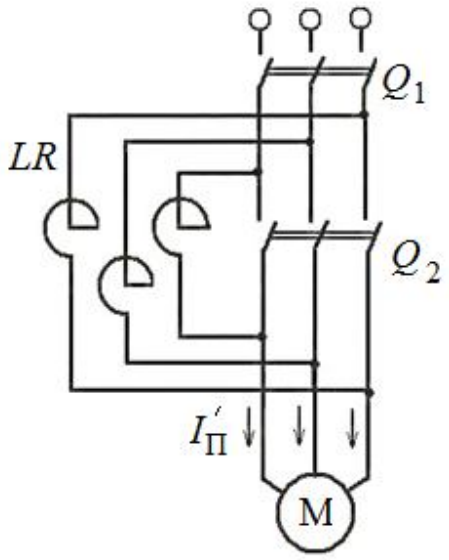


Рис. 2.2. Пуск асинхронного двигателя через реактор

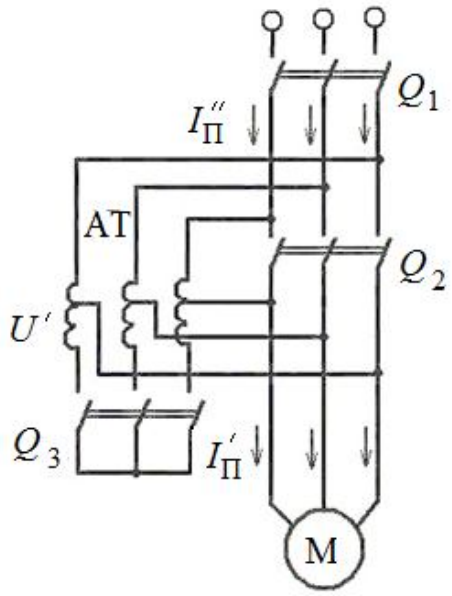


Рис. 2.3. Пуск асинхронного двигателя через автотрансформатор

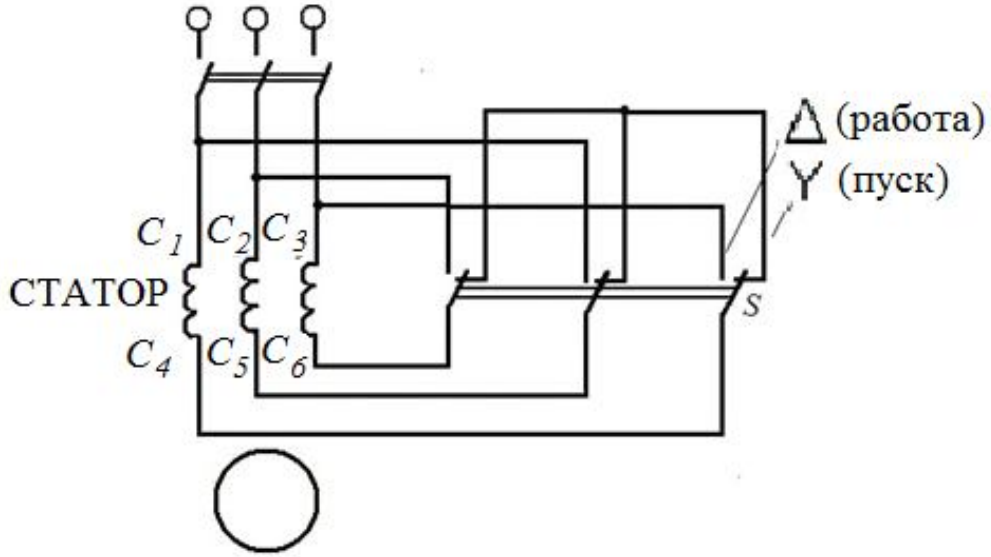


Рис. 2.4. Пуск асинхронного двигателя переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»

Пуск через реактор производится при включении выключателя Q_1 и выключенном Q_2. Из-за падения напряжения в реакторе напряжение на выводах обмотки статора уменьшится до значения U_1.

Если принять, что сопротивление Z_K двигателя остается постоянным, то пропорционально уменьшится и начальный пусковой ток $I_П^{!}$:

$$I_П^{!} = I_{ПN} \frac{U_1}{U_{1N}}, \quad (2.3)$$

где $I_{ПN}^{!}$ – начальный пусковой ток при номинальном напряжении на выводах статора (при прямом пуске).

Начальный пусковой момент при этом будет равен

$$M_П = M_{ПN} \left(U_1 / U_{1N} \right)^2,$$

где $M_{ПN}$ – начальный пусковой момент при номинальном напряжении.

Когда ток спадет, включают выключатель Q_2, которым шунтируется реактор. С этого момента к обмотке статора подводится полное напряжение сети, при котором будет протекать дальнейшая работа двигателя. Напряжение U_1 выбирают обычно равным 0,65 $U_{1Н}$.

Пуск через автотрансформатор осуществляется следующим образом. При замкнутом выключателе Q_3 (рис. 2.3) включают выключатель Q_1. При этом обмотки статора двигателя оказываются подключенными на напряжение $U^{!}$ понижающего автотрансформатора АТ. Ток во вторичной обмотке автотрансформатора и обмотке статора двигателя при Z_K= const определяется по (2.3). Вращающий момент, развиваемый двигателем в первый момент пуска,

$$M_П = M_{ПN} \left(U_1 / U_{1N} \right)^2.$$

Ток в первичной обмотке автотрансформатора, а следовательно, и ток $I_П^{!!}$, поступающий в двигатель из сети, будут меньше $I_П^{!}$ в число раз, равное отношению напряжений

$$U_1^{!}/U_{1N}, \text{ т.е.}$$

$$I_{П}^{!!}=I_{П}^{!}(U_1^{!}/U_{1N})=I_{ПN}(U_1^{!}/U_{1H})^2,$$

откуда следует, что для одного и того же снижения напряжения на выводах двигателя при автотрансформаторном пуске уменьшение тока, потребляемого из сети, происходит более резко, чем при пуске через реактор. Это является достоинством пуска через автотрансформатор, однако эта схема дороже схемы пуска через реактор.

По окончании пуска выключатель Q_3 размыкается, а выключатель Q_2 замыкается, и двигатель оказывается включенным на напряжение сети. Выключатель Q_3 отключается во избежание перегорания обмотки автотрансформатора, так как при замыкании Q_2 часть обмоток автотрансформатора шунтируется и полное напряжение сети оказывается приложенным только на оставшиеся небольшие части обмоток, вследствие чего резко увеличивается намагничивающий ток. С помощью автотрансформатора напряжение U_1 понижается до (0,55-0,73) U_{1H}.

Пуск переключением со «звезды» на «треугольник» применяется в том случае, если данному напряжению сети соответствует схема соединения обмотки статора «треугольник». Тогда, если при пуске этого двигателя обмотку статора пересоединить в «звезду» и включить ее в ту же сеть, напряжение на фазу снизится в $\sqrt{3}$ раз. Начальный пусковой ток в этом случае будет равен

$$I_{ПY}=U_{1N}/\sqrt{3}Z_K,$$

где U_{1N} – линейное номинальное напряжение; Z_K – сопротивление фазы двигателя.

После того как двигатель разгонится, обмотку статора переключателем S включают в «треугольник». При этой схеме будет происходить работа двигателя.

При прямом пуске (обмотка статора соединена в «треугольник») начальный линейный пусковой ток был бы равен

$$I_{П\Delta} = \sqrt{3}\, U_{1N} / Z_K .$$

Таким образом, применением переключения со «звезды» на «треугольник» удается снизить начальный пусковой ток в 3 раза:

$$I_{П\Delta} / I_{ПY} = 3.$$

При этом начальный пусковой момент снижается пропорционально квадрату отношения фазных напряжений, т. е. также в 3 раза. Этот способ пуска иногда применяется при пуске низковольтных двигателей большой мощности. Вычисленные по (11)-(13) уменьшения пусковых токов и моментов получены в предположении, что $Z_K = const$. В действительности с ростом тока из-за насыщения стали зубцов от потоков рассеяния индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора уменьшаются и $Z_K \neq const$. С учетом этого изменение тока при снижении напряжения будет происходить несколько сильнее.

2.4. ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

При пуске двигателя с фазным ротором в цепь ротора включается активное добавочное сопротивление $R_П$ – пусковой реостат (рис. 2.5).

Пусковой реостат обычно имеет несколько ступеней и рассчитывается на кратковременное протекание тока.

Как показано ранее, при включении активного сопротивления в цепь ротора уменьшается начальный пусковой ток $I_П$ и увеличивается начальный пусковой момент $M_П$. С физической точки зрения, увеличение начального пускового момента при введении активного сопротивления в цепь ротора объясняется тем, что в этом случае, несмотря на снижение тока ротора I_2, его активная со-

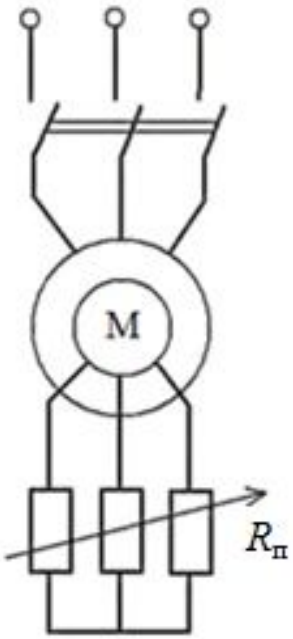


Рис. 2.5. Пуск асинхронного двигателя с фазным фактором

ставляющая $I_2 \cos\psi_2$ и пропорциональный ей вращающий момент увеличиваются вследствие уменьшения угла ψ_2.

На рис. 2.6 показана зависимость $I_П$ и $M_П$ от полного сопротивления пускового реостата $R_П$.

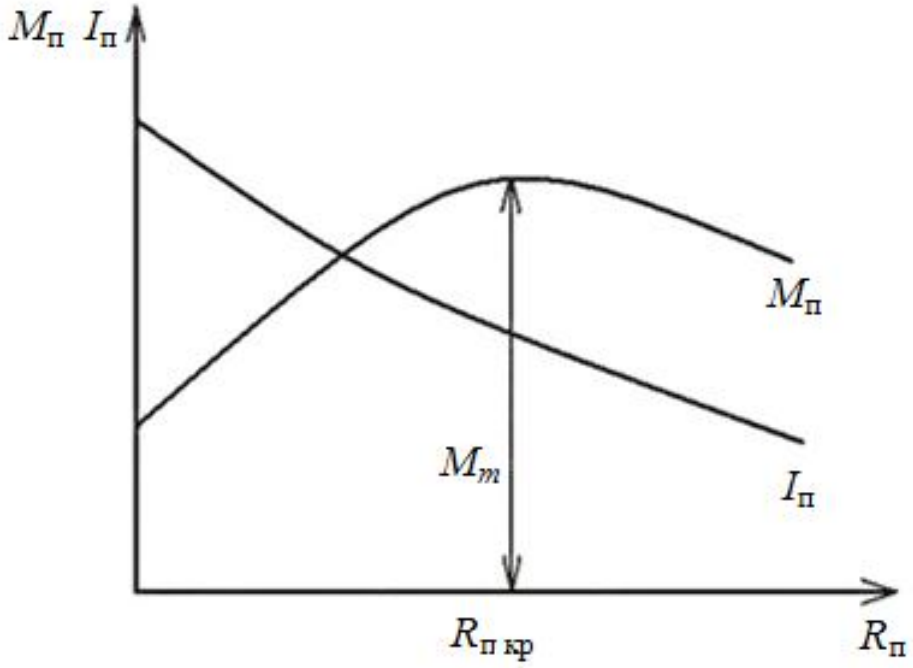


Рис. 2.6. Зависимости пускового тока и момента от величины пускового сопротивления

Наибольший начальный пусковой момент может быть получен равным максимальному моменту двигателя: $M_П = M_m$. Сопротивление пускового реостата, соответствующее $M_П = M_m$, определяют, приравняв критическое скольжение $s_{кр}$ к единице, т. е.

$$s_{кр} = \frac{c_1(r_2^! + R_{П.кр}^!)}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^!)^2}} = 1,$$

откуда приведенное к числу витков обмотки статора сопротивление пускового реостата

$$R_{П.кр}^! = \frac{1}{c_1}(\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^!)^2} - r_2^!).$$

Действительное сопротивление пускового реостата

$$R_{П.кр} = R^{!}_{П.кр}(\frac{w_2 k_{об2}}{w_1 k_{об1}}),$$

где w_1, w_2 – числа витков фазы обмоток статора и ротора;

$k_{об1}$, $k_{об2}$ – обмоточные коэффициенты этих обмоток.

Обычно выбирают $R_П \le R_{П.кр}$. По мере разгона двигателя сопротивление пускового реостата уменьшают, переходя с одной его ступени на другую. Этот переход может осуществляться как вручную, так и автоматически путем закорачивания части сопротивления с помощью контакторов. Ступени пускового сопротивления рассчитываются так, чтобы при переключениях вращающий момент двигателя менялся в выбранных пределах от $M_{П\max}$ до $M_{П\min}$.

3. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Возможные способы регулирования угловой скорости в асинхронных двигателях вытекают из формулы

$$\omega = \omega_1(1 - s). \qquad (3.1)$$

Согласно (3.1), скорость ротора двигателя можно регулировать изменением угловой скорости магнитного поля ω_1 или скольжения s. Скорость магнитного поля $\omega_1 = {2\pi f_1}/{p}$ зависит от частоты питающего напряжения f_1 и числа пар полюсов p. Изменение скольжения может быть получено за счет изменения электрических потерь в цепи ротора (регулированием подводимого напряжения или включением в цепь ротора добавочного резистора) или введения добавочной ЭДС в эту цепь.

Все указанные способы регулирования скорости находят практическое применение. Рассмотрим их подробнее. Оценку каждого из способов будем производить по следующим показателям:

- возможному диапазону регулирования;
- плавности регулирования;
- изменению КПД привода при регулировании.

3.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ f_1

Из всех возможных способов регулирования этот способ позволяет плавно изменять угловую скорость в наиболее широком диапазоне (до 10:1, а иногда и более). Для его осуществления требуется, чтобы двигатель (или группа двигателей) получал питание от отдельного источника (рис. 3.1).

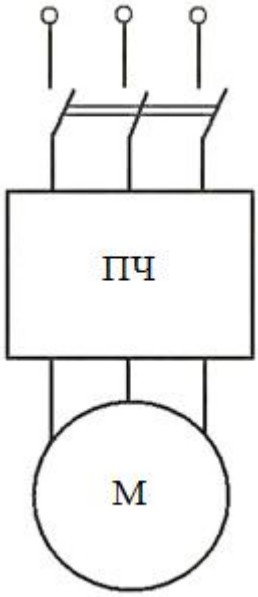


Рис. 3.1. Регулирование скорости преобразования частоты

В качестве такого источника может быть использован электромеханический или статический преобразователь частоты. В связи с развитием полупроводниковой техники в настоящее время наиболее предпочтительными являются полупроводниковые статические преобразователи.

В зависимости от требований к механическим характеристикам асинхронного двигателя при частотном регулировании одновременно с изменением частоты f_1 приходится по определенному закону изменять и подводимое к обмотке статора напряжение U_1.

Максимальный момент двигателя приближенно (пренебрегая сопротивлением r_1) определяется по формуле

$$M_m \approx \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 (x_1 + x_2^{!})}.$$

Учитывая, что $\omega_1 = {2\pi f_1}/{p}$ и $x_1 = 2\pi f_1 L_1$; $x_2^{!} = 2\pi f_1 L_2^{!}$;

где $L_1, L_2^{!}$ – индуктивности обмотки статора и приведенной обмотки ротора, получаем

$$M_m = k_1 \frac{U_1^2}{f_1^2},$$

где k_1 – постоянный коэффициент.

Отношение моментов M_m при двух значениях частоты f_1 будет равно:

$$\frac{M_{m1}}{M_{m2}} = \left(\frac{U_{1(1)} f_{1(2)}}{U_{1(2)} f_{1(1)}}\right)^2, \qquad (3.2)$$

где индексы (1) и (2) относятся к различным угловым скоростям.

Исходя из (3.2), можно получить в общем виде закон изменения U_1 при регулировании частоты f_1:

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} \sqrt{\frac{M_{m(2)}}{M_{m(1)}}}. \qquad (3.3)$$

Если при регулировании частоты вращения требуется, чтобы M_m на механических характеристиках при любой частоте f_1 оставался неизменным (регулирование с постоянным моментом), то из (3.3) получим

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} = const,$$

$$\text{или } \frac{U_{1(1)}}{f_{1(1)}} = \frac{U_{1(2)}}{f_{1(2)}} = const. \qquad (3.4)$$

Откуда следует, что для осуществления регулирования с постоянным моментом необходимо подводимое к обмотке статора напряжение изменять пропорционально его частоте. Отметим, что при осуществлении закона регулирования (3.4) основной магнитный поток машины при различных значениях частоты f_1 практически остается неизменным, т. е.

$$\Phi \approx \frac{1}{4{,}44 w_1 k_{об1}} \frac{U_1}{f_1} = const.$$

Механические характеристики двигателя при регулировании с $M_m = const$ приведены на рис. 3.2, *а*.

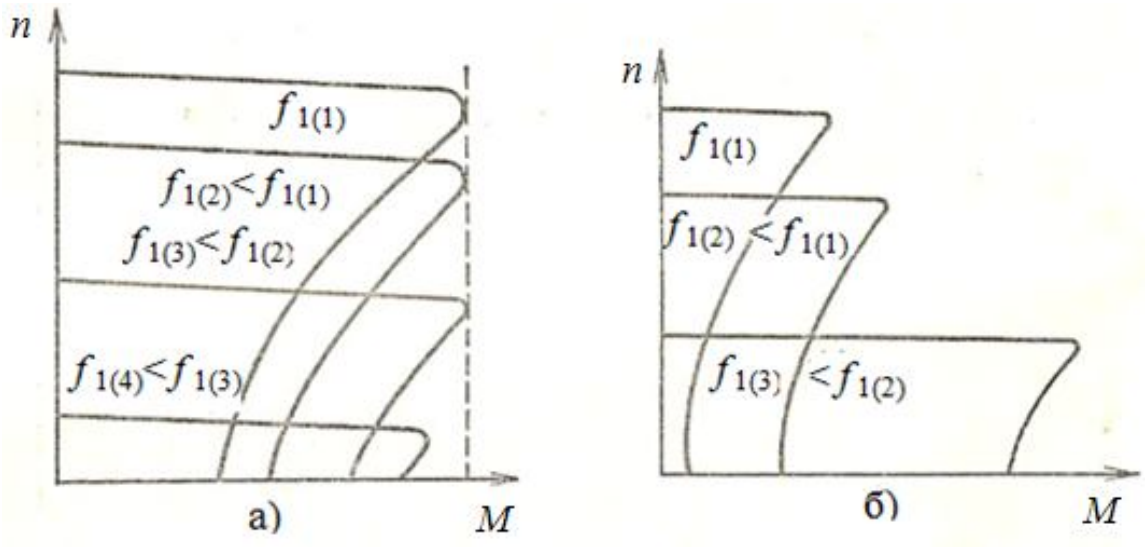


Рис. 3.2. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных значениях f_1 и $M = const$ (*а*), $P_2 = const$ (*б*)

Если регулирование происходит с постоянной механической мощностью P_2, то момент M_m должен изменяться обратно пропорционально частоте вращения, а следовательно, и f_1:

$$\frac{M_{m(2)}\omega_{(2)}}{M_{m(1)}\omega(1)} = const; \ \frac{M_{m(2)}}{M_{m(1)}} = \frac{\omega_{(1)}}{\omega_{(2)}} = \frac{f_{1(1)}}{f_{1(2)}}. \qquad (3.5)$$

Подставляя (3.5) в (3.3), получаем закон изменения напряжения при регулировании с постоянной мощностью

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \sqrt{\frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}}}. \qquad (3.6)$$

Механические характеристики для этого случая показаны на рис. 3.2, *б*.

Соотношения (3.4) и (3.6) являются приближенными, так как не учитывают влияния сопротивления r_1 на M_m, что наиболее сильно проявляется при малых частотах f_1. Поэтому при $\frac{U_1}{f_1} = const$ максимальный момент M_m в зоне малых частот будет уменьшаться (рис. 3.2, *а*).

При частотном регулировании асинхронных двигателей их энергетические характеристики остаются практически неизменными. Поэтому этот способ регулирования является экономичным. Недостатками частотного регулирования являются громоздкость и высокая стоимость источника питания.

3.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ

Угловая скорость магнитного поля в асинхронном двигателе, а следовательно, и угловая скорость ротора обратно пропорциональна числу пар полюсов. Изменяя число пар полюсов, можно регулировать скорость. Число пар полюсов зависит от шага и схемы соединения обмотки статора.

Для регулирования угловой скорости на статоре в общих пазах можно разместить не одну, а две обмотки, имеющие различные шаги, а следовательно, и различное число пар полюсов. В зависимости от необходимой скорости в сеть подключается та или иная обмотка.

Этот способ применяется сравнительно редко, так как имеет существенный недостаток – плохое использование обмоточного провода (всегда работает только одна из обмоток).

Более часто изменение числа пар полюсов достигается изменением (переключением) схемы соединения уложенной на статоре обмотки. Принцип такого переключения поясняется на рис. 3.3.

При переходе с последовательного соединения двух катушек (рис. 3.3, *а*) на параллельное соединение (рис. 3.3, *б*) число пар полюсов изменяется с 2 на 1.

При наличии фазной обмотки на роторе ее также следует переключать одновременно с обмоткой статора. Поэтому обмотку ротора у таких двигателей выполняют короткозамнутой. Асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов называют многоскоростными. Они выпускаются на две, три и четыре угловые скорости. Известно большое число схем, позволяющих осуществлять переключение числа пар полюсов. Эти схемы разделяются на схемы регулирования с постоянным моментом и схемы регулирования с постоянной мощностью.

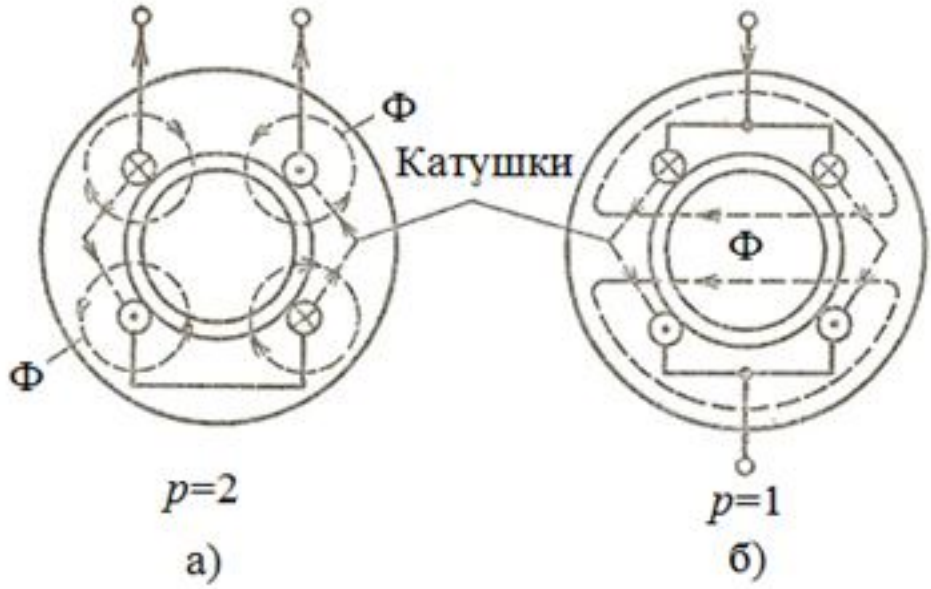


Рис. 3.3. Схемы включения обмотки статора
на различное число полюсов

Для примера на рис. 3.4 и 3.5 представлены наиболее часто применяемые схемы соединения обмоток с переключением числа пар полюсов в отношении 2:1.

Обмотки каждой фазы состоят из двух одинаковых частей. При анализе этих схем примем, что при $U_{1л}$= *const* номинальный ток в каждой части фазы $I_{1ф}$, КПД и $\cos\varphi_1$ двигателя при обеих частотах вращения будут одинаковыми.

