

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФГОУ ВПО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра
электропривода и электротехнологии

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебное пособие
для студентов специальности 110302
«Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»
очной и заочной форм обучения

2-е издание, стереотипное

КОСТРОМА
КГСХА
2010

УДК 62-81
ББК 31.291
О 75

Составитель: к.т.н., профессор кафедры электропривода и электротехнологии Костромской ГСХА А.С. Симоненко.

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры теоретических основ электротехники и автоматики *А.В. Рожнов*, к.т.н., доцент кафедры электропривода и электротехнологии *Ф.А. Новожилов*.

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства протокол № 6 от 30 июня 2008 года

О 75 **Основы электропривода** : учебное пособие для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» очной и заочной форм обучения / сост. А.С. Симоненко. — 2-е изд., стереотип. — Кострома : КГСХА, 2010. — 182 с.

Издание содержит теоретические материалы по основам электропривода: общие понятия и определения в электроприводе, классификацию электроприводов в соответствии с ГОСТ 50369—92, механические характеристики электродвигателей, методы расчета пусковых и тормозных сопротивлений, анализ переходных процессов в электроприводах.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» очной и заочной форм обучения.

УДК 62-81
ББК 31.291

© ФГОУ ВПО Костромская ГСХА, 2009
© ФГОУ ВПО Костромская ГСХА, 2010 , стереотип.
© А.С. Симоненко, составление, 2010
© Оформление, РИО КГСХА, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Общие сведения и определения	6
1.1. Приводы. Понятие и развитие. Электроприводы.	6
1.2. Классификация электроприводов и их краткая характеристика	8
1.3. Относительные единицы в теории электропривода	10
Глава 2. Механические характеристики рабочих машин и электродвигателей	13
2.1. Механические характеристики рабочих машин	13
2.2. Механические характеристики электродвигателей	15
2.3. Механические характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения	20
2.4. Характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.....	40
2.5. Механические характеристики двигателей постоянного тока смешанного возбуждения.....	50
2.6. Механические характеристики асинхронных электродвигателей	52
Глава 3. Основы динамики электропривода	92
3.1. Уравнение движения электропривода	92
3.2. Приведение моментов и сил к скорости одного вала	95
3.3. Приведение моментов инерции и масс к скорости одного вала.....	96
3.4. Методы определения моментов инерции	97
3.5. Переходные процессы в электроприводе. Определение времени переходных процессов.....	101
3.6. Графические и графоаналитические методы решения задач динамики	110
Глава 4. Нагрев и охлаждение электродвигателей. Общие положения	115
4.1. Уравнения нагрева и охлаждения электродвигателей.....	117
4.2. Физический смысл и способы определения постоянной времени нагрева.....	120
4.3. Зависимость потерь мощности и установившегося превышения температуры от нагрузки.....	124
4.4. Коэффициент полезного действия электродвигателей.....	127
4.5. Влияние температуры окружающей среды на мощность электродвигателя	128

Глава 5. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей	130
5.1. Классификация режимов работы электродвигателей.....	131
5.2. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при продолжительном режиме работы	135
5.3. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при кратковременном режиме работы.....	145
5.4. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при повторно-кратковременном режиме работы (S3).....	149
5.5. Выбор мощности двигателей и расчет оптимальных размеров инерционных масс при ударных нагрузках	154
Глава 6. Энергетика переходных процессов в электроприводе.....	160
6.1. Расчет потерь энергии в переходных режимах двигателей постоянного тока независимого возбуждения при работе без нагрузки	160
6.2. Расчет потерь энергии в переходных режимах двигателей постоянного тока независимого возбуждения при работе с постоянной нагрузкой	163
6.3. Расчет потерь энергии в переходных режимах асинхронных двигателей при работе без нагрузки.....	165
6.4. Расчет потерь энергии в переходных режимах асинхронных двигателей при работе с нагрузкой	166
6.5. Определение оптимального передаточного числа в электроприводе	168
6.6. Способы уменьшения потерь энергии в переходных режимах	169
6.7. Расчет допустимого числа включений в час	171
Глава 7. Повышение коэффициента мощности электроприводов.....	174
7.1. Влияние коэффициента мощности на работу электроустановок.....	174
7.2. Факторы, ведущие к понижению коэффициента мощности.....	175
7.3. Способы повышения $\cos \varphi$	177
Список рекомендуемых источников.....	182

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс электропривода, согласно государственным образовательным стандартам делится на две части: общий электропривод и управление электроприводами.