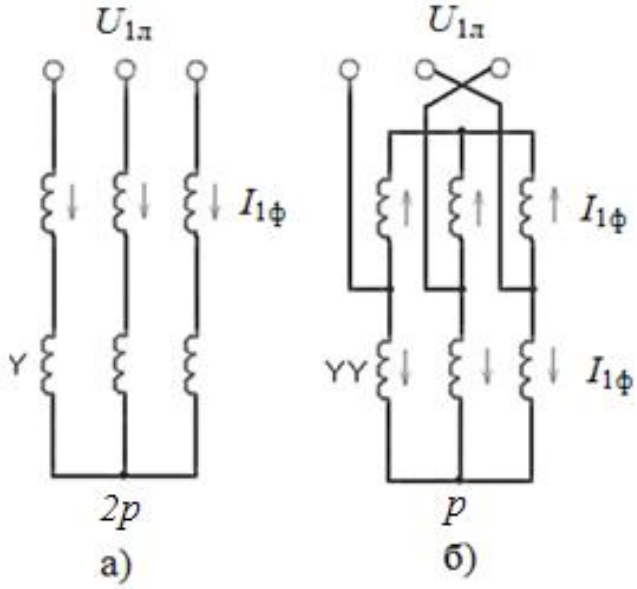


Рис. 3.4. Принципиальная схема соединений обмотки статора
с переключением числа полюсов в отношении 2:1 при M = const

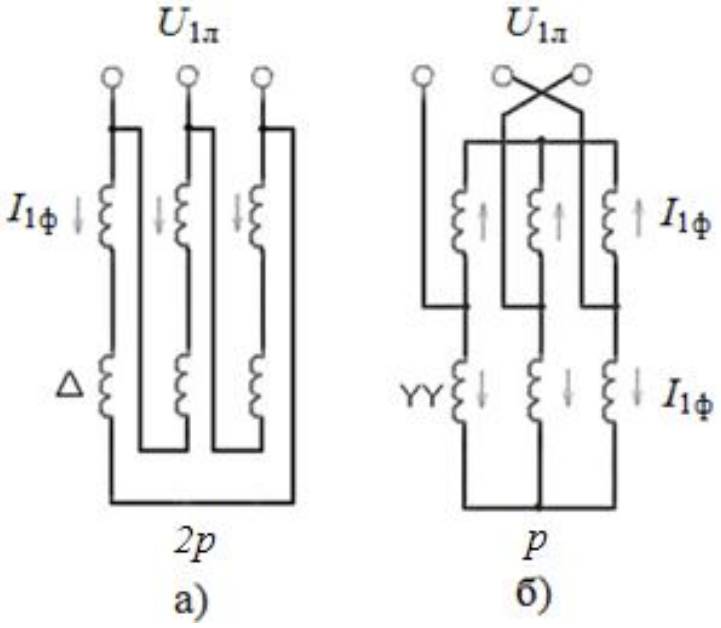


Рис. 3.5. Принципиальная схема соединений обмотки статора с переключением числа полюсов в отношении 2:1 при $P_2 = \text{const}$

На рис. 3.4, *а* обе части фазы соединены последовательно, а фазы между собой – в «звезду». На рис. 3.4, *б* половины каждой фазы соединены параллельно, образуя двойную звезду (YY). С учетом принятых допущений мощности на валу соответственно будут равны:

$$P_{2(а)} = \sqrt{3} U_{1Л} I_{1Л} \eta \cos\varphi_1,$$

$$P_{2(б)} = \sqrt{3} U_{1Л} 2 I_{1Ф} \eta \cos\varphi_1,$$

откуда

$$P_{2(б)} / P_{2(а)} = M_{(а)} \omega_{(а)} / M_{(б)} \omega_{(б)} = 2. \qquad (3.7).$$

Мощность $P_{2(б)}$ соответствует меньшему числу пар полюсов и большей в 2 раза угловой скорости. Мощность $P_{2(а)}$ соответствует большему числу пар полюсов и меньшей угловой скорости.

Как следует из (3.7), при переходе от меньшей скорости (рис. 3.4, *а*) к большей (3.4, *б*) допустимая мощность на валу увеличивается в 2 раза. Вращающий момент в том и другом случае сохраняется неизменным $M_{(а)} = M_{(б)}$. Поэтому рассматриваемая схема переключения

Y/YY (рис. 3.4) носит название схемы переключения с постоянным моментом.

На рис. 3.5 показана принципиальная схема переключения обмотки статора для изменения числа полюсов при постоянной мощности. На рис. 3.5, *а* две половины каждой фазы соединяют последовательно, а фазы между собой – в «треугольник». На рис. 3.5, *б* половины фаз соединяются параллельно, образуя двойную «звезду». Соединение по рис. 3.5, *а* соответствует большему числу пар полюсов и меньшей угловой скорости, а соединение по рис. 3.5, *б* – меньшему числу пар полюсов и большей угловой скорости.

Соответственно, мощности на валу для этих схем

$$P_{2(а)} = 3U_{1Л} I_{1Ф} \eta \cos\varphi_1;$$

$$P_{2(б)} = \sqrt{3} U_{1Л} I_{1Ф} \eta \cos\varphi_1;$$

откуда

$$P_{2(б)} / P_{2(а)} = 2\sqrt{3}/3 = 1{,}15 \approx 1.$$

Многоскоростные двигатели применяются для привода станков, вентиляторов, насосов и пр.

3.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЕМ ПОДВОДИМОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для регулирования угловой скорости асинхронного двигателя подводимое к обмотке статора напряжение по сравнению с номинальным уменьшается. Так как момент пропорционален U_1^2, то механические характеристики при меньшем напряжении пойдут ниже естественной. Если момент нагрузки $M_{ст}$ остается постоянным, то, как это следует из рис. 3.6, при снижении напряжения скольжение будет увеличиваться. Скорость при этом уменьшается. Регулирование скольжения в этом случае возможно в пределах $0 < s < s_{кр}$. Ограниче-

нием для увеличения скольжения более $s_{кр}$ является то, что при дальнейшем снижении напряжения на новой механической характеристике M_m будет меньше $M_{ст}$ и двигатель остановится. Для расширения диапазона регулирования следует увеличить $s_{кр}$ за счет повышения активного сопротивления цепи ротора.

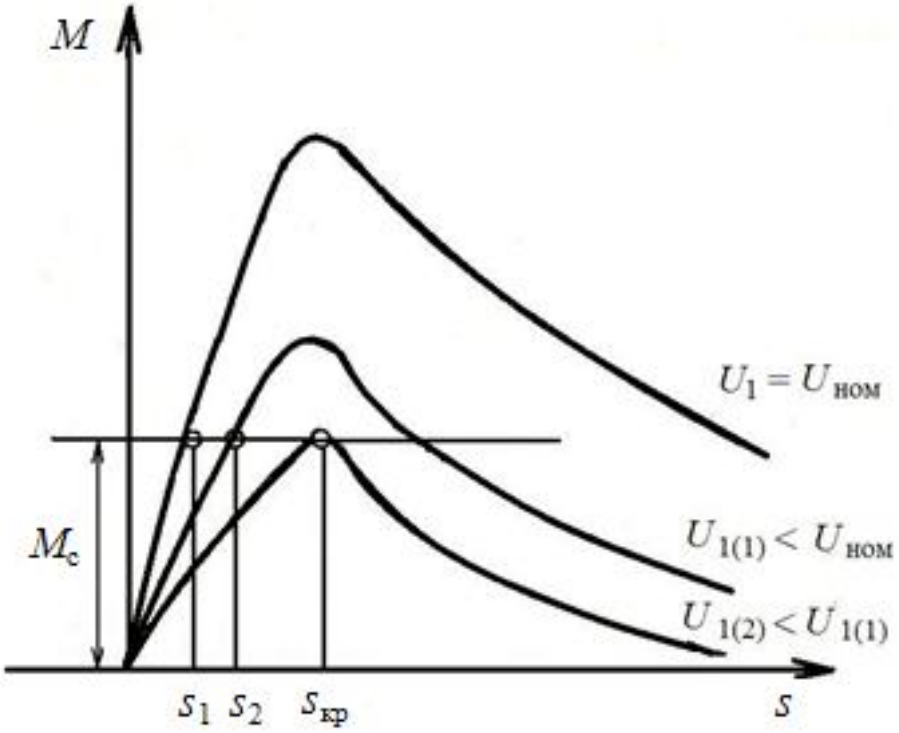


Рис. 3.6. Характеристики $M = f(s)$ при различных значениях U_1

Изменение подводимого напряжения чаще всего осуществляется с помощью последовательно включенных с двигателем реакторов, подмагничиваемых постоянным током, или за счет импульсной подачи напряжения на обмотки статора. При подмагничивании меняется индуктивное сопротивление реактора, что приводит к изменению падения напряжения в нем, а следовательно, и напряжения, подводимого к двигателю. Применив схему автоматического регулирования тока подмагничивания, можно расширить зону регулирования в область $s > s_{кр}$ и получить при этом жесткие механические характеристики.

При импульсной подаче напряжения за счет изменения продолжительности импульса можно менять среднее значение напряжения на двигателе. Здесь также можно применить схемы автоматического регулирования.

Способ регулирования угловой скорости изменением подводимого напряжения имеет существенный недостаток, состоящий в том, что в этом случае увеличиваются потери и снижается КПД двигателя. При снижении напряжения пропорционально U_1 уменьшается основной магнитный поток машины, вследствие чего при $M = M_{ст} = const$ возрастает ток, а следовательно, и электрические потери в роторе. Магнитные потери в стали статора уменьшаются. В зависимости от значения $M_{ст}$ при снижении U_1 ток в статоре и электрические потери в его обмотке могут уменьшаться или увеличиваться. Обычно при нагрузках, близких к номинальной, со снижением U_1 полные потери возрастают, что повышает нагрев двигателя. Поэтому рассматриваемый способ регулирования угловой скорости находит применение главным образом для машин небольшой мощности.

3.5. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВКЛЮЧЕНИЕМ В ЦЕПЬ РОТОРА ДОБАВОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Этот способ регулирования применяется в двигателях с фазным ротором. На рис. 3.7 показаны механические характеристики двигателя с различными значениями добавочного активного сопротивления Δr_2 в цепи ротора.

При $M_{ст} = const$ в зависимости от значения Δr_2 двигатель будет работать со скольжениями s_1- s_3, чему соответствуют угловые скорости $\omega_{(1)} - \omega_{(3)}$. Этот способ позволяет плавно, в широких пределах (до s = 1), регулировать угловую скорость. Однако практически он применяется для регулирования скорости в сравнительно узких пределах, так как при увеличении Δr_2 возрастают электрические потери в цепи ротора, при этом происходит также снижение КПД.

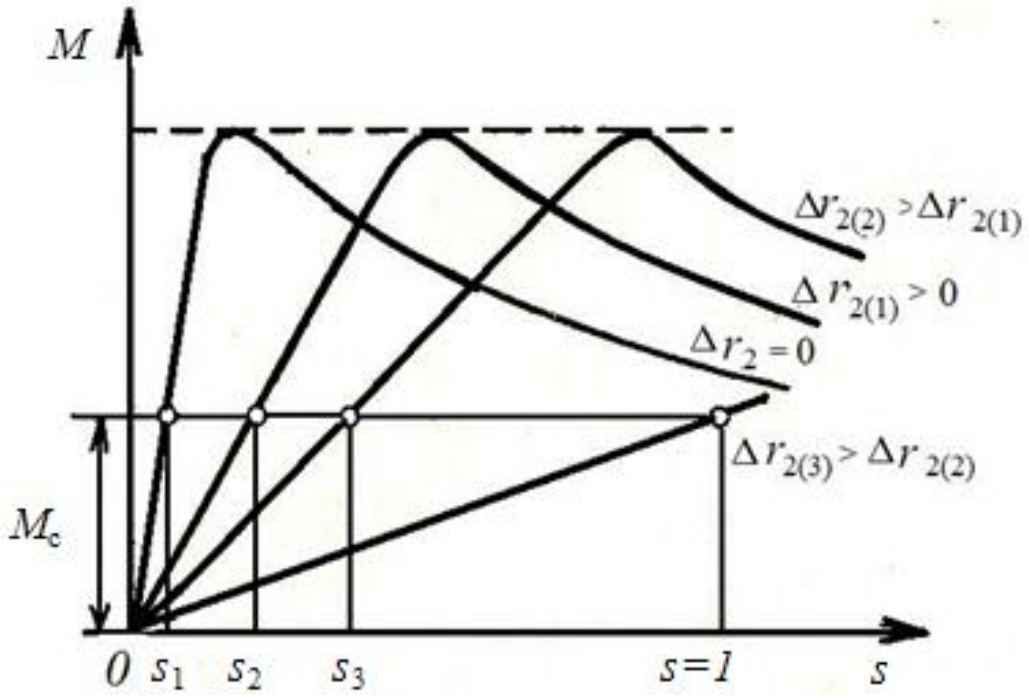


Рис. 3.7. Характеристики $M = f(s)$ при различных значениях Δr_2

В этом случае, как и в предыдущем, электрические потери в цепи ротора увеличиваются пропорционально скольжению. Однако, в отличие от предыдущего способа, здесь токи ротора и статора в процессе регулирования при $M_{cm} = const$ практически остаются неизменными, и увеличение потерь происходит не в самом роторе, а в регулировочном реостате. С точки зрения нагрева двигателя этот способ регулирования является более благоприятным.

4. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

4.1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Иногда к потребителю подводится только однофазная сеть. Примером таких потребителей являются жилые дома, некоторые учреждения и т. д. Для работы в этих сетях широко используются однофазные асинхронные двигатели. Чаще всего однофазные двигатели выпускаются на небольшие мощности (менее 0,5 кВт) и применяются для привода вентиляторов, холодильников, стиральных машин и пр.

На статоре двигателя размещается однофазная обмотка, которая занимает 2/3 полюсного деления. Эта обмотка носит название рабочей обмотки. Ротор имеет многофазную короткозамкнутую обмотку в виде «беличьей клетки», как и у трехфазного короткозамкнутого двигателя.

Иногда в качестве однофазного двигателя применяется трехфазный, у которого при работе одна из фаз остается невключенной (рис. 4.1).

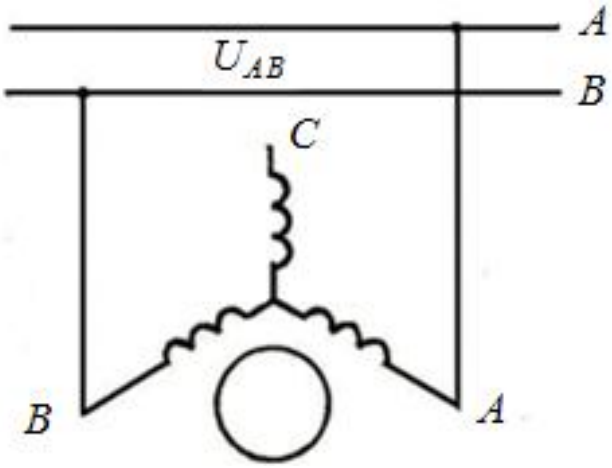


Рис. 4.1. Однофазное включение трехфазного двигателя

Расположение однофазной обмотки двигателя на всем полюсном делении статора или выполнение ее в виде последовательного соединения всех трех фаз трехфазного двигателя нецелесообразно, так как в этом случае расход обмоточного провода увеличивается в 1,5 раза, а возрастание ЭДС обмотки происходит всего в $2/\sqrt{3}$ = 1,156 раза (рис. 4.2).

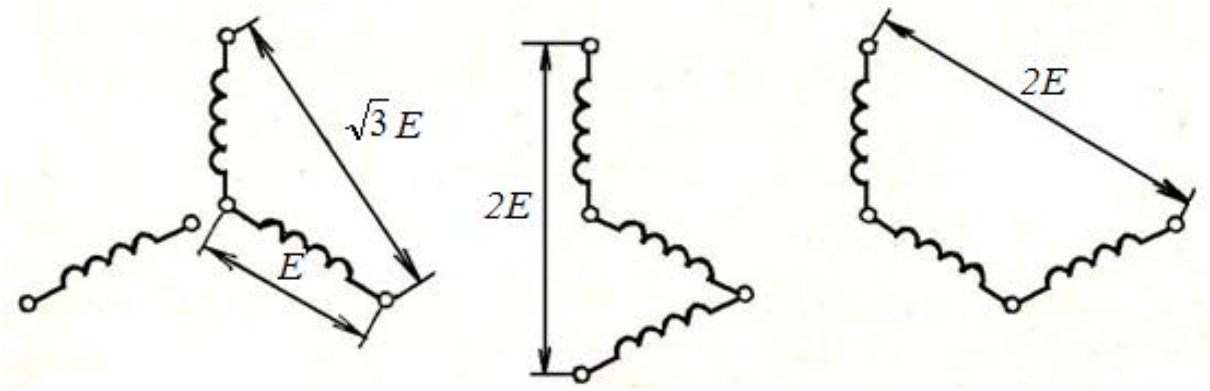


Рис. 4.2. Сопоставление ЭДС однофазной обмотки
при различных вариантах ее выполнения

При неподвижном роторе, когда по обмотке статора протекает однофазный ток, создается пульсирующее магнитное поле. Пульсирующее поле можно разложить на два равных, синхронно вращающихся в противоположных направлениях поля. Эти поля, взаимодействуя с индуцированными ими токами ротора, создают одинаковые по значению, но противоположные по направлению моменты. Поэтому результирующий вращающий момент при пуске будет равен нулю и двигатель без специальных пусковых устройств не сможет прийти во вращение.

Если принудительно развернуть ротор в какую-либо сторону, то дальше он будет вращаться в этом направлении самостоятельно и дойдет до скорости, близкой к синхронной.

Поле, которое вращается в одном направлении с ротором, называется прямым, а поле, вращающееся в противоположном направлении, – обратным. Вращающий момент, создаваемый прямым полем, является двигательным, а момент, создаваемый обратным полем, – тормозным. Скольжение ротора по отношению к прямому полю равно s, а по отношению к обратному $[\omega_1+\omega_1(1-s)]/\omega_1 = 2 - s$.

При вращении ротора магнитное поле машины будет не пульсирующим, как это было при пуске ($s = 1$), а вращающимся эллиптическим. Произойдет это потому, что при $s < 1$ обратное поле сильно ослабляется вследствие размагничивающего действия токов $I_{2(2)}$, индуцированных этим полем в роторе (рис. 4.3).

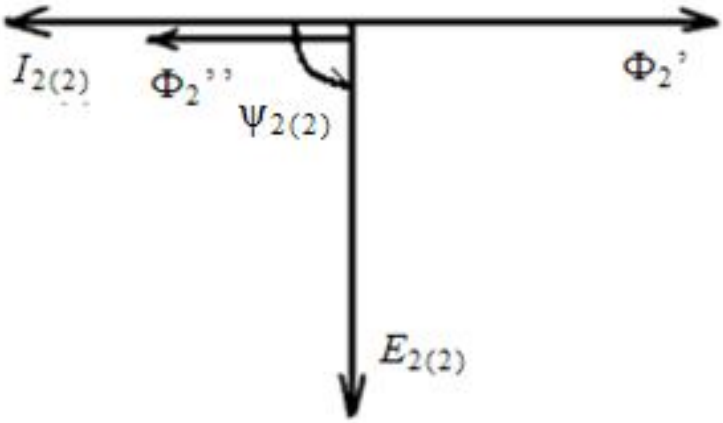


Рис. 4.3. Векторная диаграмма однофазного синхронного двигателя

Токи $I_{2(2)}$ имеют большую частоту $f_{2(2)} = f_1(2 - s)$, которую при небольших s можно принять $f_{2(2)} \approx 2 f_1$. Из-за этого индуктивное сопротивление обмотки ротора для этих токов будет велико, а их угол сдвига $\psi_{2(2)}$ от ЭДС $E_{2(2)}$ близок к $\pi/2$. Как следует из рис. 4.3, поток Φ_2''', созданный током $I_{2(2)}$, имеет встречное направление с потоком Φ_2', созданным током статора, вследствие чего результирующий поток обратного поля Φ_2 уменьшается.

При небольших значениях скольжения s индуцированные прямым полем токи ротора $I_{2(1)}$ имеют невысокую частоту и малый угол $\psi_{2(1)}$, а поэтому размагничивающего действия на прямое поле оказывать не будут.

На рис. 4.4 показаны кривые моментов M' и M''', созданные двумя составляющими магнитного поля, и результирующая кривая момента двигателя M, равная их алгебраической сумме. Результирующая кривая момента, расположенная выше оси абсцисс, соответствует одному направлению вращения ротора, а расположенная ниже оси абсцисс – другому. Обе эти части равноценны, и поэтому, как было сказано, ротор будет вращаться в том направлении, куда он был первоначально развернут внешней силой.

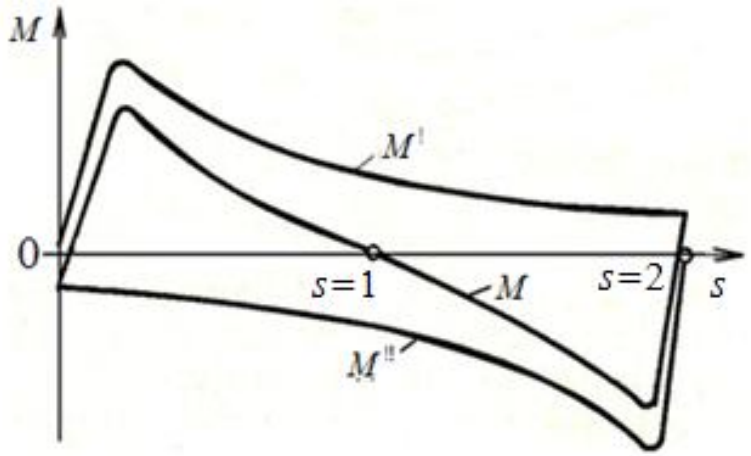


Рис. 4.4. Зависимость $M = f(s)$ для однофазного двигателя

Для направления вращения, соответствующего верхней части кривой $M = f(s)$, моменты $M^{\prime}$ и $M^{\prime\prime\prime}$ будут иметь соответственно прямое и обратное направления, а для направления вращения, соответствующего нижней части кривой, – наоборот, обратное и прямое направления.

4.2. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рабочие характеристики однофазного двигателя имеют тот же характер, что и у трехфазного, но энергетические показатели хуже. Ухудшение показателей вызвано наличием обратного поля при работе машины.

Обратное поле индуцирует в обмотках токи, которые увеличивают электрические потери. Кроме того, от этого поля возрастают магнитные потери в стали ротора, так как он будет перемагничиваться с частотой, примерно равной двойной частоте сети. Вследствие увеличения потерь уменьшается КПД двигателя.

Как следует из рис. 4.4, из-за тормозного момента от обратного поля у однофазного двигателя снижается максимальный момент и увеличивается рабочее скольжение, также уменьшается $\cos\varphi$ двигателя из-за увеличения реактивной составляющей тока холостого хода и повышения вследствие возрастания скольжения индуктивного сопротивления обмотки ротора. Увеличение тока холостого хода у од-

нофазного двигателя по сравнению с трехфазным объясняется тем, что ЭДС, уравновешивающую приложенное к обмотке статора напряжение, создает в этом случае МДС не трех, а только двух фаз.

4.3. ПУСК ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Однофазный асинхронный двигатель при подключении к сети не вращается из-за того, что при $s = 1$ его магнитное поле имеет пульсирующий характер и не создает вращающего момента. Для того чтобы ротор привести во вращение, необходимо в машине при пуске получить вращающееся магнитное поле. Известно, что вращающееся магнитное поле создают многофазные обмотки при протекании по ним многофазных токов. Простейшей многофазной системой является двухфазная. Поэтому на период пуска однофазный двигатель превращают в двухфазный. Для этого на статоре размещают еще одну обмотку, которую называют пусковой. Размещают ее в свободные от рабочей обмотки пазы статора (на 1/3 полюсного деления). При использовании трехфазного двигателя в однофазном режиме в качестве пусковой обмотки применяют свободою фазу. Как в первом, так и во втором случае между осями рабочей и пусковой обмоток будет сдвиг в пространстве на электрический угол, равный 90°. Такой угол сдвига является оптимальным и способствует улучшению пусковых характеристик.

Для создания вращающегося магнитного поля необходимо также, чтобы токи в обмотках имели между собой сдвиг во времени. При однофазной сети получить это можно за счет включения последовательно с одной из обмоток фазосдвигающих элементов. Чаще всего эти элементы включаются в цепь пусковой обмотки. В качестве пусковых элементов используются активные сопротивления, конденсаторы или катушки индуктивности. На рис. 4.5 показана схема пуска однофазного асинхронного двигателя. На рис. 4.6 для этой схемы приведены векторные диаграммы при различных фазосдвигающих элементах ($Z_П$), включенных в цепь пусковой обмотки.

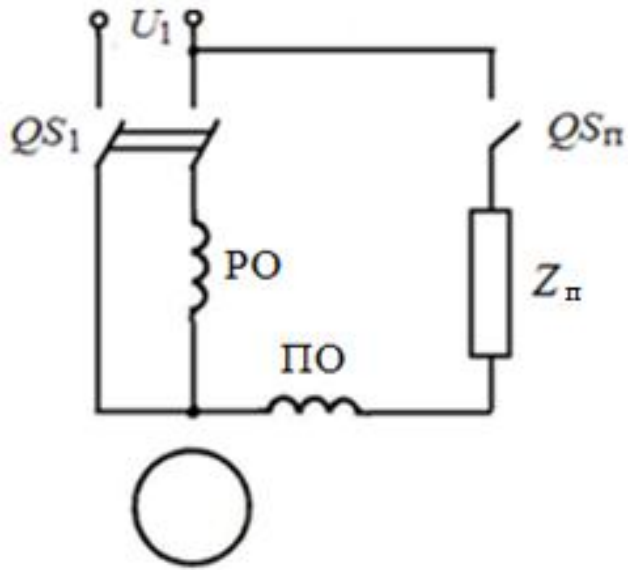


Рис. 4.5. Схема пуска однофазного двигателя

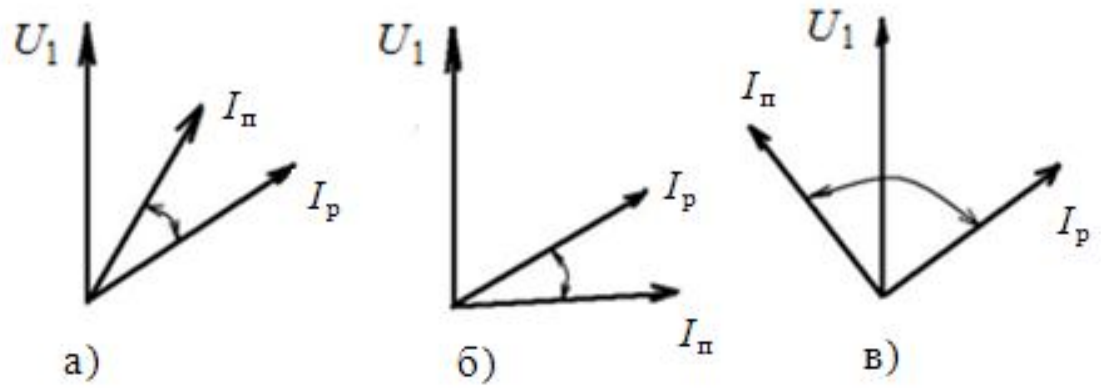


Рис. 4.6. Векторные диаграммы пусковых токов однофазного двигателя при различных сопротивлениях $Z_П$:

а – активное сопротивление; *б* – индуктивное сопротивление; *в* – емкостное сопротивление

Из рис. 4.6 следует, что при включении активного или индуктивного сопротивления угол сдвига между токами обмоток всегда будет меньше 90°. Поэтому в этом случае вращающееся поле будет эллиптическим (будет содержать обратную составляющую). Обратное поле создает тормозной момент, который будет снижать пусковой момент. Лучшие пусковые характеристики можно получить при отсутствии обратного поля, т. е. тогда, когда поле будет круговым.

Для того чтобы получить круговое вращающееся поле, необходимо выполнить следующие условия:

− пусковая и рабочая обмотки должны быть смещены в пространстве на электрический угол, равный 90°;
− МДС этих обмоток должны быть равны;
− токи в обмотках должны иметь временной сдвиг на 90°.

Если первые два условия зависят от выполнения обмоток и при желании могут быть осуществлены всегда, то третье условие выполняется только в случае, когда в качестве фазосдвигающего устройства используется конденсатор (рис. 4.6, *в*). Однако из-за высокой стоимости конденсаторов такой пуск применяется только тогда, когда необходимо получить большой пусковой момент.

Наиболее часто применяется пуск через активное сопротивление (рис. 4.6, *а*). Чтобы уменьшить или исключить полностью активное добавочное сопротивление $Z_П$, пусковую обмотку выполняют с повышенным по сравнению с рабочей обмоткой сопротивлением (за счет уменьшения сечения провода и выполнения бифилярной намотки части катушек).

При пуске одновременно включаются рубильники QS_1 и $QS_П$, а по окончании пуска пусковая обмотка отключается рубильником $QS_П$ и дальнейшая работа происходит только с одной обмоткой. На рис. 4.7 показана механическая характеристика двигателя при пуске его по описанной схеме.

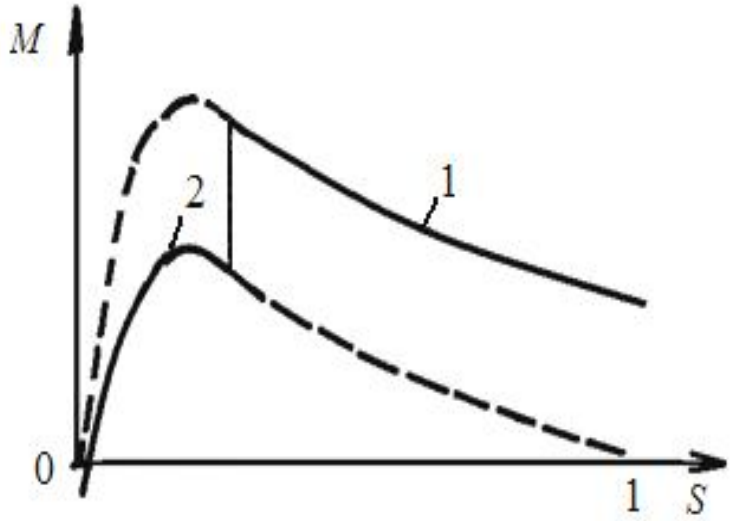


Рис. 4.7. Механическая характеристика однофазного двигателя при включенной во время пуска пусковой обмотке

При включенных рубильниках QS_1 и QS_{II} работа происходит на характеристике 1 (двухфазный режим), а при выключении рубильника QS_{II} – на характеристике 2 (однофазный режим).

4.4. МОЩНОСТЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ТРЕХФАЗНОМ И ОДНОФАЗНОМ РЕЖИМАХ

Если у трехфазного двигателя отключить одну из фаз, то он будет работать как однофазный, при этом во избежание недопустимого нагрева его мощность должна быть уменьшена. Определим соотношение между мощностями двигателя при его работе в трехфазном и однофазном режимах.

Исходя из одинакового нагрева обмотки статора следует принять, что потери в ней при трехфазном и однофазном питании должны быть одинаковыми. В трехфазном режиме ток проходит по трем фазам, а в однофазном – по двум. Тогда

$$3\, I_{1(3)}^2\, r_1 = 2\, I_{1(1)}^2\, r_1,$$

откуда получим

$$I_{1(1)} = I_{1(3)} \sqrt{3/2}; \qquad (4.1)$$

т. е. при однофазном питании ток в фазе можно увеличить в $\sqrt{3/2}$ раз.

Потребляемые из сети мощности в трехфазном и однофазном режимах будут соответственно равны:

$$P_{1(3)} = \sqrt{3}\, U_1\, I_{1(3)} \cos\varphi_{(3)}; \;\; P_{1(1)} = U_1\, I_{1(1)} \cos\varphi_{(1)};$$

а мощности на валу

$$P_{2(3)} = P_{1(3)}\, \eta_{(3)} = \sqrt{3}\, U_1\, I_{1(3)} \cos\varphi_{(3)}\, \eta_{(3)};$$

$$P_{2(1)} = P_{1(1)}\, \eta_{(1)} = U_1\, I_{1(1)} \cos\varphi_{(1)}\, \eta_{(1)};$$

откуда соотношение между мощностями с учетом (4.1)

$$P_{2(1)} / P_{2(3)} = \cos\varphi_{(1)}\, \eta_{(1)} / \sqrt{2} \cos\varphi_{(3)}\, \eta_{(3)}.$$

Так как $\cos\varphi_{(1)}$ и $\eta_{(1)}$ однофазного двигателя ниже, чем трехфазного (обычно $\cos\varphi_{(1)} \approx 0{,}95 \cos\varphi_{(3)}$ и $\eta_{(1)} \approx 0{,}95\, \eta_{(3)}$), то $P_{2(1)} / P_{2(3)} \approx 0{,}63$,

т. е. в одних и тех же габаритах мощность однофазного двигателя составляет около 63% мощности трехфазного. Таким образом, по сравнению с трехфазными однофазные двигатели имеют плохое использование материала и худшие характеристики. Достоинством их является возможность работы от однофазной сети, чем и определяется область их применения.

4.5. КОНДЕНСАТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Для повышения использования и улучшения характеристик однофазных двигателей можно пусковую обмотку с включенными в ее цепь конденсаторами оставить подсоединенной к сети на весь период работы. В этом случае подбором емкости конденсаторов можно добиться кругового или почти кругового вращающегося магнитного поля в рабочем режиме. Тогда обратная составляющая поля будет отсутствовать полностью или будет в значительной мере ослаблена, в результате чего улучшатся характеристики и повысится использование машины. Такой двигатель называется конденсаторным (рис. 4.8).

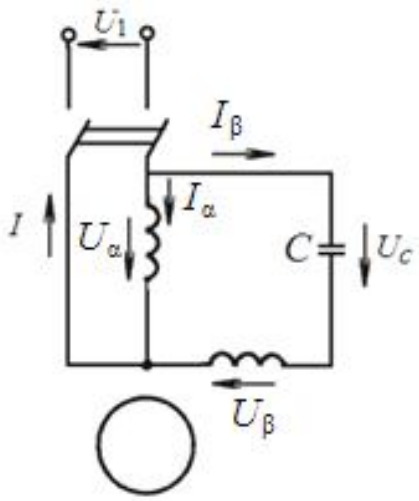


Рис. 4.8. Схема конденсаторного двигателя

У конденсаторного двигателя обе обмотки будут рабочими. Из условия получения кругового поля их числа витков в общем случае будут различными.

Следует обратить внимание, что при заданном значении емкости конденсатора С круговое поле создается только при одной опреде-

ленной нагрузке двигателя (при одном значении тока I). При других нагрузках поле будет эллиптическим и работа двигателя ухудшится. Можно регулировать емкость с изменением нагрузки, но это усложнит схему двигателя. Иногда для того, чтобы получить круговое поле при пуске и при какой-либо нагрузке, конденсаторы включают параллельно. При нагрузке работает один конденсатор, а при пуске включают оба.

В конденсаторных двигателях использование материалов и КПД почти такое же, как и у трехфазного двигателя равной мощности, а $\cos\varphi$ даже больше. По своей сути конденсаторный двигатель является двухфазным двигателем.

4.6. ДВИГАТЕЛЬ С ЭКРАНИРОВАННЫМИ ПОЛЮСАМИ

Статор двигателя с экранированными полюсами имеет явнополюсную конструкцию (рис. 4.9). На полюсах размещается сосредоточенная однофазная обмотка О, которая включается в однофазную сеть. Часть полюса охватывается короткозамкнутым витком К. Ротор двигателя имеет короткозамкнутую обмотку в виде «беличьей клетки».

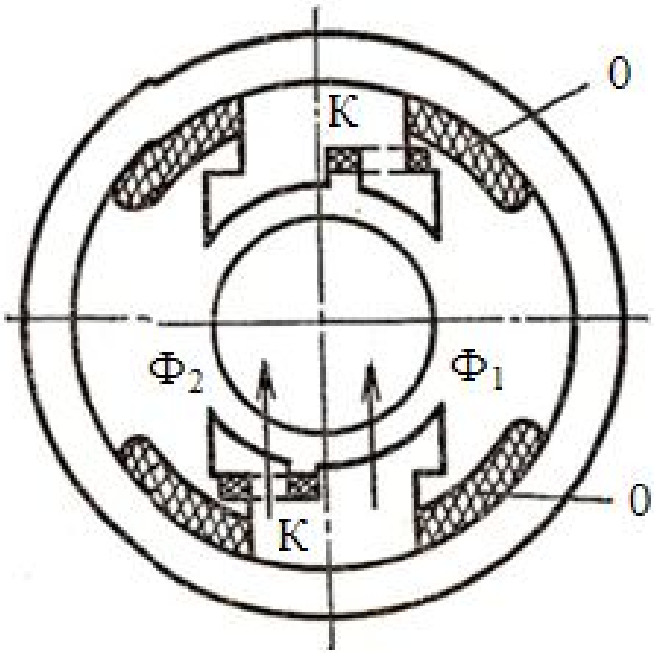


Рис. 4.9. Устройство асинхронного двигателя с экранированными полюсами

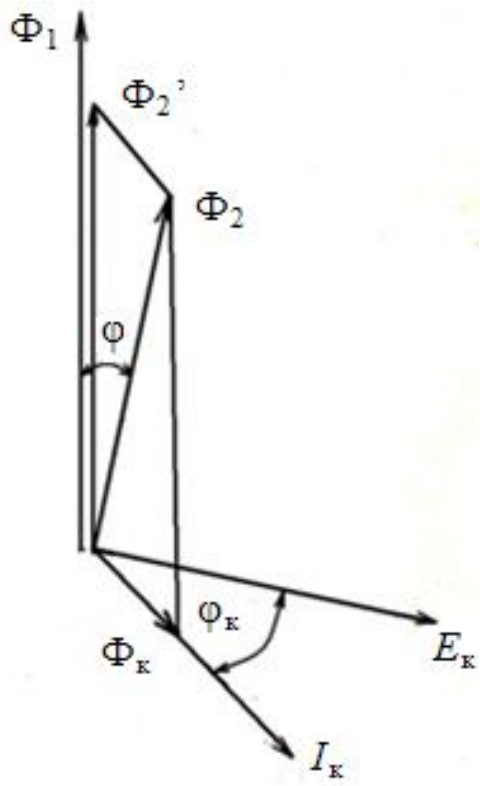


Рис. 4.10. Векторная диаграмма двигателя с экранированными полюсами

Магнитный поток, проходящий через полюс двигателя, можно представить в виде двух составляющих. В части полюса, не охваченной короткозамкнутым витком, проходит поток Φ_1, созданный МДС однофазной обмотки статора. Другую часть полюса можно рассматривать как трансформатор, у которого первичной обмоткой является обмотка статора, а вторичной – короткозамкнутый виток. Результирующий поток этой части полюса будет равен геометрической сумме потока $\Phi_2^!$, созданного МДС обмотки статора, и потока $\Phi_к$ от МДС тока $I_к$. Ток $I_к$ обусловлен ЭДС $E_к$, индуцированной в короткозамкнутом витке результирующим потоком Φ_2. Из-за наличия индуктивности короткозамкнутого контура ток $I_к$ отстает от ЭДС $E_к$ на угол $\varphi_к$. Электродвижущая сила $E_к$, как и обычно в трансформаторах, отстает от магнитного потока Φ_2 на угол $\frac{\pi}{2}$. Из векторной диаграммы (рис. 4.10) следует, что между потоками двух частей полюсов Φ_1 и Φ_2 из-за экранирующего действия короткозамкнутого

витка будет существовать сдвиг во времени на угол ψ. Кроме того, оси этих потоков смещены на определенный угол в пространстве.

Вследствие наличия временного и пространственного сдвигов между потоками магнитное поле в машине будет вращающимся. Так как потоки Φ_1 и Φ_2 не равны между собой и углы сдвига между ними меньше 90°, то магнитное поле будет эллиптическим. Вследствие этого двигатели с экранированными полюсами имеют ряд недостатков: большие габаритные размеры, небольшой пусковой момент ($M_П = (0{,}2 - 0{,}5)M_N$), низкий $\cos\varphi$=(0,4-0,6) и невысокий КПД (0,25-0,4) из-за больших потерь в короткозамкнутом витке.

Некоторого улучшения пусковых и рабочих характеристик удается получить применением магнитных шунтов из листовой стали между полюсами, увеличением воздушного зазора под неэкранированной частью полюса, расположением на каждом полюсе двух-трех короткозамкнутых витков разной ширины.

5. АСИНХРОННАЯ МАШИНА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРА

Асинхронная машина может работать генератором как параллельно с сетью, к которой подключены другие генераторы, так и на автономную нагрузку.

5.1. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ

Как было сказано, если асинхронная машина подключена к сети, то для того чтобы она начала работать генератором, необходимо с помощью постороннего двигателя развернуть ее ротор в сторону вращения магнитного поля с угловой скоростью ω, большей синхронной скорости ω_1. Скольжение при этом будет отрицательным.

Направления перемещения магнитного поля относительно проводников статора и ротора в этом случае противоположны, поэтому ЭДС, индуцируемые в них (рис. 5.1), будут иметь разные знаки. По

сравнению с двигательным режимом, направления ЭДС $E_2^{!}$ и активной составляющей тока ротора меняются на обратные. В результате этого изменяется направление момента, т. е. он становится тормозным и направленным против движения ротора.

Реактивная составляющая тока ротора

$$I_{2p} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + (x\ s)^2}} \sin\psi_2 = \frac{s^2 E_2 x_2}{r_2^2 + (x_2 s)^2}$$

в генераторном режиме (при $s < 0$) имеет тот же знак, что и в двигательном.

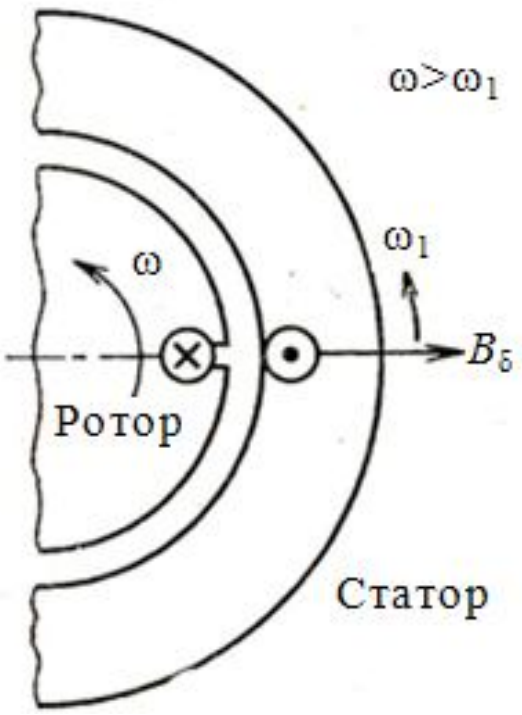


Рис. 5.1. Направление ЭДС в проводниках обмотки статора и ротора в генераторном режиме работы машины

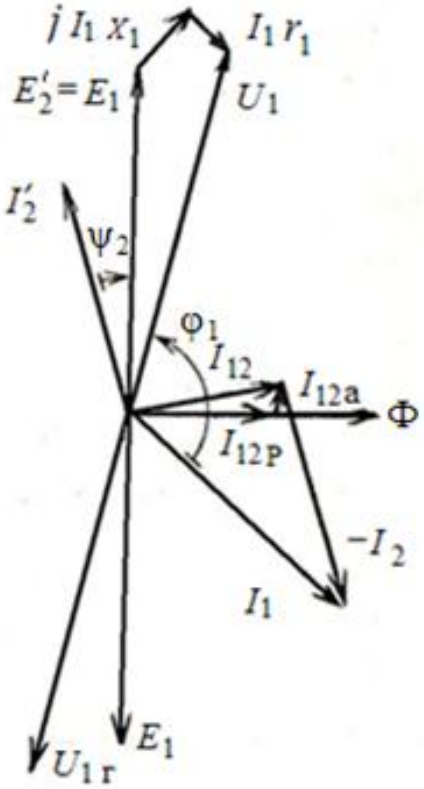


Рис. 5.2. Векторная диаграмма асинхронного генератора

На рис. 5.2 показана векторная диаграмма асинхронного генератора. На ней ЭДС E_1 и $E_2^{!}$ находятся в противофазе, а ток $I_2^{!}$ направлен в сторону опережения ЭДС на угол ψ_2. Последнее вытекает так-

же из того, что $tg\psi_2 = x_2^{!}s / r_2^{!}$ при $s < 0$ имеет отрицательное значение, а следовательно, угол ψ_2 также будет отрицательным. Векторная диаграмма построена в соответствии с уравнениями электрического равновесия асинхронной машины [2]. Отметим, что в цепи ротора асинхронного генератора, если ее рассматривать независимо от цепи статора, ток $I_2^{!}$ отстает от ЭДС $E_2^{!}$ на угол ψ_2. В совместной векторной диаграмме для правильного учета воздействия на цепь статора эквивалентного неподвижного ротора принимается, что ток $I_2^{!}$ опережает ЭДС $E_2^{!}$ на угол ψ_2.

Из векторной диаграммы (рис. 5.2) видно, что в генераторном режиме угол $\varphi_1 > \pi/2$ и, следовательно, $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1 < 0$. Это указывает на то, что мощность не потребляется, а отдается в сеть.

Вектор U_1 представляет собой напряжение сети. Вектор напряжения генератора $U_{1Г}$, уравновешивающего напряжение сети, будет иметь противоположное направление: $U_{1Г} = -U_1$. Регулирование отдаваемой генератором в сеть активной мощности достигается изменением угловой скорости ротора (изменением скольжения). Рабочие характеристики генератора могут быть построены по круговой диаграмме [2] или с помощью схемы замещения.

Недостатком асинхронного генератора, так же как и асинхронного двигателя, является потребление из сети реактивной мощности, необходимой для создания магнитного поля. Мощность эта велика и составляет 20-50% полной мощности генератора. Поэтому асинхронные генераторы как источники переменного тока применяются сравнительно редко.

В электроприводе генераторный режим асинхронной машины используется для рекуперативного торможения. Примером этому может быть спуск груза подъемным краном, когда двигатель включается согласно с направлением спуска. Тогда под действием силы тяжести груза ротор разгоняется, и его скорость становится больше синхронной, т. е. машина переходит в генераторный режим. Тормоз-

ной момент, который возникает в этом случае, ограничивает скорость спуска груза, а кинетическая энергия груза будет преобразовываться в электрическую и возвращаться в сеть.

5.2. АВТОНОМНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Для того чтобы автономный асинхронный генератор мог работать на собственную сеть (нагрузку), он должен самовозбудиться. Как видно из векторной диаграммы (рис. 5.2), магнитный поток Φ в генераторе создается реактивной составляющей I_{12P} намагничивающего тока. Эта составляющая опережает индуцируемую в обмотке статора ЭДС E_1 на 90°. В автономном генераторе реактивный опережающий ток, необходимый для самовозбуждения, получается от конденсаторов C, специально подключаемых к обмотке статора (рис. 5.3).

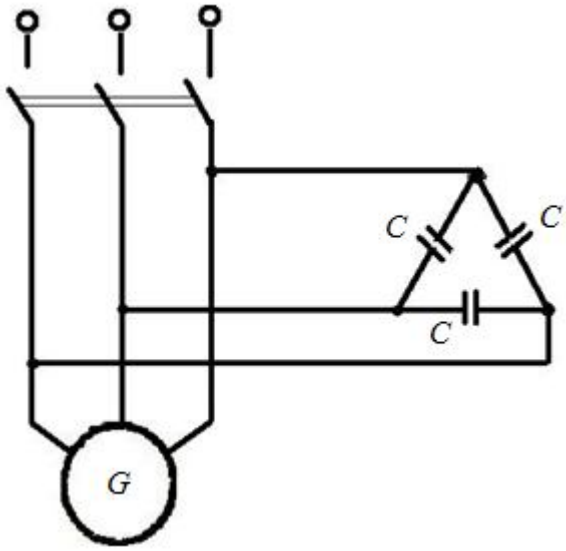


Рис. 5.3. Схема самовозбуждения асинхронного генератора

Первопричиной самовозбуждения генератора является наличие остаточного магнитного потока $\Phi_{ОСТ}$ в стали ротора. При вращении ротора поток $\Phi_{ОСТ}$ индуцирует в обмотке статора ЭДС $E_{ОСТ}$, которая вызывает в конденсаторах ток. Этот ток, протекая по обмотке статора машины, усиливает остаточный магнитный поток. Больший магнитный поток индуцирует большую ЭДС, а это приводит к дальнейшему росту тока и потока, что, в свою очередь, вызывает дальнейшее возрастание ЭДС, и т. д.

Для самовозбуждения асинхронного генератора требуются конденсаторы большой емкости. Это увеличивает размеры и стоимость установки. Кроме того, при постоянной емкости конденсаторов с увеличением нагрузки напряжение на выводах генератора резко падает, а его стабилизация вызывает большие затруднения.

Благодаря своей конструктивной простоте и отсутствию скользящего контакта, автономные асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором находят применение в специальных установках.

6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

6.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ТОРМОЗ

При работе асинхронной машины в режиме электромагнитного тормоза ротор вращается в сторону, противоположную вращению магнитного поля. Скольжение в этом режиме будет больше единицы ($s > 1$).

Направление перемещения поля относительно проводников статора и ротора в режиме тормоза будет таким же, что и при работе машины двигателем. Поэтому векторные диаграммы для этих режимов не имеют принципиальных отличий.

Как и в двигательном режиме, электромагнитный момент в тормозном режиме будет направлен по направлению вращения поля. Но поскольку ротор вращается в противоположную сторону, на него этот момент будет оказывать тормозящее действие.

При работе в режиме электромагнитного тормоза в обмотке ротора выделяется не только электромагнитная мощность, но и мощность, поступающая с вала, так как внешний момент, приложенный к ротору, действует в сторону его вращения. Вся потребляемая машиной энергия расходуется на покрытие потерь в машине, которые достаточно велики. Поэтому этот режим является тяжелым в тепловом отношении и при $U_1 = U_{1N}$ допустим лишь кратковременно.

Практическое применение режим электромагнитного тормоза находит для быстрого торможения двигателя и приводимого им в движение механизма.

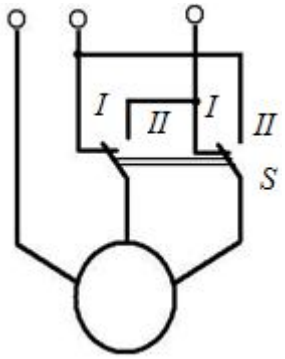


Рис. 6.1. Схема перевода асинхронного двигателя в режим электромагнитного тормоза

Для того чтобы осуществить торможение, необходимо иметь возможность с помощью переключателя S (рис. 6.1) изменять порядок чередования фаз подводимого к обмотке статора напряжения, а следовательно, и направление вращения магнитного поля. После остановки ротора, во избежание разгона его в другую сторону, переключатель S следует отключить.

6.2. АСИНХРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

Возможность использования асинхронной машины в качестве преобразователя частоты вытекает из равенства $f_2 = f_1 s$. Изменением скольжения s частоту f_2 можно или уменьшить ($s < 1$), или увеличить ($s > 1$) по сравнению с частотой f_1. Практическое применение асинхронные преобразователи частоты нашли главным образом для повышения частоты переменного тока с 50 до 100 и 150 Гц. Они используются для питания быстроходных асинхронных двигателей с частотой вращения $n > 3000$ об/мин.

Асинхронный преобразователь частоты (рис. 6.2) состоит из трехфазной асинхронной машины П с контактными кольцами и соединенного с ней приводного двигателя Д. Обмотка статора асин-

хронной машины П включается в первичную сеть промышленной частоты f_1, а обмотка ротора через контактные кольца и щетки питает вторичную сеть током частоты f_2.