В первой части рассматриваются общие и теоретические вопросы электропривода, включающие в себя режимы работы, статические и динамические характеристики электродвигателей и рабочих машин, работа электроприводов в переходных режимах, расчет оптимального передаточного числа, вопросы энергетики переходных режимов, потери, нагрев и охлаждение электродвигателей, расчет и выбор номинальной мощности.

Во второй части представлены разделы регулирования координат в разомкнутых и замкнутых системах электроприводов; аппаратура, схемы и методы управления и защиты электроприводов, приводы сельскохозяйственных машин, механизмов и поточных линий.

В настоящем учебном пособии рассматриваются вопросы первой части курса, в которой, наряду с известными традиционными методами анализа и решения отдельных задач, предлагаются некоторые новые подходы, связанные с использованием персональных компьютеров.

Целью издания настоящего методического пособия является согласование излагаемого материала с требованиями рабочей программы курса, а также для оказания помощи студентам очной и особенно заочной формы обучения в поиске и использовании литературных источников.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Приводы. Понятие и развитие. Электроприводы.

Привод, как таковой, появился так давно, как только человек начал применять простейшие орудия производства. В любом приспособлении, применяемом для выполнения какой-то производственной операции, имеются: орган, воздействующий непосредственно на объект труда, — рабочий орган, источник энергии или движения, обеспечивающий перемещение рабочего органа относительно объекта или объекта относительно рабочего органа, и устройство для передачи движения от источника к рабочему органу — передаточное устройство. Два элемента из этих трех, а именно, источник энергии и передаточное устройство объединяются общим названием — привод. В зависимости от типа источника энергии приводы подразделяются на ручные, конные, механические и электрические.

В ручном приводе в качестве источника движения выступает мускульная сила человека. Такой привод находит применение еще и до настоящего времени, преимущественно в бытовых приборах, но существенной роли в народном хозяйстве уже не играет. В конном приводе используется сила животных и также сегодня представляет лишь исторический интерес. В механических приводах используются сила ветра, воды, пара или электричества. Это ветряные и гидравлические двигатели, паровые турбины и двигатели внутреннего сгорания. В электрических приводах источником механического движения является электрический двигатель. Благодаря своим уникальным особенностям электрический двигатель, как источник механического движения, применяется во всех отраслях современного производства. Следовательно, наиболее распространенным типом современного привода является электрический привод. Питаясь от преобразователей тока, и, используя различные регулирующие устройства, он приобретает свойства и название автоматизированного электрического привода.

Согласно ГОСТ Р 50369—92 *электроприводом* называется электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса.

Структурная схема автоматизированного электропривода, приведенная на рис. 1 содержит в себе три основных блока:

- 1) механическая часть привода МЧ, включающая электродвигатель, предназначенный для преобразования электрической энергии в механическую или механической энергии в электрическую и передаточное устройство ПУ, предназначенное для передачи механической энергии от электродвигателя к исполнительному органу рабочей машины, а также для изменения вида, скорости движения, усилия или вращающего момента;

- 2) система управления СУ, состоящая из силовой преобразовательной части (преобразователя П), управляющего устройства У, задающего устройства ЗУ и датчиков обратных связей электрических ДОСЭ и механических ДОСМ1 и ДОСМ2.