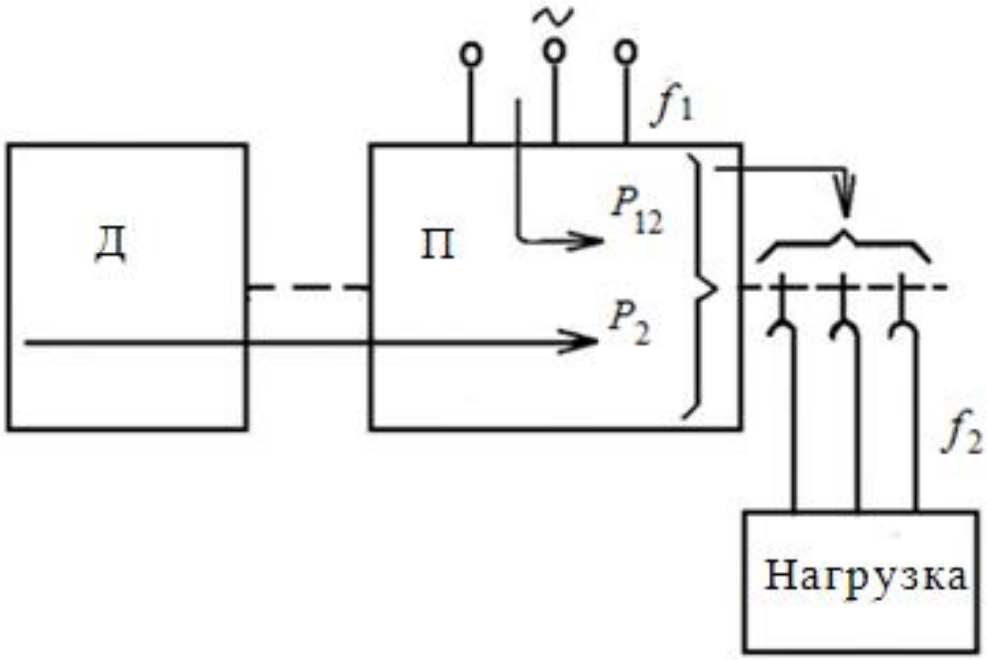


Рис. 6.2. Асинхронный преобразователь частоты

Мощность, отдаваемая обмоткой ротора во внешнюю сеть, частично поступает от статора электромагнитным путем, а частично преобразуется из механической мощности P_2, получаемой от двигателя Д.

Полная активная электрическая мощность цепи ротора

$$P_{Э2} = m_2 I_2^2 \sum r_2,$$

где $\sum r_2$ – сумма сопротивлений ротора и нагрузки.

Мощность, переносимая электромагнитным путем в ротор,

$$P_{12} = m_2 I_2^2 \frac{\sum r_2}{s} = P_{Э2} \frac{1}{s},$$

а подведенная со стороны двигателя

$$P_2 = P_{Э2} - P_{12} = P_{Э2} \ (s-1)/s.$$

Отношение между этими мощностями $P_{12}/P_2 = 1/(s-1)$.

При $s = 2$, когда $f_2 = 2f_1$, $P_{12} = P_2$.

Если не требуется регулирование частоты f_2, то в качестве приводного двигателя преобразователя используется короткозамкнутый асинхронный двигатель.

6.3. ЛИНЕЙНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Линейный двигатель является электрической машиной, в которой используется энергия бегущего магнитного поля для линейного перемещения подвижной части. Основное преимущество таких двигателей – отсутствие кинематических цепей для преобразования вращательного движения в линейное, что значительно упрощает приводимый механизм и повышает его КПД. Существует большое разнообразие линейных двигателей. В настоящее время большой интерес проявляется к асинхронным линейным двигателям как относительно простым по конструкции. Эти двигатели можно представить как разрезанную по образующей и развернутую в плоскость обычную асинхронную машину вращательного движения.

Развернутый в плоскость статор асинхронного двигателя будет являться первичным элементом, а развернутый ротор – вторичным элементом линейного двигателя (рис. 6.3).

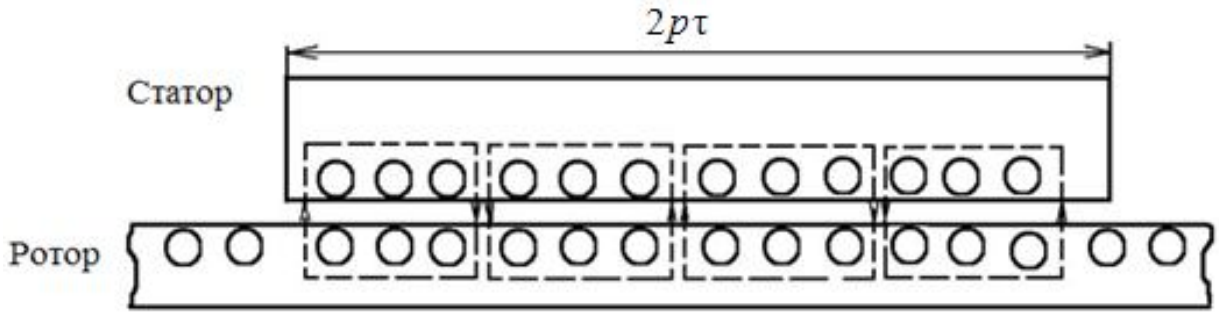


Рис. 6.3. Линейный асинхронный двигатель

Стальной магнитопровод первичного элемента выполняется шихтованным, и в его пазах укладывается многофазная (обычно трехфазная) обмотка. Вторичный элемент выполняется или с короткозамкнутой обмоткой, уложенной в пазы стального сердечника, или пред-

ставляет собой сплошную токопроводящую пластину, которая изготавливается из меди, алюминия или магнитной стали.

При включении обмотки первичного элемента в многофазную сеть образуется магнитное поле, которое будет перемещаться вдоль магнитопровода с линейной скоростью $v_1 = 2\tau f_1$, где τ – полюсное деление; f_1 – частота питающего напряжения.

При своем перемещении магнитное поле будет индуцировать ЭДС во вторичном элементе машины. Эта ЭДС вызовет токи, от взаимодействия которых с магнитным полем образуется механическая сила (тяговое усилие), стремящаяся сдвинуть элементы относительно друг друга.

В линейном двигателе возможно перемещение как первичного элемента, так и вторичного, в зависимости от конструкции и назначения конкретного двигателя.

Как и в обычном асинхронном двигателе, перемещение элемента будет происходить с некоторым скольжением относительно поля: $s = (v_1 - v)/v_1$, где v – скорость движения элемента.

Номинальное скольжение линейного двигателя – 2-6%. На работу линейного двигателя оказывают существенное влияние краевые эффекты, возникающие из-за конечных размеров разомкнутых магнитопроводов первичного и вторичного элементов, что приводит к ухудшению таких характеристик, как тяговое усилие, коэффициент мощности и КПД.

Линейные двигатели могут быть успешно применены в установках непрерывного транспорта (на ленточных и тележечных конвейерах, а также в приводах эскалаторов и движущихся тротуаров), в металлорежущих и ткацких станках, где рабочие органы совершают возвратно-поступательное движение. Большие перспективы имеет применение линейных двигателей для транспорта. Основным преимуществом линейного двигателя в этом случае является возможность получения высоких скоростей движения – до 400-500 км/ч.

Часть II
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ВВЕДЕНИЕ

Целью учебных лабораторных испытаний является более глубокое изучение студентами вопросов теории электромеханического преобразования энергии, ознакомление с конструкцией электрических машин и их основными характеристиками, приобретение практических навыков экспериментальных исследований и обработки опытных данных.

Лабораторные работы рассчитаны на 4 часа аудиторных занятий по экспериментальному исследованию электрических машин и на 2...4 часа самостоятельной работы студентов по обработке и анализу полученных опытных данных.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Перед началом работ в лаборатории все студенты обязаны ознакомиться с правилами техники безопасности при работе с электротехническими установками и расписаться в соответствующем журнале, хранящемся у заведующего лабораторией.

При выполнении лабораторных работ по электрическим машинам следует помнить, что испытания проводятся при напряжениях до 250 В, а в некоторых случаях и выше. При неблагоприятных условиях опасные поражения электрическим током могут произойти даже при напряжении ниже 50 В, поэтому во время работы студенты должны быть внимательными, дисциплинированными и строго соблюдать следующие требования техники безопасности.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, все члены студенческой бригады должны обстоятельно ознакомиться с оборудованием лабораторной установки и устройством отдельных ее

частей. Студенты обязаны знать номинальные данные исследуемых электрических машин и не допускать их превышения в ходе работы, за исключением случаев, оговоренных особо.

1. К сборке электрической схемы необходимо приступать только после разрешения преподавателя, убедившись, что ни одна из частей установки не находится под напряжением.

2. При обнаружении на лабораторном стенде неисправностей следует обратиться к дежурному лаборанту. Работа на неисправном стенде категорически запрещается.

3. Включение установки под напряжение разрешается только после проверки схемы и всей установки преподавателем.

4. В процессе выполнения лабораторной работы категорически запрещается прикасаться к находящимся под напряжением оголенным токоведущим участкам схемы и вращающимся частям электрических машин.

5. Все необходимые переключения в схемах разрешается производить лишь при полном отключении напряжения.

6. Студентам запрещается делать какие-либо переключения на главном распределительном щите и заходить за лабораторные стенды.

7. Если в ходе работы требуется сделать перерыв (для выполнения контрольных расчетов, консультации с преподавателем, отдыха и т. д.), то напряжение со стенда должно быть полностью снято.

8. Категорически запрещается оставлять без присмотра даже на короткое время лабораторную установку, находящуюся под напряжением.

9. По окончании работы в первую очередь должно быть снято напряжение со стенда. После утверждения преподавателем полученных экспериментальных данных схема разбирается и рабочее место приводится в порядок.

Нарушение правил техники безопасности и поведения в лаборатории рассматривается как серьезное нарушение дисциплины.

ТРЕБОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Перед каждой лабораторной работой студент должен самостоятельно, используя рекомендованную литературу и настоящее руководство, подготовиться и знать следующие основные вопросы:

− устройство и принцип действия исследуемой электрической машины;

− вид ее основных характеристик;

− назначение всех элементов испытуемой установки, их взаимодействие и обозначение на электрической схеме.

Перед началом занятий преподаватель проверяет устно, письменно или при помощи контролирующих устройств знания студентов и их готовность к выполнению предстоящей работы.

К каждому следующему занятию студент представляет отчет о предыдущей работе и защищает его.

Студент, не представивший отчет о предыдущей работе, к лабораторным занятиям не допускается.

Отчет выполняется каждым студентом индивидуально на стандартных листах формата А4 (287×210 мм).

Отчет должен содержать:

1) титульный лист с названием работы, фамилией студента, указанием его факультета, курса и группы, фамилией проверяющего преподавателя и т. д.;

2) программу работы;

3) номинальные данные исследуемых машин;

4) электрическую схему (схемы) установки, выполненную в соответствии с действующими стандартами;

5) таблицы экспериментальных и расчетных данных. Каждая таблица должна иметь название и порядковый номер, в таблице обязательно должны быть указаны единицы измерения приведенных величин;

6) пример расчета данных, необходимых для построения графиков и диаграмм;

7) рисунки опытных и расчетных характеристик, выполненные на листах формата А4 с помощью графических редакторов или вручную. Рисунки должны сопровождаться названием, порядковым номером и необходимыми поясняющими надписями. На графиках должны быть четко проставлены все экспериментальные точки, имеющиеся в соответствующей таблице. Характеристики проводятся в виде плавных кривых таким образом, чтобы число «выпавших» экспериментальных точек по обе стороны кривой было примерно равным;

8) выводы по проделанной работе. В выводах должно быть в краткой форме сделано заключение по каждому из проделанных опытов и по каждой опытной и расчетной характеристике.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы – овладение практическими навыками экспериментального определения рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и оценки потребительских свойств этого двигателя.

Программа работы

1. Изучить устройство и элементы конструкции двигателя.
2. Определить экспериментальным путем следующие характеристики двигателя: характеристики холостого хода, короткого замыкания, рабочие, механические.
3. Выполнить опыт «идеального» холостого хода.
4. Определить рабочую характеристику двигателя расчетным путем по электрической схеме замещения.

Паспортные данные испытуемого двигателя

Номинальная потребляемая активная мощность $P_{1N} = 98$ Вт

Номинальная полезная механическая мощность $P_{2N} = 35$ Вт

Номинальное напряжение $U_{1N} = 220$ В

Номинальный ток обмотки статора $I_{1N} = 0{,}35$ А

Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_N = 0{,}73$

Номинальный коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}36$

Число пар полюсов $p = 2$

Механические потери $p_{мех} = 20$ Вт

Магнитные потери $p_{мг} = 33$ Вт

Активное сопротивление фазы обмотки статора $R_1 = 22{,}2$ Ом

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОСТОГО ХОДА $I_{10} = f(U_{10})$, $P_{10} = f(U_{10})$, $\cos\varphi_0 = f(U_{10})$ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

1.1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

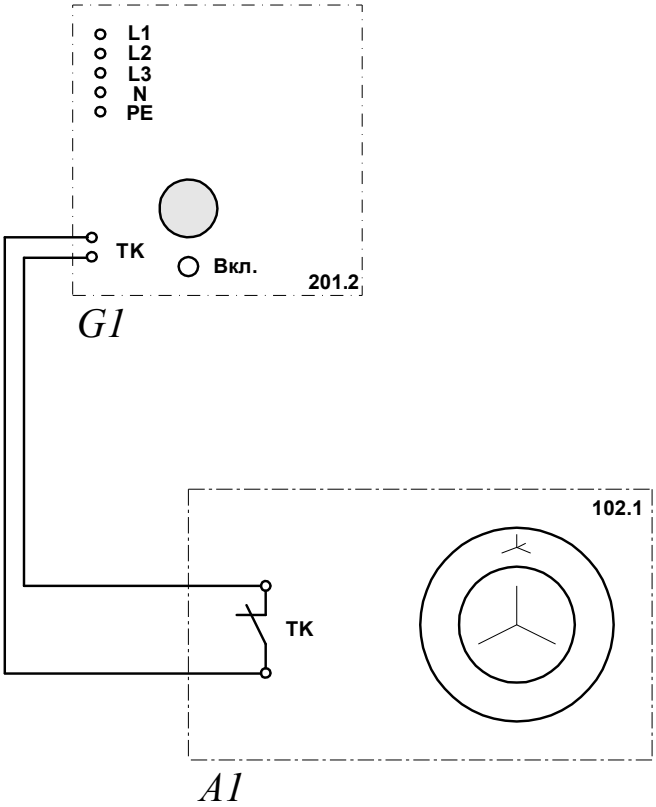


Рис. 1.1.1. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

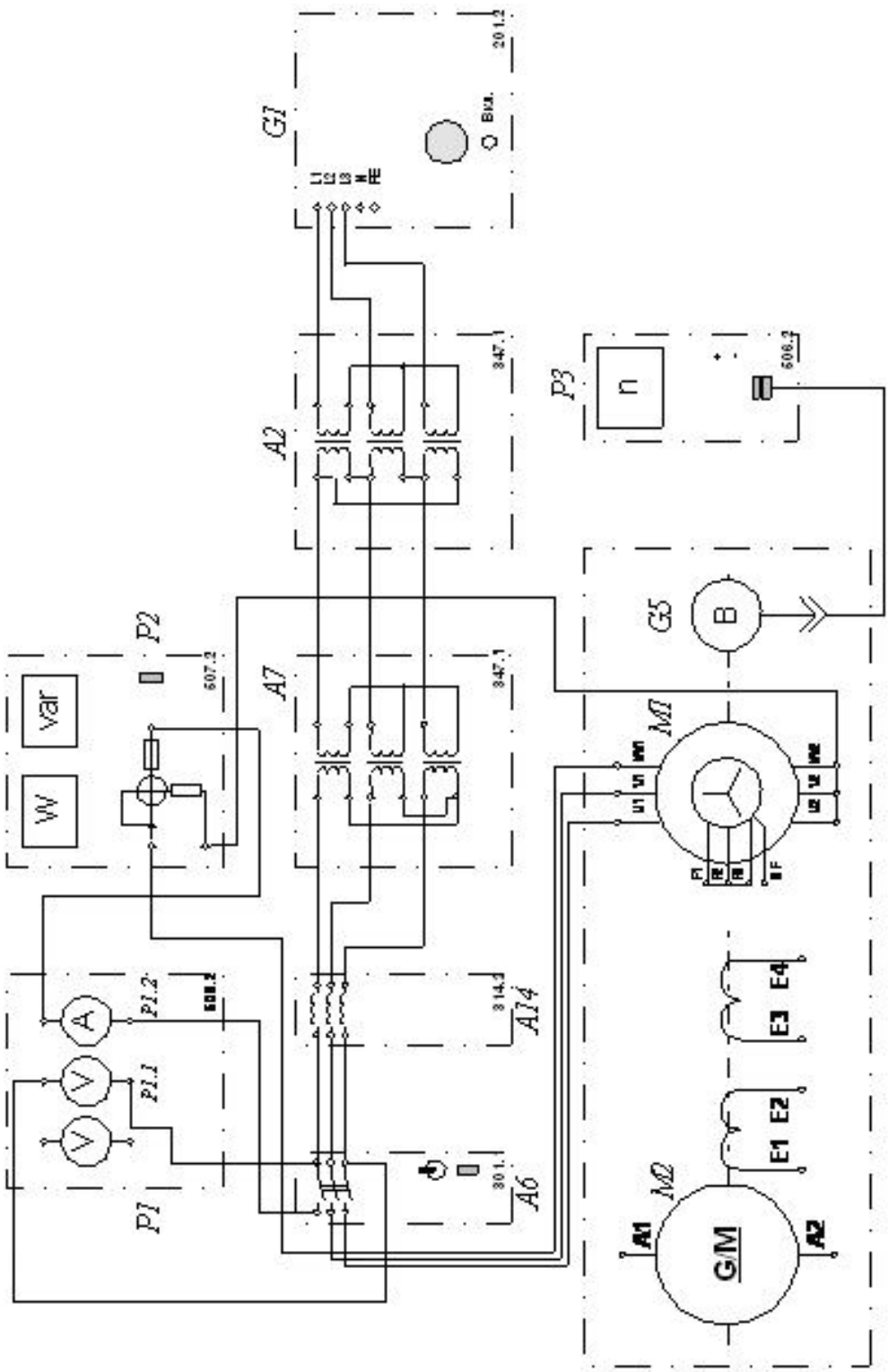


Рис. 1.1.2. Электрическая схема соединений для опыта холостого хода

1.1.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 1.1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин⁻
M2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
A2, A7	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В/242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
A14	Линейный реактор	314.2	3 × 0,3 Гн / 0,5 А
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≂ 0...1000 В / ⎓ 0...10 А / 0…20 МОм
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

1.1.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G1* – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Преобразователь угловых перемещений *G5* генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P3* электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель *M1* получает питание через выключатель *A6* и трехфазные трансформаторные группы *A2, A7* от трехфазного источника питания *G1*.

Линейный реактор *A14* служит для дополнительного понижения напряжения, подводимого к испытуемому двигателю *M1*.

С помощью мультиметров блока *P1* контролируются ток статорной обмотки и линейное напряжение испытуемого двигателя *M1*.

С помощью измерителя *P2* контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые одной фазой испытуемого двигателя *M1*.

1.1.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

− Переключатель режима работы выключателя *A6* установите в положение "РУЧН.".

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Активизируйте мультиметры блока *P1*, задействованные в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии фазных напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Переключателем в трехфазных трансформаторных группах *A2* и *A7* установите номинальное линейное напряжение 220 В.

− Осуществите пуск двигателя *M1* нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6*.

− Меняя положение регулировочных рукояток трехфазных трансформаторных групп *A2* и *A7*, варьируйте подводимое к двигателю *M1* линейное напряжение U_1 в диапазоне 100…250 В и заносите показания вольтметра *P1.1* (линейное напряжение U_1), амперметра *P1.2* (фазный ток I_{10} двигателя *M1*), а также ваттметра и варметра измерителя *P2* (активная P_{10} и реактивная Q_{10} мощности, потребляемые одной фазой двигателя *M1*) в табл. 1.1.2.

Таблица 1.1.2

U_1, В									
I_{10}, А									
P_{10}, Вт									
Q_{10}, ВАр									

− Отключите источник *G1*.

− Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− При необходимости большей вариативности значений напряжения U_1 повторите эксперимент при закороченном линейном реакторе *A14*.

1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ $I_{1K} = f(U_{1K})$, $P_{1K} = f(U_{1K})$, $\cos\varphi_K = f(U_{1K})$ ПРИ $n = 0$ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

1.2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ

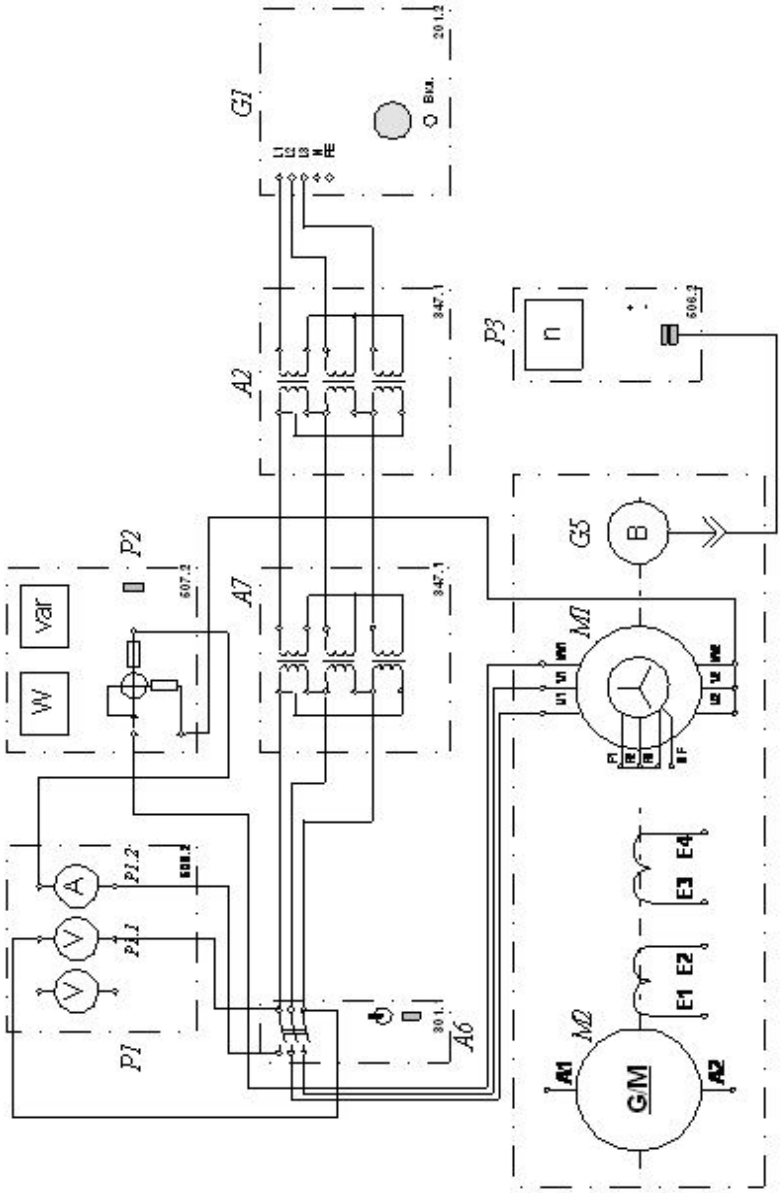


Рис. 1.2.1. Электрическая схема соединений для опыта короткого замыкания

1.2.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ (СМ. ТАБЛ. 1.1.1)

1.2.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G1* – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Преобразователь угловых перемещений *G5* генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P3* электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель *M1* получает питание через выключатель А6 и трехфазные трансформаторные группы *A2, A7* от трехфазного источника питания *G1*.

С помощью мультиметров блока *P1* контролируются фазный ток и линейное напряжение статорной обмотки испытуемого двигателя *M1*.

С помощью измерителя *P2* контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым двигателем *M1*.

1.2.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Снимите кожух, закрывающий муфту, соединяющую вал машины постоянного тока *M2* с валом двигателя *M1*, и закрепите на ней стопорное устройство.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

− Переключатель режима работы выключателя *A6* установите в положение "РУЧН.".

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Активизируйте мультиметры блока *P1*, задействованные в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− С помощью переключателей в трехфазных трансформаторных группах *A2* и *A7* установите пониженное напряжение на обмотке статора испытуемого двигателя *M1*.

− Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6* подключите двигатель *M1* к электрической сети.

− Быстро (менее чем за 10 с) считайте и занесите в табл. 1.2.1 показания вольтметра *P1.1* (линейное напряжение U_1 двигателя *M1*), амперметра *P1.2* (ток I_{1K} статорной обмотки двигателя *M1*), а также ваттметра измерителя *P2* (активная P_{1K} мощность, потребляемая одной фазой двигателя *M1*) и сразу после этого нажатием кнопки «ОТКЛ» выключателя *A6* отключите двигатель *M1* от электрической сети.

− Повторите необходимое количество раз процедуру подключения двигателя *M1* к электрической сети, считывания показаний измерительных приборов и отключения двигателя *M1* от электрической сети при различных более низких вторичных напряжениях трансформаторных групп *A2* и *A7*.

Таблица 1.2.1

U_{1K}, В										
I_{1K}, А										
P_{1K}, Вт										

− Отключите источник *G1*.

− Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− При необходимости большей вариативности значений линейного напряжения повторите эксперимент с соединением вторичных обмоток трансформаторов группы *A7* по схеме «звезда».

1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК $I_1 = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$, $s = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $\cos\varphi = f(P_2)$, $M_2 = f(P_2)$ ПРИ $U_1 = U_{1N}$, $f_1 = f_{1N}$ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

1.3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ

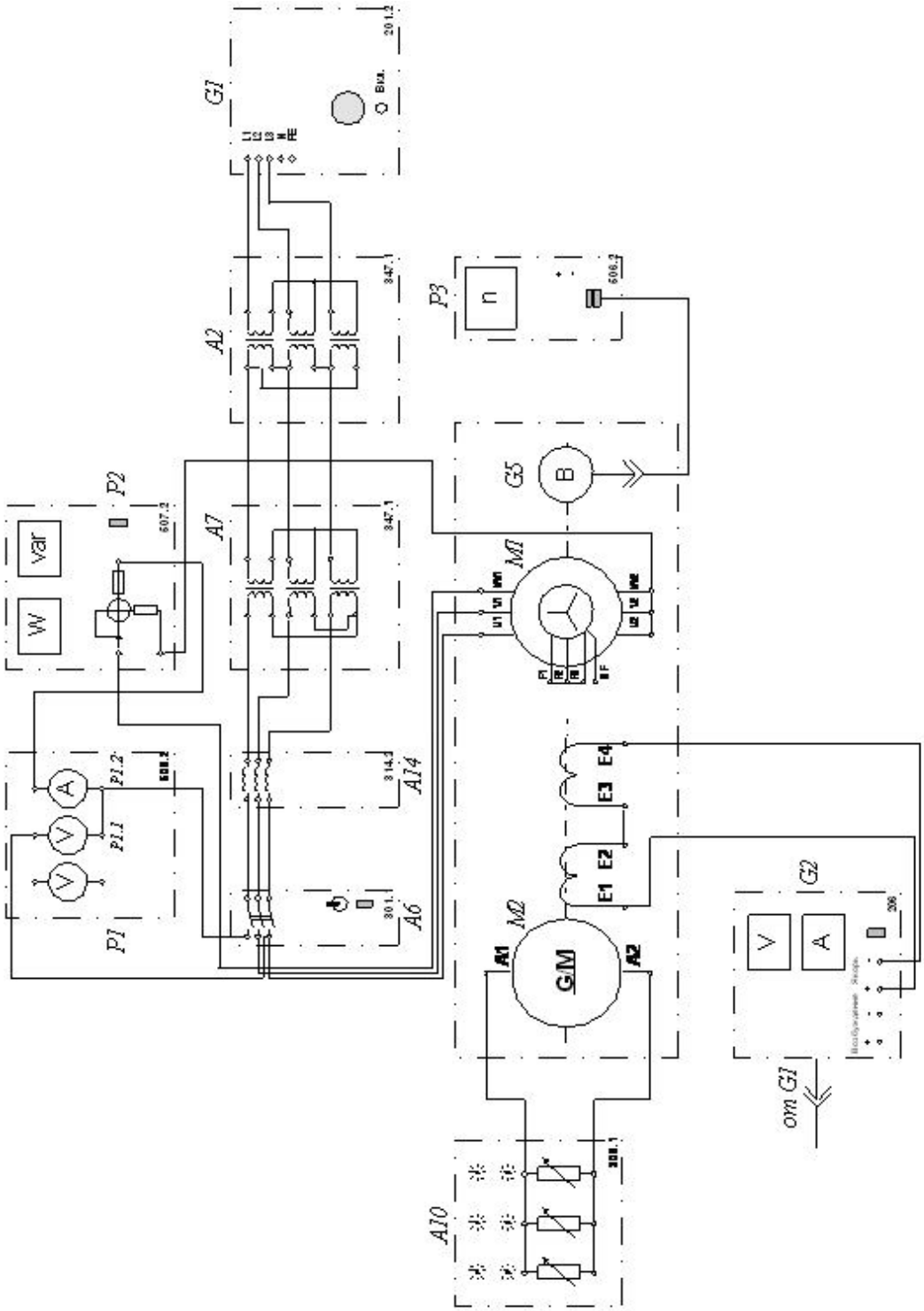


Рис. 1.3.1. Электрическая схема соединений для определения рабочих характеристик

1.3.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 1.3.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0…250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G4	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин
A2, A7	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В/242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
A10	Активная нагрузка	306.1	220 В / 3×0…50 Вт;
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≂ 0...1000 В / ≂ 0...10 А / 0…20 МОм
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

1.3.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G1* – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания *G2* двигателя постоянного тока используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока *G4*, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением и выступающей в качестве нагрузочной машины.

Преобразователь угловых перемещений *G5* генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P3* электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель *M1* получает питание через выключатель *A6,* трехфазные трансформаторные группы *A2*, *A7* и линейный реактор *A14* от трехфазного источника питания *G1*.

Блок *A10* используется для нагрузки генератора *G4*.

С помощью мультиметров блока *P1* контролируются ток и напряжение статорной обмотки испытуемого двигателя *M1*.

С помощью измерителя *P2* контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым двигателем *M1*.

1.3.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

− Переключатели режима работы источника *G2* и выключателя *A6* установите в положение "РУЧН.".

− Регулировочную рукоятку источника *G2* поверните до упора против часовой стрелки, а регулировочные рукоятки активной нагрузки *A10* – по часовой стрелке.

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Активизируйте мультиметры блока *P1*, задействованные в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Установите переключателем в трехфазных трансформаторных группах *A2, A7* такие напряжения вторичных обмоток трансформаторов, чтобы напряжение, измеренное вольтметром *P1.3*, было равно номинальному напряжению двигателя *M1*.

− Осуществите пуск двигателя *M1* нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6*.

− Нажмите кнопку "ВКЛ." источника *G2*.

− Вращая регулировочную рукоятку источника *G2*, изменяйте ток I_1 статорной обмотки двигателя *M1* и заносите показания амперметра *P1.2* (ток I_1), ваттметра и варметра измерителя мощностей *P2* (активная $P_{1ф}$ и реактивная $Q_{1ф}$ мощности фазы двигателя *M1*), указателя *P3* (частота вращения n двигателя *M1*) в табл. 1.3.2. Вольтметр *P1.1* указывает величину линейного напряжения обмотки статора.

Таблица 1.3.2

I_1, А										
$P_{1Ф}$, Вт										
$Q_{1ф}$, ВАр										
n, об/мин										

− По завершении эксперимента отключите выключатель *A6* и источник *G1*.

− Выключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

1.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ $n = f(M)$ ПРИ $U_1 < U_{1N}$, $f_1 = f_{1N}$ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

1.4.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ

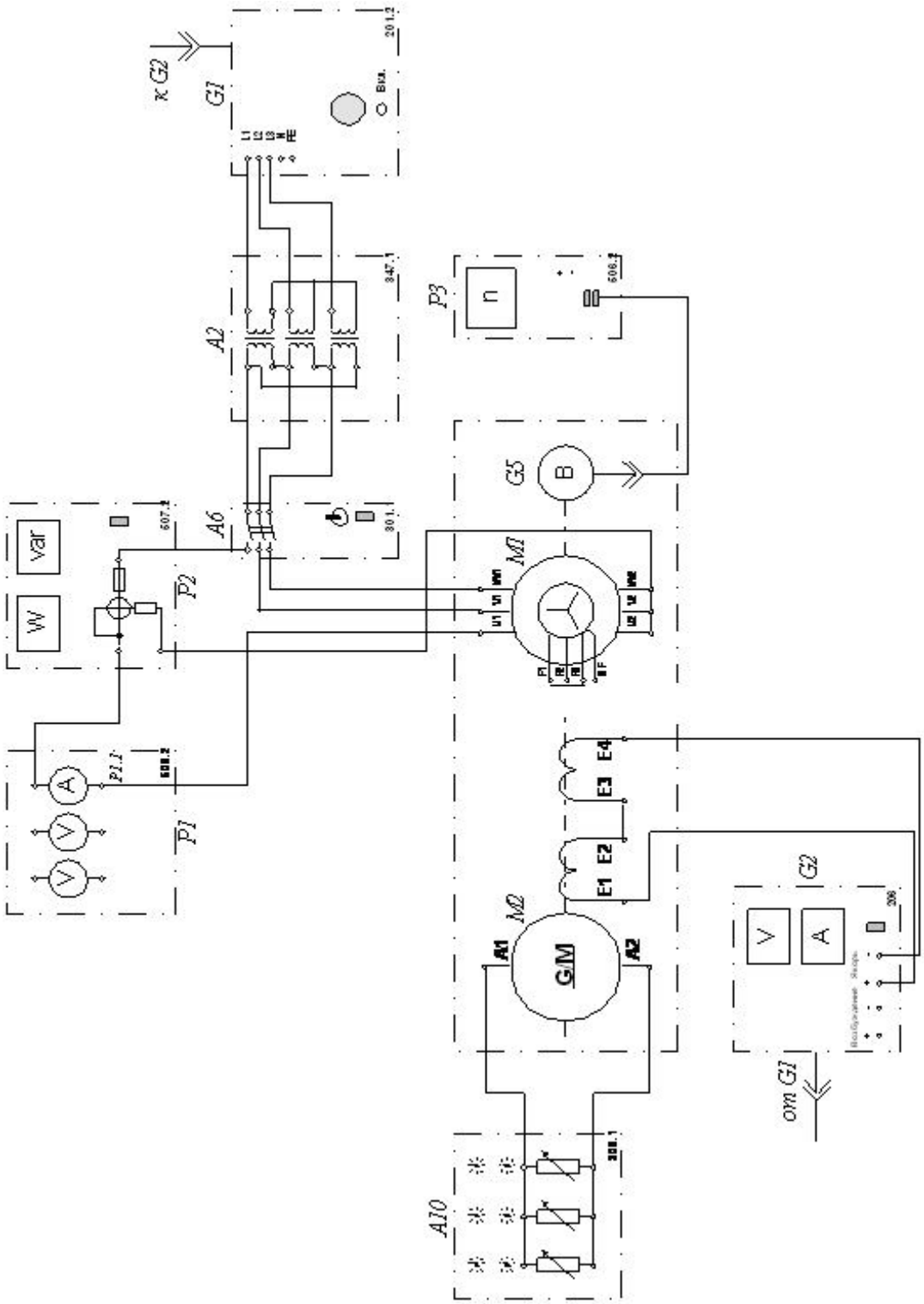


Рис 1.4.1. Электрическая схема соединений для определения искусственной механической характеристики

1.4.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 1.4.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0…250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G4	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500об/мин
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
A10	Активная нагрузка	306.1	220 В / 3×0…50 Вт;
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≂ 0...1000 В / ≂ 0...10 А / 0…20 МОм
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

1.4.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G1* – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания *G2* двигателя постоянного тока используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока *G4*, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением и выступающей в качестве нагрузочной машины.

Преобразователь угловых перемещений *G5* генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P3* электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель *M1* получает питание через выключатель А6 и трехфазную трансформаторную группу *A2* от трехфазного источника питания *G1*.

Блок А10 используется для нагрузки генератора *G4*.

С помощью мультиметра блока *P1* контролируется ток статорной обмотки испытуемого двигателя *M1*.

С помощью измерителя *P2* контролируются активная мощность, потребляемая испытуемым двигателем *M1*.

1.4.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

− Переключатели режима работы источника *G2* и выключателя *A6* установите в положение "РУЧН.".

− Регулировочную рукоятку источника *G2* поверните до упора против часовой стрелки, а регулировочные рукоятки активной нагрузки *A10* – по часовой стрелке.

− Установите переключателем в трехфазной трансформаторной группе *A2* номинальные напряжения вторичных обмоток трансформаторов 127 В.

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Активизируйте мультиметры блока *P1*, задействованные в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Осуществите пуск двигателя *M1* нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6*.

− Нажмите кнопку "ВКЛ." источника *G2*.

− Вращая регулировочную рукоятку источника *G2*, изменяйте ток I_1 статорной обмотки двигателя *M1* и заносите показания амперметра *P1.1* (ток I_1), ваттметра измерителя мощностей *P2* (активная мощность $P_{1Ф}$ фазы двигателя *M1*) и указателя *P3* (частота вращения n двигателя *M1*) в табл. 1.4.2.

Таблица 1.4.2

I_1, А									
$P_{1Ф}$, Вт									
n, об/мин									

− По завершении эксперимента отключите выключатель *A6* и источник *G1*.

− Выключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Повторите регистрацию данных при положении переключателя в трехфазной трансформаторной группе *A2* 133 В.

1.5. ОПЫТ «ИДЕАЛЬНОГО» ХОЛОСТОГО ХОДА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

1.5.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ

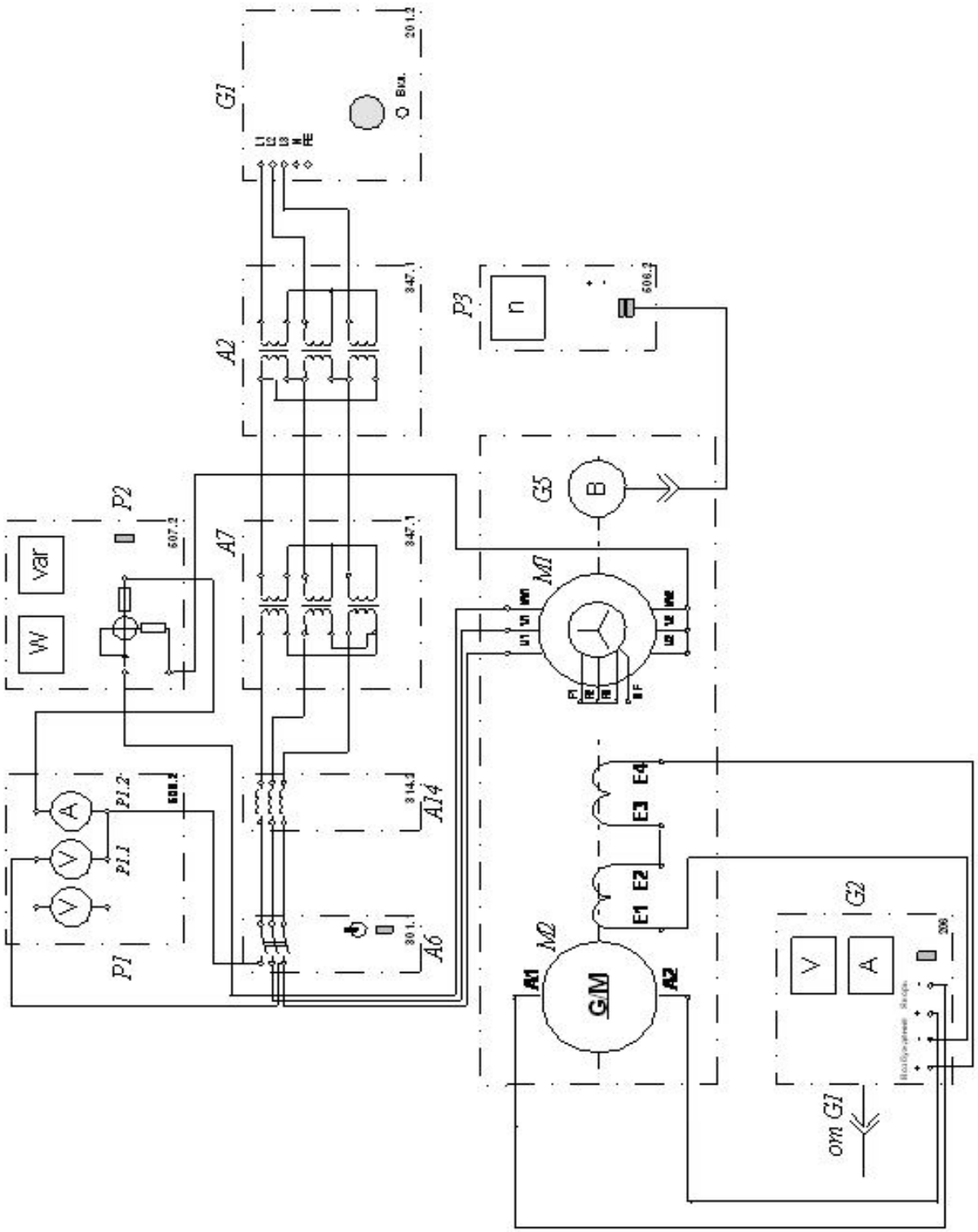


Рис. 1.5.1. Электрическая схема соединений для опыта «идеального» холостого хода

1.5.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 1.5.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0…250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G4	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≂ 0...1000 В / ≂ 0...10 А / 0…20 МОм
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

1.5.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G1* – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания *G2* двигателя постоянного тока используется для питания постоянным напряжением обмотки возбуждения и обмотки якоря машины постоянного тока *G4*, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением и выступающей в качестве гонного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений *G5* генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P3* электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель *M1* получает питание через выключатель *A6*, трехфазные трансформаторные группы *A2*, *A7* и линейный реактор *A14* от трехфазного источника питания *G1*.

С помощью мультиметров блока *P1* контролируются ток и напряжение статорной обмотки испытуемого двигателя *M1*.

С помощью измерителя *P2* контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым двигателем *M1*.

1.5.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

− Переключатели режима работы выключателя *A6* установите в положение "РУЧН.".

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Активизируйте мультиметры блока *P1*, задействованные в эксперименте.

− Переключатель режима работы источника *G2* установите в положение "РУЧН.".

− Регулировочные рукоятки источника *G2* поверните против часовой стрелки до упора.

− Включите источник *G1*. О наличии фазных напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Установите переключателем в трехфазных трансформаторных группах *A2*, *A7* такие напряжения вторичных обмоток трансформаторов, чтобы напряжение, измеренное вольтметром *P1.3*, было равно номинальному напряжению двигателя *M1*.

− Осуществите пуск двигателя *M1* нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6*.

− Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника *G2*.

− Вращая регулировочную рукоятку источника *G2*, разгоните двигатель *M2* (генератор *G6*) до частоты 1500 об/мин и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.

− Снимите и занесите показания вольтметра *P1.3* (линейное напряжение U_1), амперметра *P1.1* (фазный ток I_{10} двигателя *M1*), а также ваттметра и варметра измерителя *P2* (активная P_{10} и реактивная Q_{10} мощности, потребляемые одной фазой двигателя *M1*) в табл. 1.5.2.

Таблица 1.5.2

U_1, В	
I_{10}, А	
P_{10}, Вт	
Q_{10}, ВАр	

− По завершении эксперимента у источника *G2* поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ".

− Отключите источник *G1*.

− Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

1.6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Выполните эскизы продольного и поперечного сечения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Кратко опишите устройство, принцип действия двигателя. Приведите номинальные данные испытуемого двигателя и схемы испытаний.

Используя данные табл. 1.1.2, вычислите соответствующие напряжению U_1 полные активную P_0 и реактивную Q_0 мощности, потребляемые двигателем *M1*, значения коэффициента мощности, фазное напряжение U_{10} по формулам:

$$P_0 = 3P_{10}; \qquad (1.6.1)$$

$$Q_0 = 3Q_{10}; \qquad (1.6.2)$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}; \qquad (1.6.3)$$

$$U_{10} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \qquad (1.6.4)$$

и занесите их в табл. 1.6.1.

Таблица 1.6.1

U_{10}, В									
P_0, Вт									
Q_0, ВАр									
$\cos\varphi_0$									

Используя данные табл. 1.1.2 и 1.6.1, постройте в одной координатной сетке искомые характеристики холостого хода $I_{10} = f(U_{10})$, $P_{10} = f(U_{10})$, $\cos\varphi_0 = f(U_{10})$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и поясните их ход. В отчете приведите пример расчета при номинальном напряжении обмотки статора.

Используя данные таблицы 1.2.1, вычислите соответствующие напряжению U_1 значения фазного напряжения U_{1K}, коэффициента мощности $\cos\varphi_K$ по формулам

$$U_{1K} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}; \qquad (1.6.5)$$

$$\cos\varphi_K = \frac{P_{1K}}{U_{1K} \cdot I_{1K}}. \qquad (1.6.6).$$

Полученные результаты занесите в табл. 1.6.2.

Таблица 1.6.2

U_{1K}, В										
P_{1K}, Вт										
I_{1K}, А										
$\cos\varphi_K$										

Используя данные табл. 1.6.2, постройте в одной координатной сетке характеристики короткого замыкания $I_{1K} = f(U_{1K})$, $P_{1K} = f(U_{1K})$, $\cos\varphi_K = f(U_{1K})$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и поясните их ход. В отчете приведите пример расчета при номинальном токе обмотки статора.

Используя данные табл. 1.3.2, вычислите для асинхронного двигателя:

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

где n_1 – синхронная скорость вращения магнитного поля;

потребляемую активную электрическую мощность

$$P_1 = 3P_{1\Phi}; \qquad (1.6.7)$$

коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{P_{1\phi}}{\sqrt{P_{1\phi}^{\ 2} + Q_{1\phi}^{\ 2}}};$$

сумму потерь мощности в двигателе

$$\sum p = p_{мг} + p_{мех} + p_{эл1} + p_{эл2}, \qquad (1.6.8)$$

где $p_{мг}$ и $p_{мех}$ – магнитные и механические потери (приведены в таблице данных испытуемого двигателя), Вт;

$p_{эл1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$ – электрические потери в обмотке статора, Вт;

R_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора при рабочей температуре, Ом;

$p_{эл2} = (P_1 - p_{эл1} - p_{мг}) \cdot s$ – электрические потери в обмотке ротора, Вт;

отдаваемую (механическую) мощность

$$P_2 = P_1 - \sum p; \qquad (1.6.9)$$

коэффициент полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{\sum p}{P_1};$$

вращающий механический момент на валу двигателя

$$M_2 = \frac{30 \cdot P_2}{\pi \cdot n}. \qquad (1.6.10)$$

Результаты расчетов занесите в табл. 1.6.3, постройте рабочую характеристику двигателя и поясните ход графиков. Приведите пример расчета всех величин при номинальной нагрузке асинхронного двигателя.

Таблица 1.6.3

n, об/мин										
s, о. е.										
$\cos\varphi$										
P_1, Вт										
P_2, Вт										
I_1, А										
η, о. е.										
M_2, Нм										

Примерный вид рабочих характеристик асинхронного двигателя показан на рис. 1.6.1.

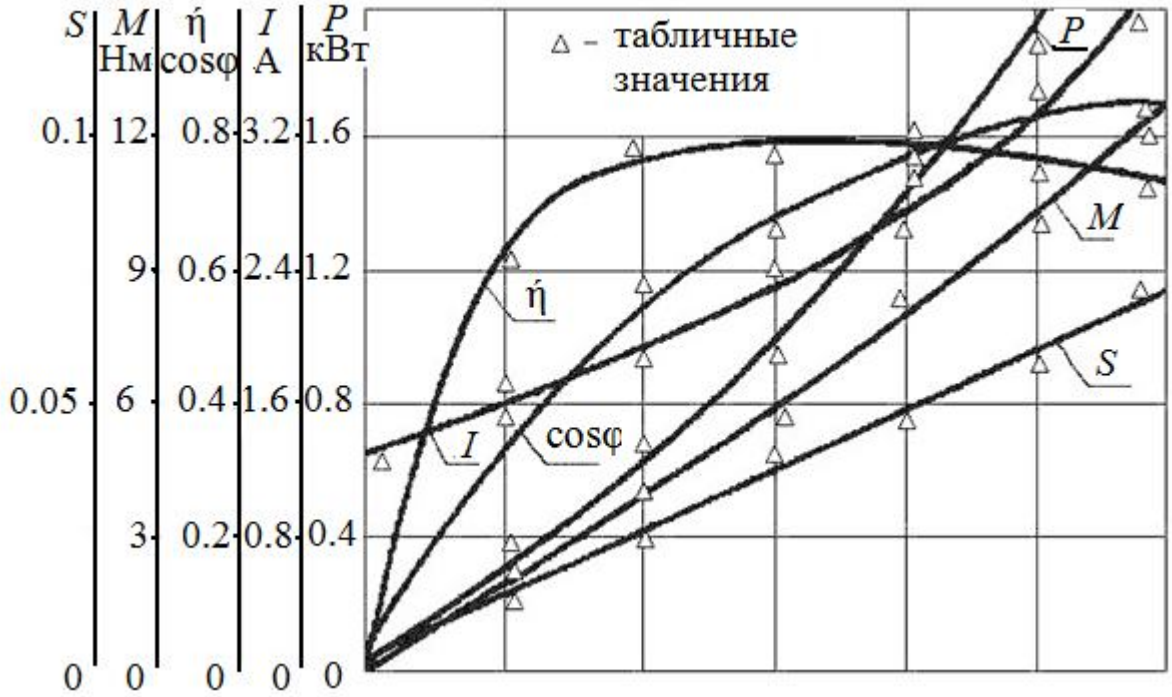


Рис. 1.6.1. Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью 1,5 кВт

Используя данные табл. 1.4.2 и выражения 6.7-6.10, вычислите для асинхронного двигателя вращающий механический момент на валу при пониженном напряжении. Результаты вычислений занесите в табл. 1.6.4.