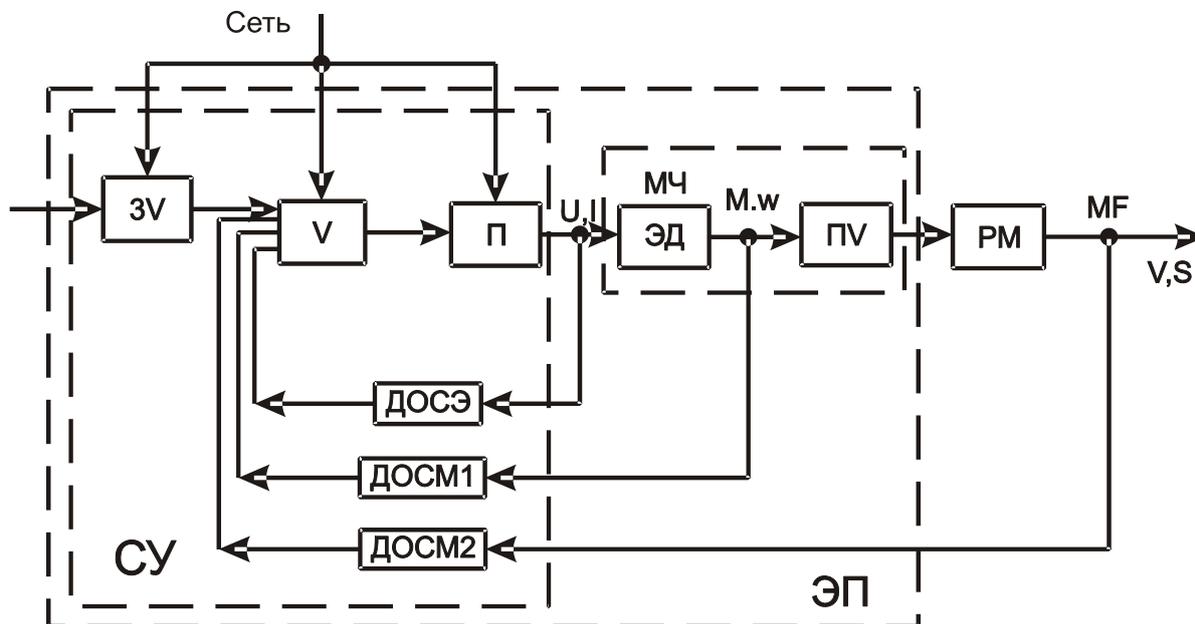


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного электропривода

Преобразователь предназначен для получения электроэнергии требуемых для электродвигателя параметров и управления потоком этой энергии, что необходимо для управления движением исполнительного органа. Управляющее устройство получает командные сигналы от задающего устройства, а информацию о текущем состоянии электропривода и технологического процесса от датчиков обратных связей. С помощью этих датчиков такие параметры как ток, напряжение, мощность или другие его электрические параметры скорость, момент или усилие и положение исполнительного органа — преобразуются в пропорциональные этим параметрам электрические сигналы, которые подаются в управляющее устройство. В нем текущее состояние электропривода и технологического процесса сравнивается с заданным и при наличии рассогласования вырабатывается управляющий сигнал, воздействующий через преобразователь П на электропривод в направлении устранения возникшего рассогласования с требуемой точностью и быстродействием.

Литература: [4, с. 6-11; 8, с. 5-7; 10, с. 6-8; 11, с.3-6].

1.2. Классификация электроприводов и их краткая характеристика

Реализация электроприводов может быть весьма разнообразной, что находит отражение в их классификации. В соответствии с ГОСТ Р 50369—92 электроприводы подразделяются по структуре, функциональному назначению и физическим принципам преобразования электрической энергии.

По структурному признаку подразделение ведется, главным образом, по соотношению между количеством двигателей и рабочих органов, осуществляющих единый технологический процесс, а также по степени взаимосвязи отдельных элементов. Электроприводы, в которых отсутствуют обратные связи по регулируемым координатам или по возмущению, называются разомкнутыми. Электроприводы с обратными связями — замкнутыми. По количественному соотношению между двигателями и рабочими органами электроприводы подразделяются на групповые, индивидуальные и взаимосвязанные. Групповым называется такой электропривод, когда одним электродвигателем обеспечивается движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких рабочих органов одной рабочей машины. Такие приводы находят применение и достаточно широко распространены в сельскохозяйственных машинах. Здесь для привода нескольких смонтированных на общей раме тихоходных рабочих органов, целесообразно применять один двигатель и один редуктор вместо нескольких двигателей и редукторов. К таким машинам, в частности, относятся кормоприготовительные машины: корнеклубнебойки (привод барабана, загрузочного и выгрузного транспортеров), зернодробилки, измельчители кормов и т.п. В индивидуальном электроприводе одним электродвигателем приводится в движение один исполнительный орган рабочей машины. Такие приводы находят широкое применение во всех отраслях народного хозяйства, особенно они подходят для быстроходных исполнительных органов. Здесь имеются большие возможности для тесной конструктивной увязки между двигателем и исполнительными органами рабочих машин вплоть до их полного слияния. Обычно машины, в которых отдельные части двигателей выполняют функции исполнительных органов, имеют приставку «электро»: электродрель, электрорубанок и т.д. Взаимосвязанным называется электропривод, в котором два или несколько электрически или механически связанных между собой электроприводов при работе поддерживают заданное соотношение скоростей, нагрузок или положения исполнительных органов рабочих машин. Взаимосвязанный электропривод, у которого механическая связь между электродвигателями осуществляется через исполнительные органы рабочей машины, называется многодвигательным. Такие приводы применяются на электропоездах, троллейбусах, конвейерах сборочных цехов, навозоуборочных транспортерах крупных животноводческих ферм. Электропривод, обеспечивающий синхронное движение двух или более исполнительных органов рабочей машины, не имеющих механической связи, называется электрическим валом, например, сельсины.