Таблица 1.6.4

M_2, Н·м									
n, об/мин									

Используя данные табл. 1.6.3. и 1.6.4, постройте в одной координатной сетке искусственную и естественную механические характеристики $n = f(M)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

По данным табл. 1.6.2 при номинальном токе в обмотке статора вычислите:

– полное сопротивление короткого замыкания (входное сопротивление асинхронного двигателя при заторможенном роторе)

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}};$$

– индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора и приведенной обмотки ротора

$$X_{\sigma 1} \approx X'_{\sigma 2} \approx 0{,}5 \cdot Z_k \cdot \sin \varphi_k;$$

– активное сопротивление приведенной обмотки ротора

$$R_2^{!} \approx Z_k \cdot \cos \varphi_k - R_1;$$

– модуль комплексного множителя в Г-образной электрической схеме замещения двигателя

$$c_1 \approx 1 + \frac{Z_k}{2 \cdot Z_m};$$

– ток короткого замыкания при номинальном напряжении на обмотке статора (пусковой ток при прямом способе пуска асинхронного двигателя)

$$I_{1kN} = I_{1k} \cdot \frac{U_{1N}}{U_{1k}}.$$

Сравните и поясните различие в мощности, потребляемой двигателем из сети при «идеальном» и реальном холостом ходе и номинальном напряжении на обмотке статора.

По данным опыта идеального холостого хода вычислите:

– полное сопротивление намагничивающей ветви в электрической схеме замещения асинхронного двигателя (входное сопротивление двигателя при «идеальном» холостом ходе)

$$Z_m \approx \frac{U_1}{I_{10} \cdot \sqrt{3}};$$

– активную составляющую тока холостого хода

$$I_{0a} = I_{10} \cdot \cos \varphi_0;$$

– реактивную составляющую этого же тока (ток намагничивания)

$$I_{0\mu} = I_{10} \cdot \sin \varphi_0.$$

Рассчитайте рабочую характеристику по Г-образной электрической схеме замещения асинхронного двигателя. Для этого необходимо вычертить схему, а по данным опытов «идеального» холостого хода, короткого замыкания и номинальным данным двигателя составить таблицу исходных данных (табл. 1.6.5).

Таблица 1.6.5

Исходные данные

U_{1N}, В	c_1	R_1, Ом	$R_2^!$, Ом	$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}^!$, Ом	P_{1N} / I_{1N}^2, Вт/А	I_{0a}, А	$I_{0\mu}$, А	$p_{мг} + p_{мех}$, Вт

Задавшись несколькими величинами скольжения в диапазоне $(0{,}1 \ldots 1{,}2)s_N$, рассчитайте:

– полное сопротивление рабочей ветви Г- образной схемы замещения двигателя

$$Z = c_1\sqrt{\left(R_1 + \frac{c_1 R_2^1}{s}\right)^2 + \left(X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2}\right)^2};$$

– активную составляющую тока обмотки статора

$$I_{1a} = I_{0a} + \frac{U_{1N}}{c_1 \cdot Z^2} \cdot \left(R_1 + \frac{c_1 R_2^1}{s} \right);$$

– полный ток обмотки статора

$$I_1 = \sqrt{\left(I_{1a}\right)^2 + \left(I_{0\mu} + \frac{U_{1N}}{c_1 \cdot Z^2} \cdot \left(X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2}\right)\right)^2};$$

– коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{I_{1a}}{I_1};$$

– активную электрическую мощность, потребляемую двигателем из сети,

$$P_1 = 3 \cdot U_{1N} \cdot I_{1a};$$

– потери мощности в двигателе

$$\sum p = 3I_{10}^2 \cdot R_1 + 3c_1\left(\frac{U_{1N}}{Z}\right)^2\left(R_1 + c_1 R_2^1\right) + P_{мг} + P_{мех} + 0{,}005\frac{P_{1N}}{I_{1N}^2} \cdot I_1^2;$$

– полезную механическую мощность, развиваемую двигателем,

$$P_2 = P_1 - \sum p;$$

– коэффициент полезного действия

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

– частоту вращения ротора

$$n = n_1 \cdot (1 - s).$$

Результаты расчетов оформите в виде табл. 1.6.3. Постройте рабочую характеристику и сравните ее с характеристикой, определенной экспериментально. Приведите пример расчета всех величин при номинальном скольжении.

1.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните последовательность операций, выполняемых при прямом способе пуска в ход асинхронного двигателя.

2. Как изменить направление вращения асинхронного двигателя?

3. Как опытным путем определить рабочую характеристику асинхронного двигателя?

4. Поясните ход графиков рабочей характеристики.

5. Как опытным путем определить характеристики холостого хода асинхронного двигателя?

6. Поясните ход характеристик холостого хода двигателя.

7. Как опытным путем определить характеристики короткого замыкания асинхронного двигателя?

8. Поясните ход характеристик короткого замыкания двигателя.

9. Что называется скольжением асинхронной машины и как его определить опытным путем? В каких пределах изменяется скольжение асинхронного двигателя?

10. Как определить электрические потери в короткозамкнутой обмотке ротора?

11. Как определить КПД двигателя расчетным путем?

12. Опишите виды потерь мощности в асинхронном двигателе и поясните, как они зависят от нагрузки.

13. Вычертите Г-образную схему замещения асинхронного двигателя и поясните, как опытным путем определяются ее параметры.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы – получить практические навыки по эксплуатации, опытному и расчетному методам определения рабочих и механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором, а также по оценке его эксплуатационных свойств.

Программа работы

1. Изучить устройство и элементы конструкции двигателя.
2. Определить экспериментально механические (естественную и искусственную с введенным в цепь ротора добавочным сопротивлением) характеристики двигателя.
3. Выполнить опыт холостого хода.
4. Выполнить опыт короткого замыкания.
5. Определить рабочую и механическую характеристики расчетным путем по круговой диаграмме.

Паспортные данные испытуемого двигателя

Номинальная потребляемая активная мощность P_{1N} = 98 Вт

Номинальная полезная механическая мощность P_{2N} = 35 Вт

Номинальное напряжение U_{1N} = 220 В

Номинальный ток обмотки статора I_{1N} = 0,35 А

Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_N$ = 0,73

Номинальный коэффициент полезного действия η = 0,36

Число пар полюсов p = 2

Механические потери $p_{мех}$ = 20 Вт

Магнитные потери $p_{мг}$ = 33 Вт

Активное сопротивление фазы обмотки статора R_1 = 22,2 Ом

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ $n = f(M)$ ПРИ $U_1 = U_{1N}$, $f_1 = f_{1N}$ И ИСКУССТВЕННОЙ $n = f(M)$ ПРИ $R_{доб} \neq 0$, $U_1 = U_{1N}$, $f_1 = f_{1N}$ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

2.1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

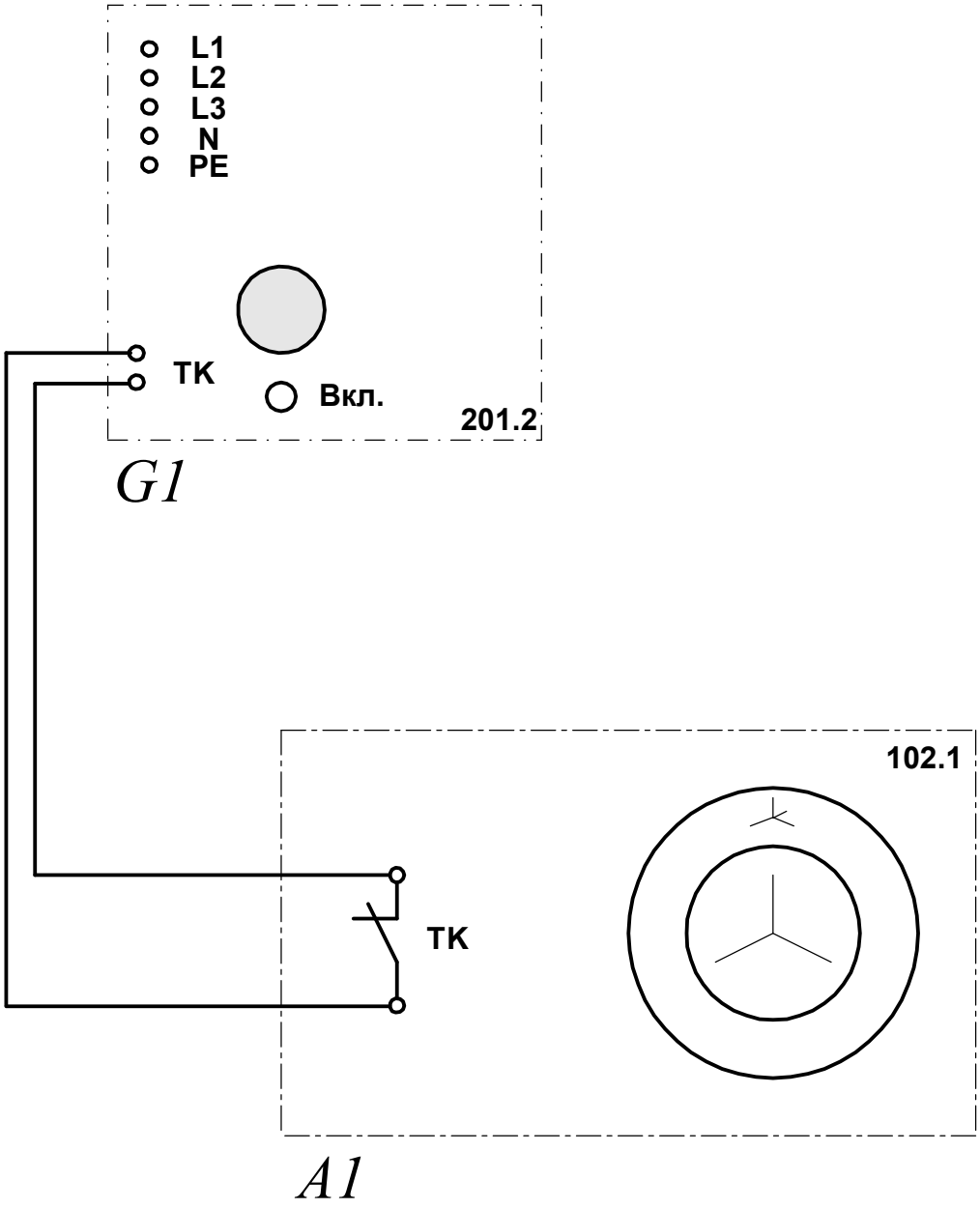


Рис. 2.1.1. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

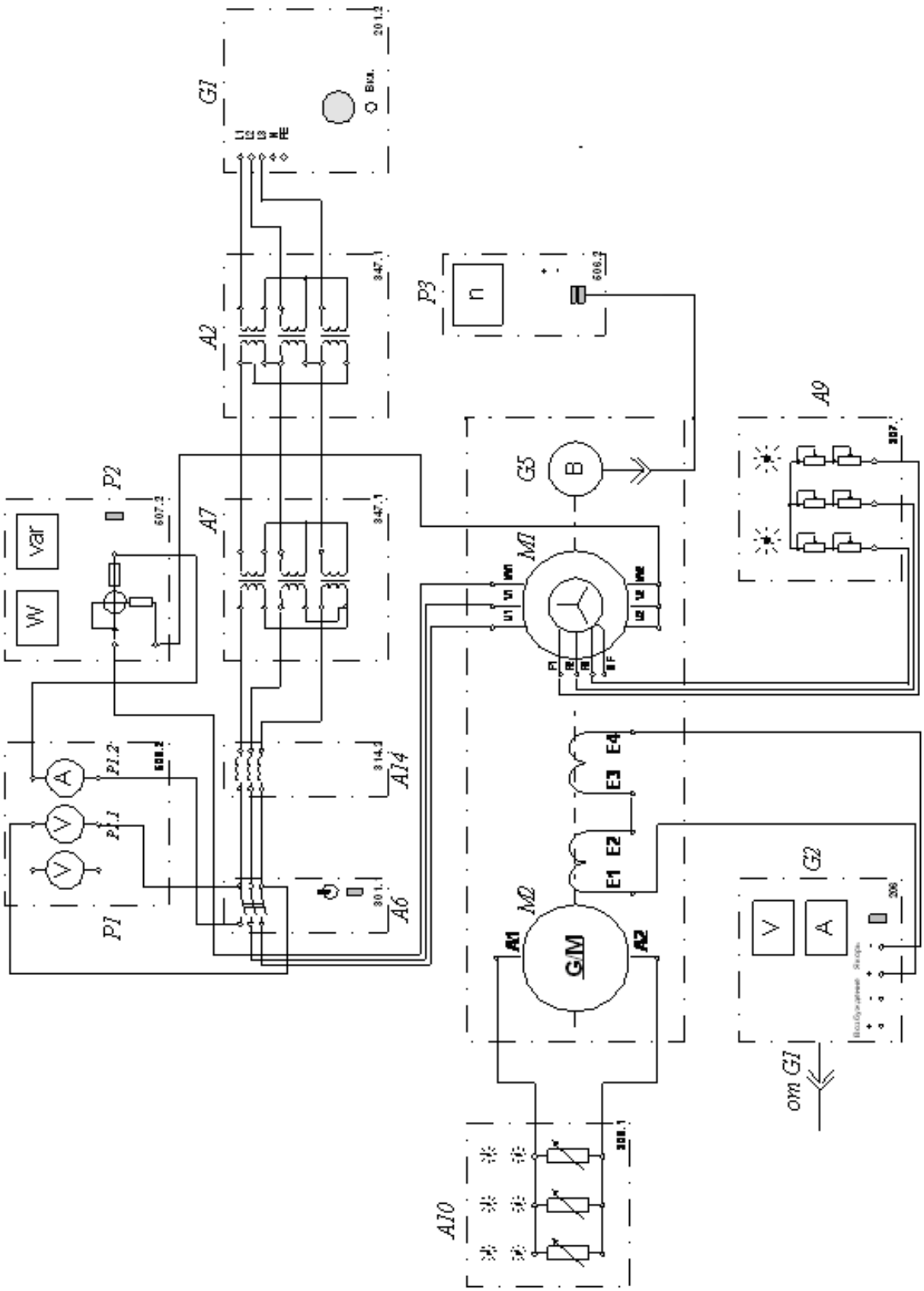


Рис. 2.1.2. Электрическая схема соединений для определения механических характеристик

2.1.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 2.1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0…250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G4	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин
A2, A7	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
A9	Реостат для цепи ротора машины переменного тока	307.1	3 × 0…40 Ом / 1 А
A10	Активная нагрузка	306.1	220 В / 3×0…50 Вт
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ⩘ 0...1000 В / ⩘ 0...10 А / 0…20 Мом
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

2.1.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G1* – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания *G2* двигателя постоянного тока используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока *G4*, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением и выступающей в качестве нагрузочной машины.

Преобразователь угловых перемещений *G5* генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P3* электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель *M1* получает питание через выключатель *A6* и трехфазные трансформаторные группы *A2*, *A7* от трехфазного источника питания *G1*.

Реостат *A9* служит для вывода энергии скольжения при испытании двигателя *M1* с фазным ротором.

Активная нагрузка *A10* используется для нагружения генератора *G4*.

С помощью мультиметра блока *P1* контролируется ток статорной обмотки и линейное напряжение испытуемого двигателя *M1*.

С помощью измерителя *P2* контролируются активная мощность, потребляемая испытуемым двигателем *M1*.

2.1.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

− Переключатели режима работы источника *G2* и выключателя *A6* установите в положение "РУЧН.".

− Регулировочные рукоятки реостата *A9* поверните против часовой стрелки до упора.

− Регулировочную рукоятку источника *G2* поверните до упора против часовой стрелки, а регулировочные рукоятки активной нагрузки *A10* – по часовой стрелке.

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Активизируйте мультиметры блока *P1*, задействованные в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Установите переключателем в трехфазных трансформаторных группах *A2*, *A7* такие напряжения вторичных обмоток трансформаторов, чтобы напряжение, измеренное вольтметром *P1.3*, было равно номинальному напряжению двигателя *M1*.

− Осуществите пуск двигателя *M1* нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6*.

− Нажмите кнопку "ВКЛ." источника *G2*.

− Вращая регулировочную рукоятку источника *G2* , изменяйте ток I_1 статорной обмотки двигателя *M1* и заносите показания амперметра *P1.1* (ток I_1), ваттметра измерителя мощностей *P2* (активная мощность $P_{1ф}$ фазы двигателя *M1*) и указателя *P3* (частота вращения n двигателя *M1*) в табл. 2.1.2, определяя естественную механическую характеристику.

Таблица 2.1.2

I_1, А								
$P_{1Ф}$, Вт								
n, об/мин								

Регулировочную рукоятку источника *G2* поверните до упора против часовой стрелки.

− Установите суммарное сопротивление каждой фазы реостата *A9* 20 Ом.

− Вращая регулировочную рукоятку источника *G2*, изменяйте ток I_1 статорной обмотки двигателя *M1* и заносите показания амперметра *P1.1* (ток I_1), ваттметра измерителя мощностей *P2* (активная мощность $P_{1ф}$ фазы двигателя *M1*) и указателя *P3* (частота вращения n двигателя *M1*) в табл. 2.1.3, определяя искусственную механическую характеристику.

Таблица 2.1.3

I_1, А									
$P_{1Ф}$, Вт									
n, об/мин									

Снимите искусственную характеристику при суммарном сопротивлении каждой фазы реостата *A9* 40 Ом.

– По завершении эксперимента отключите выключатель *A6* и источник *G1*.

2.2. ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

2.2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ

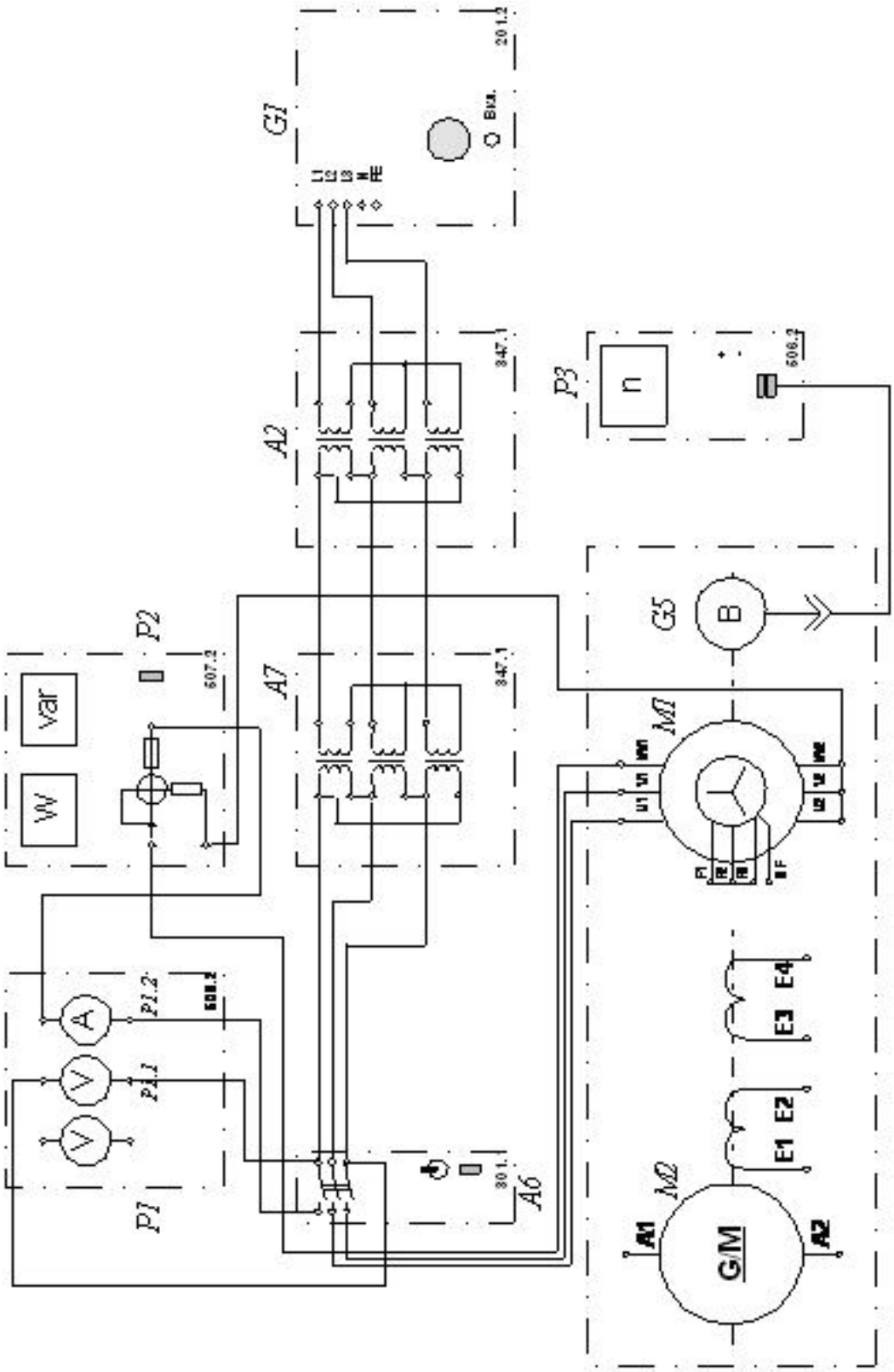


Рис. 2.2.1. Электрическая схема соединений для опыта короткого замыкания

2.2.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 2.2.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин
M2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
A2,A7	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≂ 0...1000 В / ≂ 0...10 А / 0…20 Мом
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

2.2.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G1* – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Преобразователь угловых перемещений *G5* генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P3* электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель *M1* получает питание через выключатель А6 и трехфазные трансформаторные группы *A2*, *A7* от трехфазного источника питания *G1*.

С помощью мультиметров блока *P1* контролируются ток и напряжение статорной обмотки испытуемого двигателя *M1*.

С помощью измерителя *P2* контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым двигателем *M1*.

2.2.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Снимите кожух, закрывающий муфту, соединяющую вал машины постоянного тока *M2* с валом двигателя *M1*, и закрепите на ней стопорное устройство.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

− Переключатель режима работы выключателя *A6* установите в положение "РУЧН.".

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Активизируйте мультиметры блока *P1*, задействованные в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6* подключите двигатель *M1* к электрической сети.

− Быстро (менее чем за 10 с) в трехфазных трансформаторных группах *A2* и *A7* переключателем установите номинальные вторичные напряжения трансформаторов такими, чтобы ток обмотки статора (амперметр *P1.2*) был равен номинальному (см. паспортные данные). Считайте и занесите в табл. 2.2.2 показания вольтметра *P1.1* (линейное напряжение U_1 двигателя *M1*), амперметра *P1.2* (ток I_{1K} статорной обмотки двигателя *M1*), а также ваттметра измерителя *P2* (активная P_{1K} мощность, потребляемая одной фазой двигателя *M1*) и сразу после этого нажатием кнопки «ОТКЛ» выключателя *A6* отключите двигатель *M1* от электрической сети.

Таблица 2.2.2

U_{1K}, В	
I_{1K}, А	
P_{1K}, Вт	

− Отключите источник *G1*.

− Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

2.3. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

2.3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ

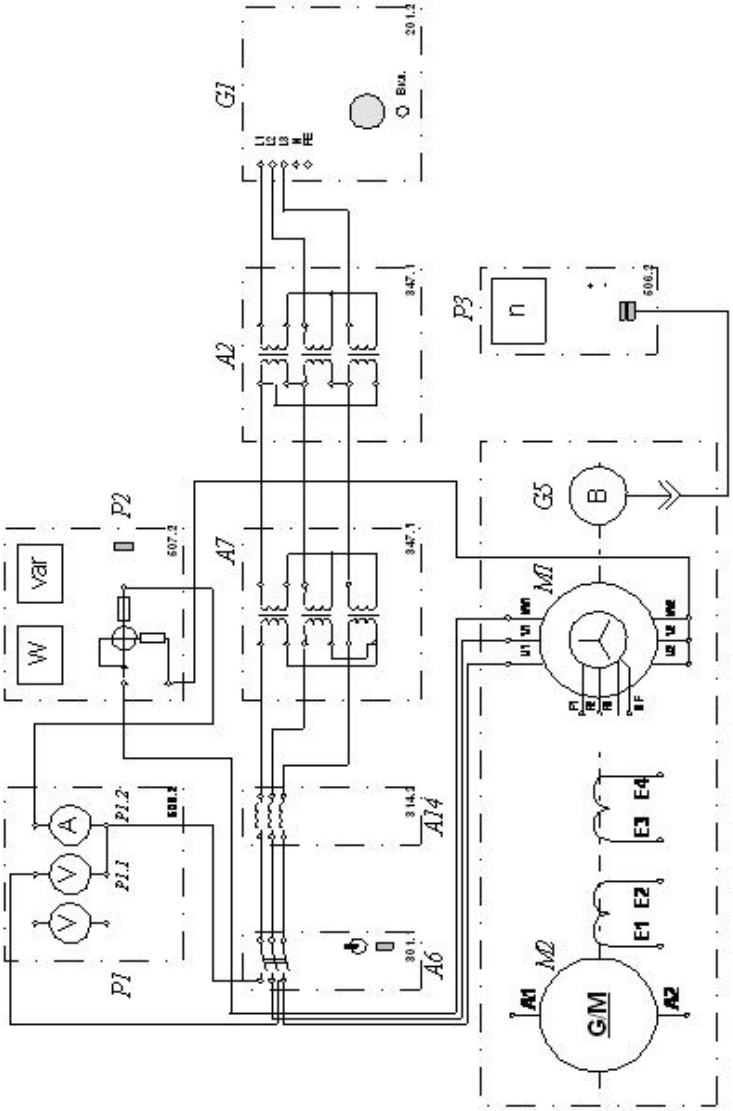


Рис. 2.3.1. Электрическая схема соединений для опыта холостого хода

2.3.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 2.3.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин
M2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ⎓ 0...1000 В / ⎓ 0...10 А / 0…20 Мом
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

2.3.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G1* – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Преобразователь угловых перемещений *G5* генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P3* электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель *M1* получает питание через выключатель *A6* и трехфазную трансформаторную группу *A2*, *A7* от трехфазного источника питания *G1*.

С помощью мультиметров блока *P1* контролируются ток статорной обмотки и линейное напряжение испытуемого двигателя *M1*.

С помощью измерителя *P2* контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые одной фазой испытуемого двигателя *M1*.

2.3.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

− Переключатели трансформаторных групп *A2*, *A7* установите в положение 220В.

− Переключатель режима работы выключателя *A6* установите в положение "РУЧН.".

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Активизируйте мультиметры блока *P1*, задействованные в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии фазных напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Подайте напряжение на двигатель *M1* нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6*.

− Меняя положение регулировочных рукояток трехфазных трансформаторных групп *A2*, *A7*, установите подводимое к двигателю *M1* линейное напряжение U_1 равным номинальному (см. паспортные данные). Занесите показания вольтметра *P1.1* (линейное напряжение

U_1), амперметра *P1.2* (фазный ток I_{10} двигателя *M1*), а также ваттметра и варметра измерителя *P2* (активная P_{10} и реактивная Q_{10} мощности, потребляемые одной фазой двигателя *M1*) в табл. 2.3.2.

Таблица 2.3.2

U_1, В	
I_{10}, А	
P_{10}, Вт	
Q_{10}, ВАр	

– Отключите источник *G1*.

– Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

2.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Выполните эскизы продольного и поперечного сечений асинхронного двигателя с фазным ротором. Кратко опишите принцип действия двигателя, а также результаты его внешнего осмотра. Приведите номинальные данные исследуемого двигателя и электрические схемы испытаний.

Используя опытные данные (табл. 2.1.2, 2.1.3),

– рассчитайте скольжение $s = \dfrac{n_1 - n}{n_1}$;

– потребляемую активную электрическую мощность

$$P_1 = 3P_{1Ф};$$

– сумму потерь мощности в двигателе

$$\sum p = p_{мг} + p_{мех} + p_{эл1} + p_{эл2},$$

где $p_{мг}$ и $p_{мех}$ – магнитные и механические потери (приведены в таблице данных испытуемого двигателя), Вт;

$p_{эл1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$ – электрические потери в обмотке статора, Вт;

R_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора при рабочей температуре, Ом;

$p_{эл2} = (P_1 - p_{эл1} - p_{мг}) \cdot s$ – электрические потери в обмотке ротора, Вт;

– отдаваемую (механическую) мощность

$$P_2 = P_1 - \sum p;$$

– вращающий механический момент на валу двигателя

$$M_2 = \frac{30 \cdot P_2}{\pi \cdot n}.$$

Результаты вычислений занесите в табл. 2.4.1, 2.4.2, постройте в одной координатной сетке естественную и искусственные механические характеристики двигателя и поясните ход графиков.

Таблица 2.4.1

Естественная механическая характеристика

M_2, Н·м									
n, об/мин									

Таблица 2.4.2

Искусственная механическая характеристика

M_2, Н·м									
n, об/мин									

Приведите пример расчета всех величин при номинальной нагрузке двигателя.

Используя данные опыта холостого хода (табл. 2.3.2), рассчитайте соответствующие напряжению U_1 полные активную P_0 и реактивную Q_0 мощности, потребляемые двигателем *M1*, значения коэффициента мощности, фазное напряжение U_{10}.

$$P_0 = 3P_{10};$$

$$Q_0 = 3Q_{10};$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}};$$

$$U_{10} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}.$$

Результаты расчетов занесите в табл. 2.4.3.

Таблица 2.4.3

U_{10}, В	
P_0, Вт	
Q_0, ВАр	
$\cos\varphi_0$	

Используя данные опыта короткого замыкания (табл. 2.2.2), рассчитайте соответствующие напряжению U_1 значения фазного напряжения U_{1K}, коэффициента мощности $\cos\varphi_K$:

$$U_{1K} = \frac{U_1}{\sqrt{3}};$$

$$\cos\varphi_K = \frac{P_{1K}}{U_{1K} \cdot I_{1K}}.$$

Полученные результаты занесите в табл. 2.4.4.

Таблица 2.4.4

U_{1K}, В	
P_{1K}, Вт	
I_{1K}, А	
$\cos\varphi_K$	

Рассчитайте ток короткого замыкания

$$I_{1kN} = I_{1k} \cdot \frac{U_{1N}}{U_{1k}}$$

и потребляемую из сети активную мощность при номинальном напряжении на обмотке статора

$$P_{1kN} = 3P_{1k}\left(\frac{U_{1N}}{U_{1k}}\right)^2.$$

Расчет рабочей и механической характеристик двигателя по круговой диаграмме

Круговую диаграмму постройте по данным опытов холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя в следующем порядке.

Выберите масштаб тока $\left[\frac{A}{мм}\right]$,

$$m_1 = \frac{I_{1kN}}{O_1K},$$

где отрезок O_1K следует взять не менее 200-250 мм.

Вычислите масштаб мощности $\left[\frac{вт}{мм}\right]$, $m_p = 3 \cdot U_{1N} \cdot m_1$ и момента $\left[\frac{н \cdot м}{мм}\right]$, $m_M = \frac{30 \cdot m_p}{\pi \cdot n_1}$.

Из произвольно взятой точки *O1* постройте оси координат и направьте вектор номинального фазного напряжения обмотки статора по оси ординат вверх.

Постройте вектор тока и определите точку *O* (*s*=0) идеального холостого хода двигателя. Для этого на высоте отрезка, равного P_0 / m_p, следует провести горизонтальную прямую и засечь ее из начала осей координат радиусом $O_1O = I_{10} / m_I$.

Постройте вектор тока и определите точку *K* (*s*=l) короткого замыкания двигателя при номинальном напряжении на обмотке статора. Для этого на высоте отрезка, равного P_{1KN} / m_p, следует провести горизонтальную прямую и засечь ее из начала координат радиусом $O_1K = I_{1KN} / m_I$.

Соедините полученные точки отрезком *OK*, из середины которого восстановите перпендикуляр до пересечения его с прямой, проведенной через точку *O* параллельно оси абсцисс, в точке O_k.

Через точки O и K постройте окружность с центром в точке O_k – геометрическое место конца вектора тока рабочей ветви Г-образной схемы замещения асинхронной машины.

Так как двигательному режиму работы соответствует дуга окружности на участке от точки K (s =l) до точки O (s =0), то участок окружности, лежащей ниже оси абсцисс, можно не строить.

Из точки O под углом a к диаметру OD, проведенному параллельно оси абсцисс, проведите прямую до пересечения ее с окружностью в точке $H(s = \pm\infty)$,

$$\alpha = arctg \frac{OD \cdot m_1 \cdot R_1}{U_{1N}},$$

где R_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора при рабочей температуре.

Определите точку реального холостого хода P, для чего на высоте отрезка, равного $P_{10} + p_{мех} / m_p$, проведите горизонтальную прямую до пересечения с окружностью вблизи точки O.

Обозначьте полученные в результате построений линии отсчета:

O_1E – линия подведенной мощности (ось абсцисс);

OH – линия электромагнитной мощности и электромагнитного момента;

OK – линия полной механической мощности;

PK – линия полезной механической мощности и вращающего механического момента.

Постройте шкалу скольжения в следующем порядке. Из точки L, взятой на линии OH, провести прямую, перпендикулярную радиусу O_kH, и продолжить ее до пересечения в точке Q с прямой, построенной из точки $H(s = \pm\infty)$ через точку K ($s = 1$). На отрезок LQ нанести шкалу скольжения, приняв во внимание, что в точке L скольжение $s = 0$, а в точке Q скольжение $s = 1$. Для более точного определения скольжений, соответствующих работе асинхронного двигателя при нагрузках меньше номинальной, точку L следует взять на таком удалении от точки H, чтобы длина отрезка LQ была не менее 200-250 мм.

Построить шкалу коэффициента мощности $\cos\varphi$. Для этого провести из точки O_1 как из центра радиусом, равным 100 мм, окружность (достаточно построить дугу окружности в первом квадранте) и построить на оси ординат шкалу $\cos\varphi$, приняв точку пересечения этой оси с указанной окружностью за $\cos\varphi = 1$.

Определить на круговой диаграмме точку A_N, соответствующую работе двигателя при номинальной нагрузке. Для этого отложить от линии полезной мощности *PK* перпендикулярно диаметру *OD* (ближе к точке *O*) отрезок $P_1A_N = P_{2N}/m_p$ так, чтобы точка A_N оказалась на окружности. Построить вектор тока рабочей ветви Г-образной схемы замещения асинхронной машины OA_N и вектор тока обмотки статора O_1A_N.

Продолжить отрезок P_1A_N до линии подведенной мощности и определить точки пересечения E_1, H_1 и K_1 с линиями подведенной, электромагнитной и полной механической мощности соответственно.

Определить по круговой диаграмме величины, характеризующие работу двигателя в номинальном нагрузочном режиме:

ток в обмотке статора $I_{1N} = O_1A_N \cdot m_I$;

потребляемую активную мощность $P_{1N} = E_1A_N \cdot m_P$;

коэффициент полезного действия $\eta_N = P_1A_N / E_1A_N$;

вращающий механический момент $M_{2N} = P_1A_N \cdot m_M$;

скольжение s_N по шкале скольжения в точке пересечения ее с отрезком A_NH;

частоту вращения $n_N = n_1(1 - s_N)$;

коэффициент мощности $\cos\varphi_N$ по проекции точки пересечения окружности радиусом 100 мм с вектором тока обмотки статора или его продолжением на шкалу коэффициента мощности.

Задавшись несколькими величинами полезной механической мощности в диапазоне $(0{,}25 \ldots 1{,}25)P_{2N}$, определить на круговой диаграмме соответствующие им точки. Для этого отрезок P_1A_N разделить на четыре части. Через точки деления провести прямые, параллельные линии по-

лезной мощности *PK*, до пересечения их с окружностью (ближе к точке *O*). Точку на круговой диаграмме, соответствующую работе двигателя при нагрузке $1{,}25\,P_{2N}$, предлагается определить самостоятельно.

Для каждой точки на окружности строить перпендикуляр к диаметру *OD*, определять отрезки и рассчитывать соответствующие величины аналогично рассмотренному выше.

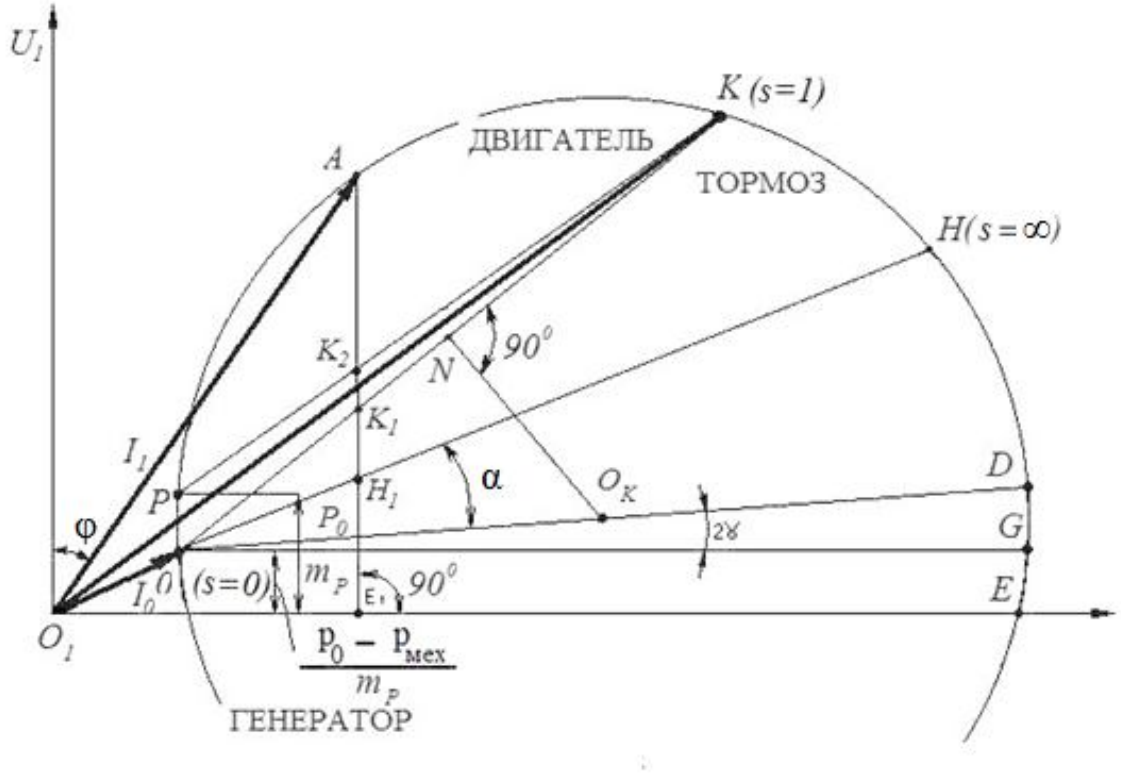


Рис. 2.4.1. Круговая диаграмма

Результаты расчетов оформить в виде табл. 2.4.5.

Таблица 2.4.5

n, об/мин										
s, о. е.										
$\cos\varphi$										
P_1, Вт										
P_2, Вт										
I_1, А										
η, о. е.										
M_2, Нм										

Построить в одной координатной сетке рабочие характеристики двигателя $I_1 = f(P_2)$, $s = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $\cos\varphi = f(P_2)$, $M_2 = f(P_2)$ при $U_1 = U_{1N}$, $f_1 = f_{1N}$. Построить механическую характеристику и сравнить ее с характеристикой, полученной из опыта методом непосредственной нагрузки двигателя. Привести пример расчета всех величин, характеризующий работу двигателя при нагрузке $1{,}25\,P_{2N}$.

2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите устройство и элементы конструкции асинхронного двигателя с фазным ротором, преимущества и недостатки этих двигателей в сравнении с двигателями с короткозамкнутым ротором.

2. Поясните принцип действия двигателя.

3. Поясните последовательность операций, выполняемых при реостатном пуске двигателя с фазным ротором.

4. Как опытным путем определить рабочую характеристику асинхронного двигателя? Поясните ход графиков рабочей характеристики.

5. Опишите порядок проведения опытов холостого хода и короткого замыкания двигателя с фазным ротором. В чем состоит практическая ценность этих опытов?

6. Как опытным путем определить скольжение двигателя с фазным ротором? Почему оно изменяется при изменении нагрузочного момента?

7. Опишите порядок построения круговой диаграммы.

8. Как по круговой диаграмме определить рабочую характеристику двигателя?

9. Определите из круговой диаграммы перегрузочную способность двигателя.

10. Определите из круговой диаграммы кратность пускового момента и пускового тока.

11. Какое скольжение называется критическим и как его определить из круговой диаграммы?

12. Как изменяются скольжение, частота вращения и КПД двигателя с фазным ротором при введении в цепь ротора добавочного сопротивления?

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы – овладение практическими навыками экспериментального определения пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и оценки потребительских свойств этого двигателя.

Программа работы

1. Изучить устройство и элементы конструкции двигателя.
2. Осуществить прямой, реакторный пуск и пуск при пониженном напряжении двигателя на холостом ходу.
3. Осуществить прямой, реакторный пуск и пуск при пониженном напряжении двигателя при нагрузке на валу.
4. Обработать и проанализировать экспериментальные данные.

Паспортные данные испытуемого двигателя

Номинальная потребляемая активная мощность P_{1N} = 98 Вт

Номинальная полезная механическая мощность P_{2N} = 35 Вт

Номинальное напряжение U_{1N} = 220 В

Номинальный ток обмотки статора I_{1N} = 0,35 А

Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_N$ = 0,73

Номинальный коэффициент полезного действия η = 0,36

Число пар полюсов p = 2

Механические потери $p_{мех}$ = 20 Вт

Магнитные потери $p_{мг}$ = 33 Вт

Активное сопротивление фазы обмотки статора R_1 = 22,2 Ом

3.1. ПУСК В ХОД ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ С РЕГИСТРАЦИЕЙ И ОТОБРАЖЕНИЕМ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КОМПЬЮТЕРЕ (ПРЯМОЙ, РЕАКТОРНЫЙ, ПРИ ПОНИЖЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ)

3.1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

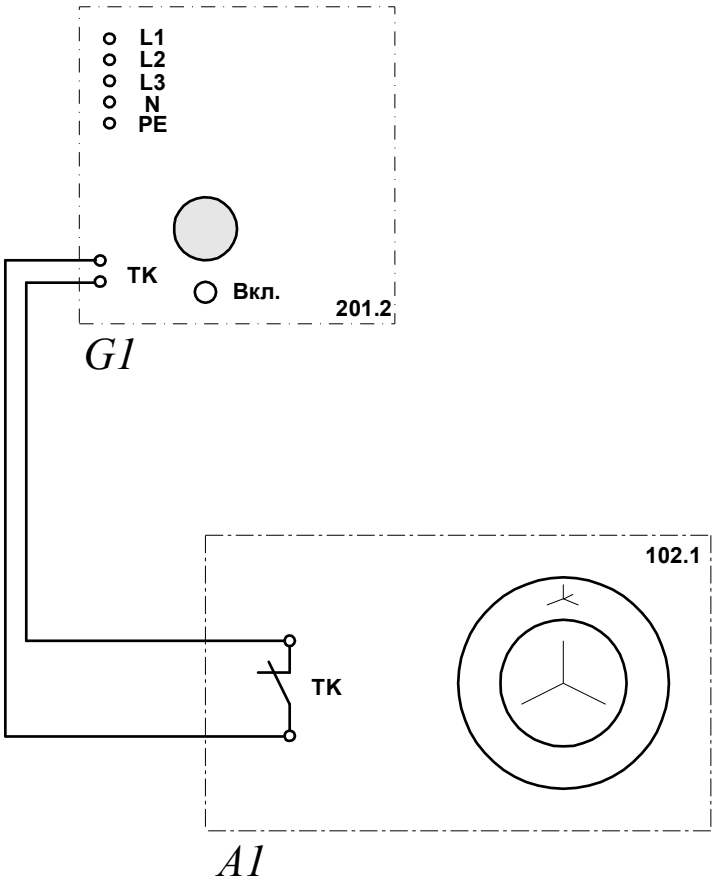


Рис. 3.1.1. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

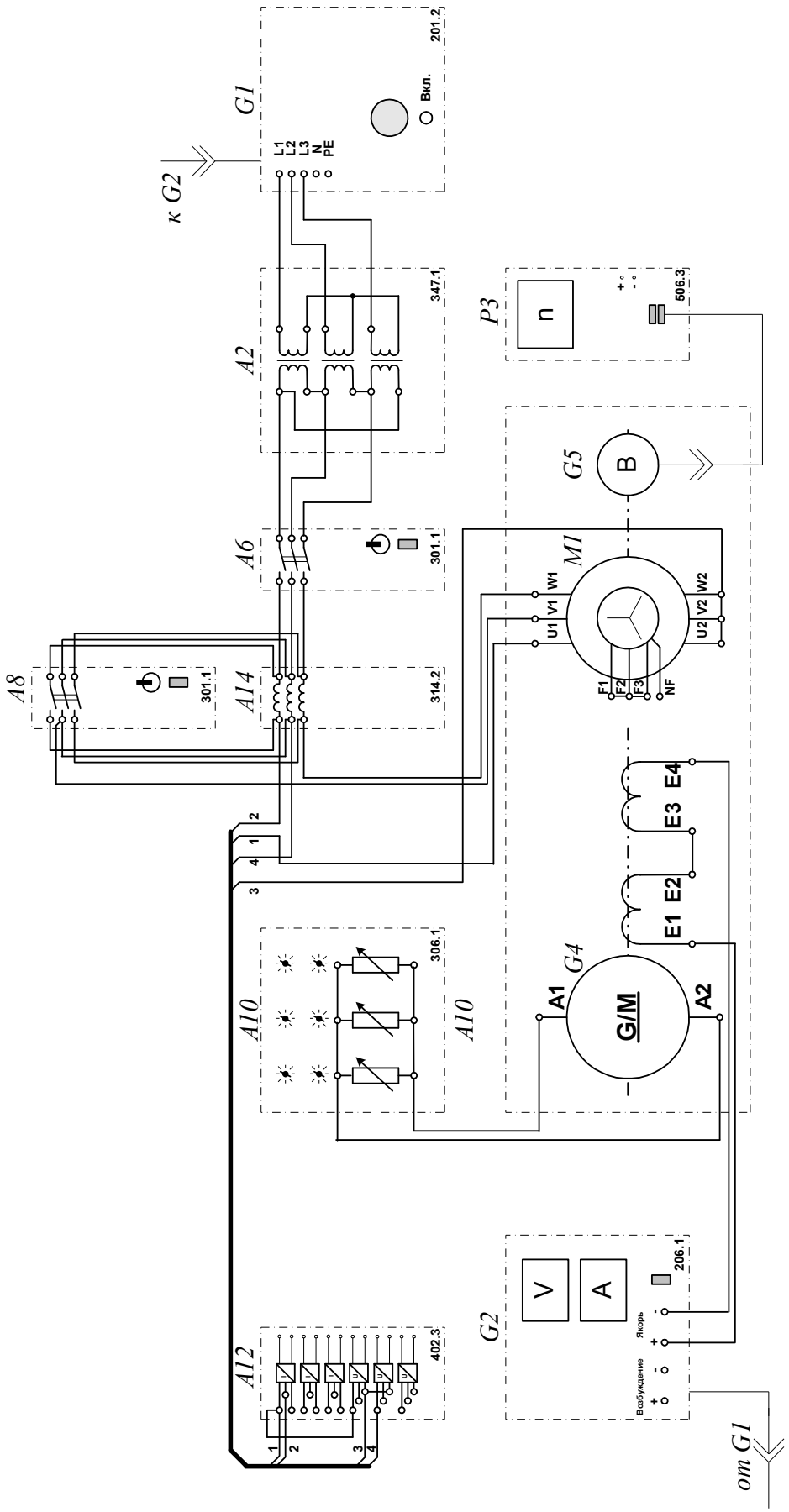
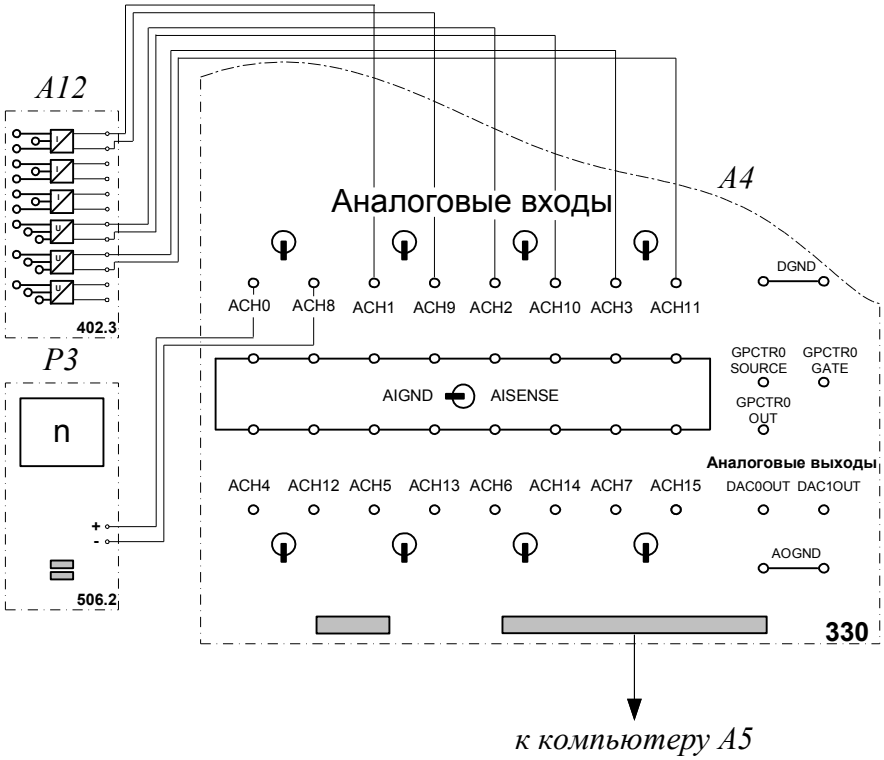


Рис. 3.1.2. Электрическая схема соединений при пуске



Окончание *рис. 3.1.2*

3.1.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 3.1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0…250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G4	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В

Окончание табл. 3.1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
A4	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выходов; 8 цифр. входов / выходов
A5	Персональный компьютер	550	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI-6023E (PCI-6024E)
A6, *A8*	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
A10	Активная нагрузка	306.1	220 В / 3×0…50 Вт
A12	Блок датчиков тока и напряжения	402.3	3 датчика напряжения ±100; 1000 В / ±5 В; 3 датчика тока ±1; 5 А / ±5 В
A14	Линейный реактор	314.2	3 × 0,3 Гн / 0,5 А
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

3.1.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ

Источник G1 – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания G2 двигателя постоянного тока используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением и выступающей в качестве нагрузочной машины.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель M1 получает питание через выключатель A6 и трехфазную трансформаторную группу A2 от трехфазного источника G1.