По функциональному назначению электроприводы подразделяются на электроприводы вращательного, поступательного, возвратно-поступательного, непрерывного, дискретного движения; реверсивный и нереверсивный, регулируемый и нерегулируемый приводы. Регулируемый привод обеспечивает управляемое изменение координат движения исполнительного органа рабочей машины. К этой же категории относятся и приводы с различной степенью автоматизации. Неавтоматизированный привод — это привод, в котором все операции управления выполняет оператор. Электропривод, в котором часть операций управления выполняют соответствующие устройства управления без участия оператора, называется автоматизированным.

Электропривод, обеспечивающий перемещение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с произвольно изменяющимися задающими сигналами, называется следящим. Программно-управляющим называется электропривод, обеспечивающий перемещение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с заданной программой. Электропривод с наиболее высоким уровнем автоматизации — адаптивный. Это электропривод, автоматически избирающий структуру или параметры своей системы управления при изменении возмущающих воздействий.

По физическим принципам преобразования электрической энергии в механическую электроприводы подразделяются на электромашинные, электромагнитные, электростатические и пьезоэлектрические. В электромашинных приводах преобразование электрической энергии в механическую осуществляется электрическими машинами, основанными на взаимодействии электромагнитного поля и проводника с током. В электромагнитном электроприводе преобразование электрической энергии в механическую осуществляется на основе взаимодействия электромагнитного поля и ферромагнитных тел. Основой первого из этих типов электроприводов являются различного рода электродвигатели постоянного и переменного тока, вращательного и поступательного движения. Работа электромагнитных электроприводов основана на притяжении подвижных сердечников к неподвижным под действием электромагнитных полей: соленоиды, магнитные задвижки, контакторы и т.д. В электростатическом электроприводе преобразование электрической энергии в механическую осуществляется на основе взаимодействия электростатического поля и электрических зарядов. На этом принципе работают установки по сепарации семян различных культур в электростатическом поле. Пьезоэлектрические электроприводы преобразуют электрическую энергию в механическую устройствами на основе пьезоэлектрического эффекта.

Литература: [1, с 3-7; 6, с. 8-13; 7, с. 18-22; 9, с. 8-14].

1.3. Относительные единицы в теории электропривода

При решении различных задач, связанных с расчетами электроприводом, при сопоставлении полученных результатов нередко приходится пользоваться не абсолютными значениями физических величин, а их относительными значениями. При рассмотрении, например, процесса пуска двух двигателей постоянного тока на различное номинальное напряжение сравнение абсолютных значений пусковых токов не позволяет сделать заключение о том, где условия пуска будут легче. Трудно составить представление о пусковых качествах, перегрузочной способности электродвигателей, выражая соответствующие вращающие моменты этих двигателей в абсолютных величинах. Пользуясь относительными величинами, представляется возможным вывести некоторые общие закономерности или свойства, или получить решения для двигателей данного типа всего ряда номинальных мощностей. Уравнения характеристик в относительных единицах в ряде случаев позволяют находить более простые или более наглядные решения задач, а сами эти уравнения становятся более простыми и универсальными.

Для получения относительных единиц абсолютное значение какой-либо величины принято делить на аналогичную величину, принятую условно за единицу или масштаб. Обычно в качестве таковой принимаются номинальные значения соответствующих величин.

Наиболее часто в теории и практике электропривода применяются следующие относительные единицы.

Относительное напряжение:

$$u = \frac{U}{U_n} \quad \text{или} \quad u\% = \frac{U}{U_n} 100,$$

где U и U_n — соответственно действительное и номинальное значения напряжений, В.

Относительный ток:

$$i = \frac{I}{I_n} \quad \text{или} \quad i\% = \frac{I}{I_n} 100,$$

где I и I_n — соответственно действительное и номинальное значения силы тока, А.

Относительная скорость:

$$v = \frac{\omega}{\omega_n} \quad \text{или} \quad v\% = \frac{\omega}{\omega_n} 100,$$

где ω и ω_n — действительное и номинальное значения угловой скорости.

За масштаб относительной величины скорости принимают номинальную скорость только для двигателей постоянного тока с последовательным и смешанным возбуждением. Для двигателей независимого и параллельного возбуждения за масштаб скорости принимают скорость идеального холостого хода, а для синхронных и асинхронных двигателей — синхронную скорость, т.е. угловую скорость вращающегося магнитного поля ω_0 . Таким образом, для этих двигателей относительная скорость определяется как:

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \text{или} \quad \nu\% = \frac{\omega}{\omega_0} 100 \quad (1.1)$$

Степень отставания ротора от вращающегося магнитного поля у асинхронных электродвигателей, а также уменьшение скорости вала двигателей постоянного тока с независимым возбуждением по отношению к скорости идеального холостого хода при изменении нагрузки принято оценивать относительной величиной, называемой скольжением:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad \text{или} \quad s\% = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} 100.$$

Учитывая соотношения (1.1), можно записать

$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0} = 1 - \nu \quad \text{или} \quad s\% = (1 - \nu)100.$$

Относительное сопротивление:

$$\rho = \frac{R}{R_n} \quad \text{или} \quad \rho\% = \frac{R}{R_n} 100,$$

где R и R_n — действительное и номинальные значения сопротивлений, Ом.

Под номинальным сопротивлением машин постоянного тока понимают сопротивление, обеспечивающее протекание номинального тока двигателя при номинальном напряжении сети и неподвижном якоре:

$$R_n = \frac{U_n}{I_n}$$

Под номинальным сопротивлением фазы обмотки ротора асинхронного двигателя понимают активное сопротивление, состоящее из активного сопротивления фазы и внешнего сопротивления, которое обусловит протекание номинального тока в обмотках неподвижного ротора при номинальных напряжении и частоте тока.

Для схемы соединения обмотки ротора в звезду

$$R_{2n} \approx Z_{2n} = \frac{E_{2n}}{\sqrt{3}I_{2n}}, \quad (1.2)$$

где E_{2n} — э.д.с. неподвижного ротора;

I_{2n} — номинальный ток ротора;

Z_{2n} — полное сопротивление фазы ротора.

Индуктивное сопротивление в формуле (1.2) можно не учитывать, так как при наличии большого внешнего активного сопротивления, ограничивающего величину тока ротора номинальным значением, активное сопротивление роторной цепи практически равно полному.

Относительное сопротивление можно выразить через относительные значения напряжения и тока:

$$\rho = \frac{R}{R_n} = \frac{\frac{U}{I}}{\frac{U_n}{I_n}} = \frac{U \cdot I_n}{I \cdot U_n} = \frac{\frac{U}{I_n}}{\frac{U_n}{I}} = \frac{u}{i} \quad \text{или} \quad \rho\% = \frac{u\%}{i\%} 100.$$

Частота тока:

$$\varphi = \frac{f}{f_n} \quad \text{или} \quad \varphi\% = \frac{f}{f_i} 100.$$

Относительный момент:

$$\mu = \frac{M}{M_n} \quad \text{или} \quad \mu\% = \frac{M}{M_i} 100.$$

В дальнейшем относительные моменты при пуске двигателей, максимальные, минимальные относительные моменты принято называть соответственно кратностями пусковых, максимальных и минимальных моментов.

Литература: [2, с. 15-