Выключатель *A8* служит для закорачивания реактора *A14* при прямом пуске двигателя *M1* с короткозамкнутым ротором.

Датчики тока и напряжения в блоке *A12* обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют ток и напряжение статорной обмотки испытуемого двигателя *M1* в пропорциональные им нормированные напряжения.

Через аналоговые входы *ACH0-ACH8*, *ACH1-ACH9*, *ACH2-ACH10*, *ACH3-ACH11* коннектора *A4* напряжения, пропорциональные току и напряжениям статорной обмотки, а также частоте вращения испытуемого двигателя *M1*, вводятся в компьютер *A5*.

3.1.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Переключатели режима работы источника *G2* и выключателей *A6*, *A8* установите в положение «РУЧН.».

− Установите в каждой фазе активной нагрузки *A10* ее суммарную величину, равную 0%.

− В трехфазной трансформаторной группе *A2* переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора 220В.

− Приведите в рабочее состояние персональный компьютер *A5* и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A8* и спустя, например, 2 с выключателя *A6* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться прямой пуск асинхронного двигателя *M1* на холостом ходу и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите последовательно кнопки «ОТКЛ.» выключателей *A6*, *A8*.

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Далее осуществите реакторный пуск двигателя, проделав следующую последовательность операций. Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6* и спустя, например, 2 с выключателя *A8* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться реакторный пуск асинхронного двигателя *M1* на холостом ходу и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Далее осуществите пуск двигателя при пониженном напряжении, проделав следующую последовательность операций. В трехфазной трансформаторной группе *A2* переключателем установите вторичное напряжение трансформатора, например, 133 В. Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A8* и спустя, например, 2 с выключателя *A6* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться пуск при пониженном напряжении асинхронного двигателя *M1* на холостом ходу и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника *G1*.

− Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

3.2. ПУСК В ХОД ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ НАГРУЗКЕ НА ВАЛУ С РЕГИСТРАЦИЕЙ И ОТОБРАЖЕНИЕМ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КОМПЬЮТЕРЕ (ПРЯМОЙ, РЕАКТОРНЫЙ, ПРИ ПОНИЖЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ)

3.2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ (СМ. РИС. 3.1.2)

3.2.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ (СМ. ТАБЛ. 3.1.1)

3.2.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ (СМ. П. 3.1.3)

3.2.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Установите в каждой фазе активной нагрузки *A10* ее суммарную величину, равную 100%.

− В трехфазной трансформаторной группе *A2* переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора 220В.

− Приведите в рабочее состояние персональный компьютер *A5* и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Вращением рукоятки на передней панели источника *G2* установите напряжение, например, 100В на его регулируемом выходе «ЯКОРЬ».

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A8* и спустя, например, 2 с выключателя *A6* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на

виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться прямой пуск нагруженного асинхронного двигателя *M1* и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите последовательно кнопки «ОТКЛ.» выключателей *A6, A8.*

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Далее осуществите реакторный пуск двигателя, проделав следующую последовательность операций. Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6* и спустя, например, 2 с выключателя *A8* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться реакторный пуск нагруженного асинхронного двигателя *M1* и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Далее осуществите пуск двигателя при пониженном напряжении, проделав следующую последовательность операций. В трехфазной трансформаторной группе *A2* переключателем установите вторичное напряжение трансформатора, например, 133 В. Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A8* и спустя, например, 2 с выключателя *A6* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться пуск при пониженном напряжении нагруженного асинхронного двигателя *M1* и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника *G1*.

− Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Кратко опишите устройство, принцип действия двигателя. Приведите номинальные данные испытуемого двигателя и схему испытания.

Опишите способы пуска в ход асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Приведите схемные решения различных способов.

Используя возможности программы «Регистратор режимных параметров машины переменного тока», проанализируйте отображенные на мониторе компьютера механическую характеристику и временные зависимости тока статорной обмотки, электромагнитного момента, частоты вращения асинхронного двигателя при прямом, реакторном пуске и пуске в ход при пониженном напряжении на холостом ходу и под нагрузкой. Оцените время пуска, величину пускового тока и момента при различных способах пуска. В отчете приведите снятые на компьютере зависимости.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните требования, предъявляемые к асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором при пуске.
2. Приведите схему и опишите последовательность операций при прямом пуске в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
3. Приведите схему и опишите последовательность операций при реакторном пуске в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
4. Приведите схему и опишите последовательность операций при автотрансформаторном пуске в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
5. Приведите схему и опишите последовательность операций при пуске в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением со «звезды» на «треугольник».
6. В каких случаях при использовании асинхронного двигателя предпочтение отдается короткозамкнутому ротору по сравнению с фазным?
7. Дайте характеристику и опишите способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

8. Приведите схему и поясните регулирование скорости вращения с помощью частотного регулирования.

9. Приведите схему и поясните регулирование скорости вращения изменением числа пар полюсов.

10. Приведите схему и поясните регулирование скорости вращения уменьшением первичного напряжения.

11. Поясните принцип действия глубокопазного асинхронного двигателя.

12. Поясните принцип действия асинхронного двигателя с двойной клеткой на роторе.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы – овладение практическими навыками экспериментального определения пусковых характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором и оценки потребительских свойств этого двигателя.

Программа работы

1. Изучить устройство и элементы конструкции двигателя.

2. Осуществить прямой и реостатный пуск двигателя на холостом ходу.

3. Осуществить прямой и реостатный пуск двигателя при нагрузке на валу.

4. Обработать и проанализировать экспериментальные данные.

Паспортные данные испытуемого двигателя

Номинальная потребляемая активная мощность $P_{1N} = 98$ Вт

Номинальная полезная механическая мощность $P_{2N} = 35$ Вт

Номинальное напряжение $U_{1N} = 220$ В

Номинальный ток обмотки статора $I_{1N} = 0{,}35$ А

Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_N = 0{,}73$

Номинальный коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}36$

Число пар полюсов $p = 2$

Механические потери $p_{мех}$ = 20 Вт

Магнитные потери $p_{мг}$ = 33 Вт

Активное сопротивление фазы обмотки статора R_1 = 22,2 Ом

4.1. ПУСК В ХОД (ПРЯМОЙ, РЕОСТАТНЫЙ) НА ХОЛОСТОМ ХОДУ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ С РЕГИСТРАЦИЕЙ И ОТОБРАЖЕНИЕМ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КОМПЬЮТЕРЕ

4.1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

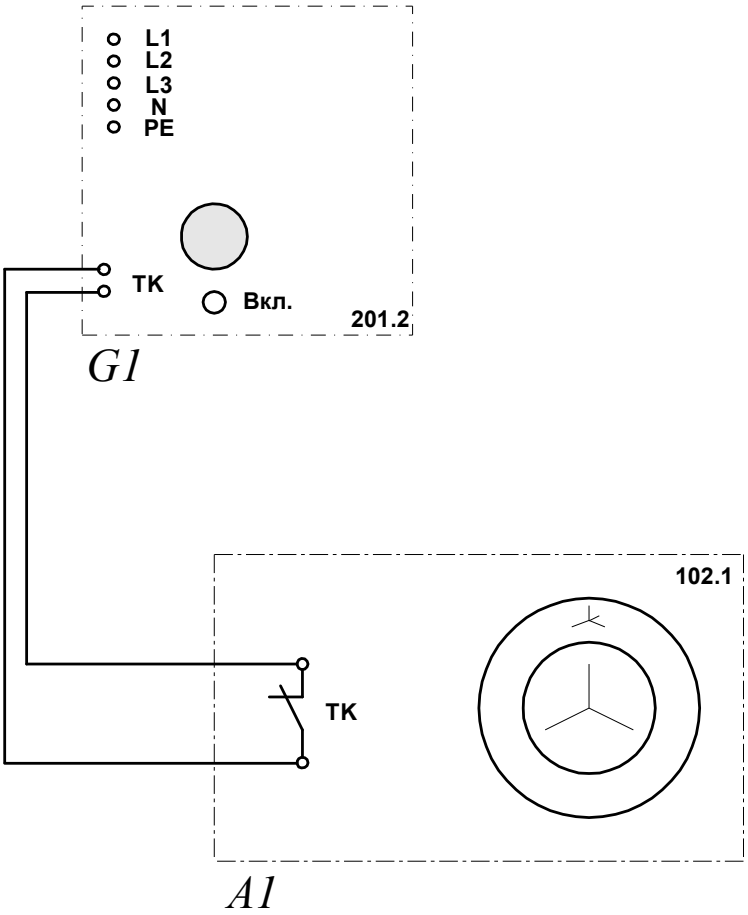


Рис. 4.1.1. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

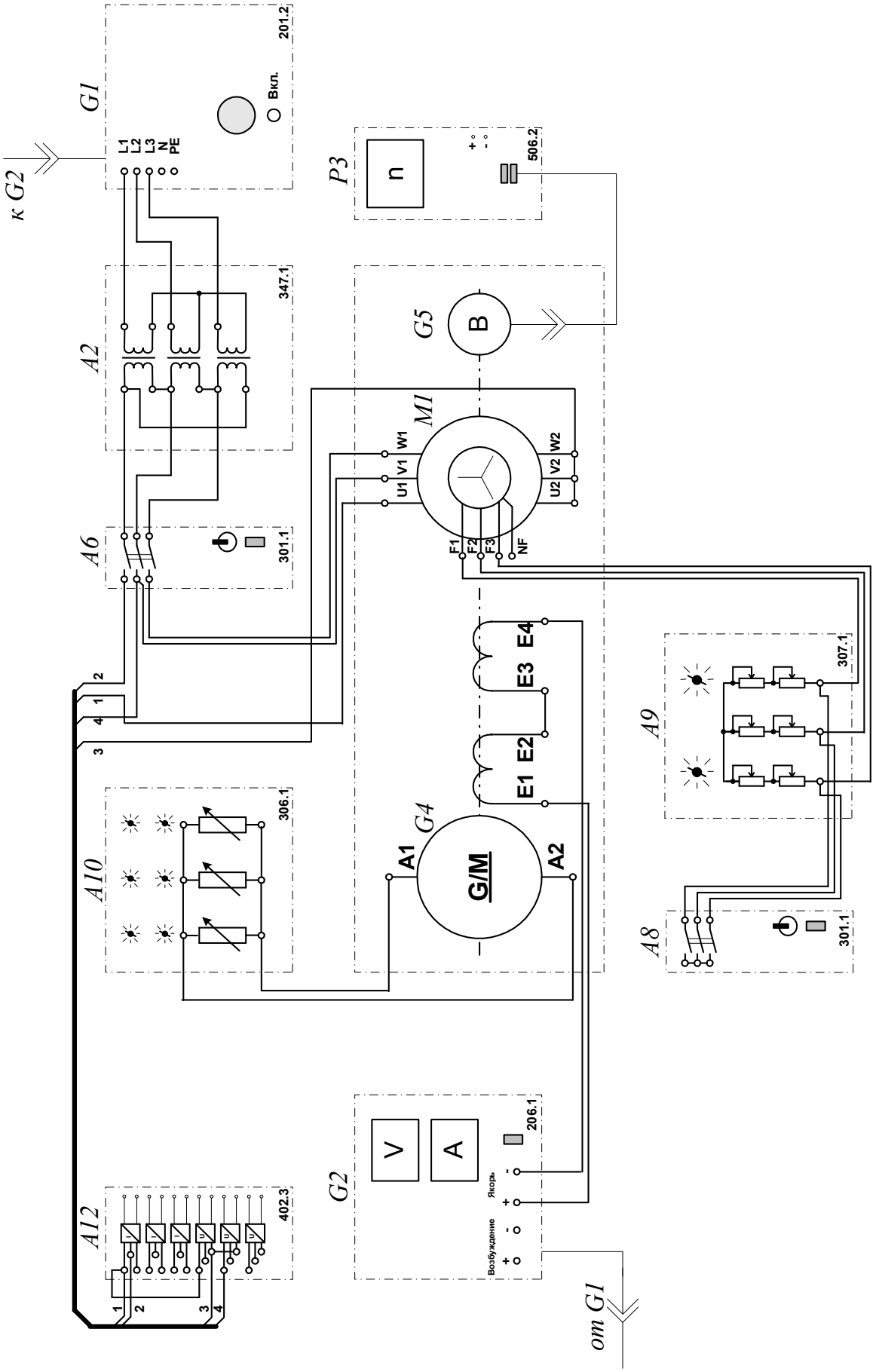
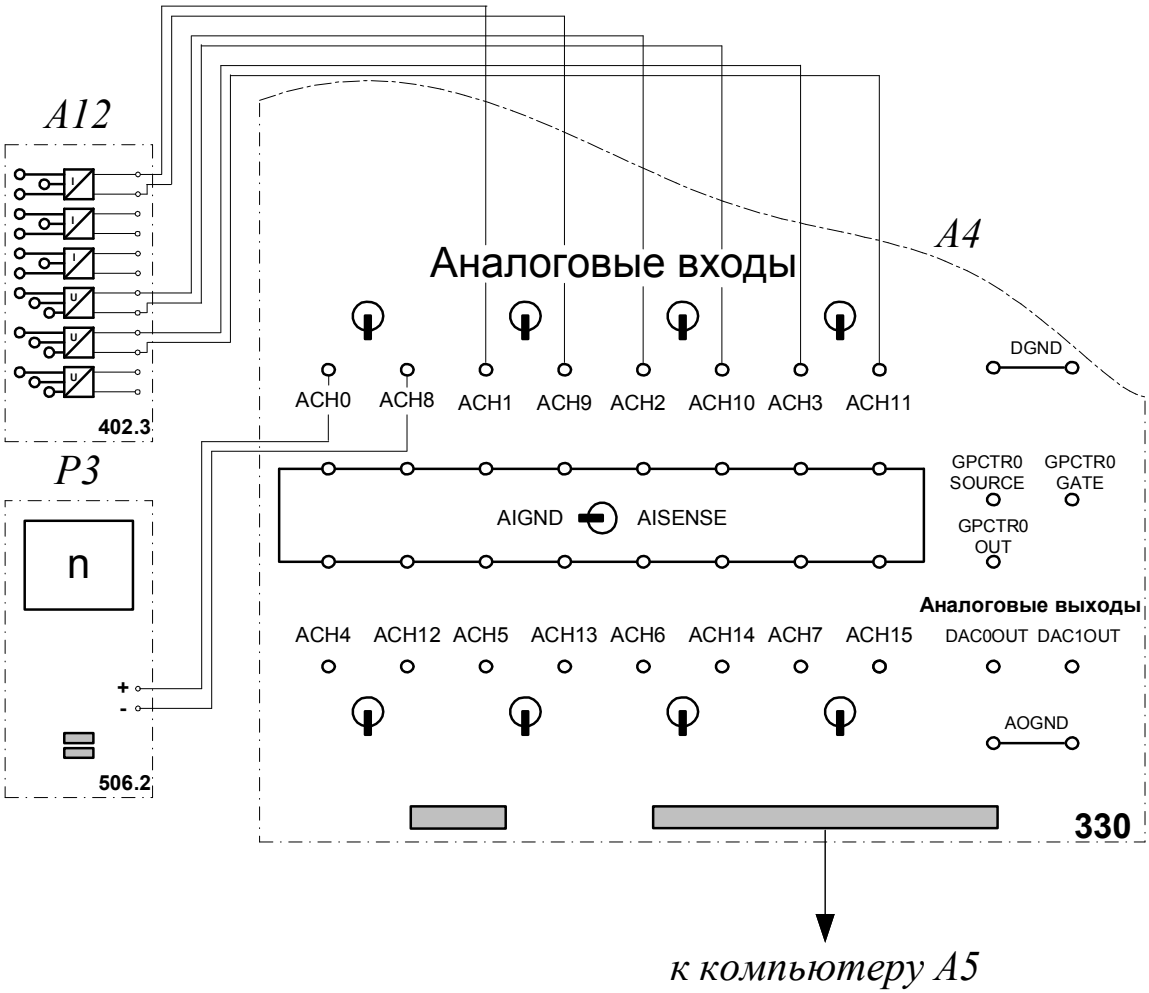


Рис. 4.1.2. Электрическая схема соединений при пуске на холостом ходу



Окончание *рис. 4.1.2*

4.1.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 4.1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0…250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G4	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот

Окончание табл. 4.1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A4	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выходов; 8 цифр. входов / выходов
A5	Персональный компьютер	550	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI-6023E (PCI-6024E)
A6, A8	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
A9	Реостат для цепи ротора машины переменного тока	307.1	3 × 0…40 Ом / 1 А
A10	Активная нагрузка	306.1	220 В / 3×0…50 Вт;
A12	Блок датчиков тока и напряжения	402.3	3 датчика напряжения ±100; 1000 В / ±5 В; 3 датчика тока ±1; 5 А / ±5 В
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

4.1.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ

Источник *G1* – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания *G2* двигателя постоянного тока используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением и выступающей в качестве нагрузочной машины.

Преобразователь угловых перемещений *G5* генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P3* электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель *M1* получает питание через выключатель *A6* и трехфазную трансформаторную группу *A2* от трехфазного источника *G1*.

Выключатель *A8* служит для закорачивания реостата *A9* при двухступенчатом пуске двигателя *M1* с фазным ротором.

Реостат *A9* служит для вывода энергии скольжения при испытании двигателя *M1* с фазным ротором.

Датчики тока и напряжения в блоке *A12* обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют ток и напряжение статорной обмотки испытуемого двигателя *M1* в пропорциональные им нормированные напряжения.

Через аналоговые входы *ACH0-ACH8*, *ACH1-ACH9*, *ACH2-ACH10*, *ACH3-ACH11* коннектора *A4* напряжения, пропорциональные току и напряжениям статорной обмотки, а также частоте вращения испытуемого двигателя *M1*, вводятся в компьютер *A5*.

4.1.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

− Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

− Соедините гнезда защитного заземления ⏚ устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания *G1*.

− Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

− Переключатели режима работы выключателей *A6*, *A8* установите в положение «РУЧН.».

− Установите в каждой фазе активной нагрузки *A10* ее суммарную величину, равную 0%.

− В трехфазной трансформаторной группе *A2* переключателем установите номинальное вторичное напряжение трансформатора 220 В.

− Приведите в рабочее состояние персональный компьютер *A5* и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A8* и спустя, например, 2 с выключателя *A6* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться прямой пуск асинхронного двигателя *M1* на холостом ходу и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите последовательно кнопки «ОТКЛ.» выключателей *A6*, *A8*.

− Установите в каждой фазе реостата *A9* сопротивление, например, 18 Ом.

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Далее осуществите реостатный пуск двигателя, проделав следующую последовательность операций. Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6* и спустя, например, 2 с выключателя *A8* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться двухступенчатый реостатный пуск асинхронного двигателя *M1* на холостом ходу и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите последовательно кнопки «ОТКЛ.» выключателей *A6*, *A8*.

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Осуществите реостатный пуск двигателя, установив в каждой фазе реостата *A9* сопротивление 40 Ом.

− Нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника *G1*.

− Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

4.2. ПУСК В ХОД ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ ПРИ НАГРУЗКЕ НА ВАЛУ С РЕГИСТРАЦИЕЙ И ОТОБРАЖЕНИЕМ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КОМПЬЮТЕРЕ

4.2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ (СМ. РИС. 4.1.2)

4.2.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ (СМ. ТАБЛ. 4.1.1)

4.2.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ (СМ. П.4.1.3)

4.2.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

− Установите в каждой фазе активной нагрузки А10 ее суммарную величину, равную 100%.

− В трехфазной трансформаторной группе *A2* переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора 220 В.

− Приведите в рабочее состояние персональный компьютер *A5* и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».

− Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

− Включите источник *G1*. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

− Вращением рукоятки на передней панели источника *G2* установите напряжение, например, 100 В на его регулируемом выходе «ЯКОРЬ».

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A8* и спустя, например, 2 с выключателя *A6* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться прямой пуск нагруженного асинхронного двигателя M1 и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите последовательно кнопки «ОТКЛ.» выключателей *A6*, *A8*.

− Установите в каждой фазе реостата *A9* сопротивление, например, 18 Ом.

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Далее осуществите реостатный пуск двигателя, проделав следующую последовательность операций. Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6* и спустя, например, 2 с выключателя *A8* и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться двухступенчатый реостатный пуск нагруженного асинхронного двигателя *M1* и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

− Нажмите последовательно кнопки «ОТКЛ.» выключателей *A6*, *A8*.

− Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

− Осуществите реостатный пуск двигателя, установив в каждой фазе реостата *A9* сопротивление 40 Ом.

− Нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника *G1*.

− Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Кратко опишите устройство, принцип действия двигателя. Приведите номинальные данные испытуемого двигателя и схему испытания.

Опишите способы пуска в ход асинхронных двигателей с фазным ротором. Приведите схемные решения различных способов.

Используя возможности программы «Регистратор режимных параметров машины переменного тока», проанализируйте отображенные на мониторе компьютера механическую характеристику и временные зависимости тока статорной обмотки, электромагнитного момента, частоты вращения асинхронного двигателя при прямом и реостатном пуске на холостом ходу и под нагрузкой. Оцените время пуска, величину пускового тока и момента при различных способах пуска. В отчете приведите снятые на компьютере зависимости.

4.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните требования, предъявляемые к асинхронному двигателю с фазным ротором при пуске.
2. Чем определяется допустимое число пусков в час асинхронного двигателя?
3. Приведите схему и опишите последовательность операций при прямом пуске в ход трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.
4. Приведите схему и опишите последовательность операций при реостатном пуске в ход трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.
5. В каких случаях при использовании асинхронного двигателя предпочтение отдается фазному ротору по сравнению с короткозамкнутым?
6. Поясните процесс самозапуска асинхронных двигателей.
7. Дайте характеристику и опишите способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором.
8. Приведите схему и поясните регулирование скорости вращения с помощью реостата в цепи ротора.
9. Приведите схему и поясните регулирование скорости вращения посредством введения добавочной ЭДС во вторичную цепь двигателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гольдберг, О.Д.* Электромеханика: учеб. / *О.Д. Гольдберг, С.П. Хмелевская.* – М.: Academia, 2007. – 504 с.

2. *Копылов, И.П.* Электрические машины: учеб. / *И.П.Копылов*. – 5-е изд. – М.: Высшая школа, 2006. – 607 с.

3. *Беспалов, В.Я.* Электрические машины: учеб. пособие / *В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленц*. – М.: Academia, 2006. – 313 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 4
Часть I. 1. Основы теории асинхронных электромеханических преобразователей 5
1.1. Назначение и области применения асинхронных машин 5
1.2. Конструкция асинхронных машин с короткозамкнутым ротором 9
1.3. Конструкция асинхронных машин с фазным ротором 13
1.4. Принцип действия асинхронной машины 16
1.5. Электромагнитный момент асинхронной машины 19
1.6. Максимальный и пусковой электромагнитные моменты. Механическая характеристика 22
1.7. Процесс пуска и установившийся режим работы асинхронного двигателя 25
1.8. Перегрузочная способность асинхронного двигателя 28
1.9. Кратности начального пускового момента и пускового тока 29
1.10. Рабочие характеристики асинхронного двигателя 30
2. Пуск трехфазных асинхронных двигателей 32
2.1. Основные характеристики пуска 32
2.2. Прямой пуск 34
2.3. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении 35
2.4. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором 39
3. Регулирование угловой скорости асинхронных двигателей 41
3.1. Возможные способы регулирования угловой скорости 41
3.2. Регулирование угловой скорости изменением частоты f_1 42
3.3. Регулирование угловой скорости изменением числа пар полюсов 45
3.4. Регулирование угловой скорости изменением подводимого напряжения 49
3.5. Регулирование угловой скорости включением в цепь ротора добавочного сопротивления 50
4. Однофазные асинхронные двигатели 52
4.1. Устройство и принцип действия однофазного асинхронного двигателя 52
4.2. Рабочие характеристики однофазного двигателя 55
4.3. Пуск однофазного асинхронного двигателя 56

4.4. Мощность асинхронного двигателя в трехфазном и однофазном режимах ... 59
4.5. Конденсаторные двигатели ... 60
4.6. Двигатель с экранированными полюсами ... 61
5. Асинхронная машина в режиме генератора ... 63
5.1. Параллельная работа генератора с сетью ... 63
5.2. Автономный генератор ... 66
6. Специальные режимы работы асинхронных электромеханических преобразователей ... 67
6.1. Электромагнитный тормоз ... 67
6.2. Асинхронный преобразователь частоты ... 68
6.3. Линейный двигатель ... 70
Часть II. Лабораторный практикум ... 72
1. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором ... 75
2. Исследование асинхронного двигателя с фазным ротором ... 102
3. Исследование пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором ... 123
4. Исследование пусковых характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором ... 133
Библиографический список ... 143

Учебное издание

ЗУБКОВ Юрий Валентинович

Асинхронные электромеханические преобразователи

Редактор *Г.В. Загребина*
Компьютерная верстка *И.О. Миняева*
Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подписано в печать 22.05.13.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная
Усл. п. л. 8,60. Уч..-изд. л. 8,54
Тираж 100 экз. Рег. № 112/13

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус №8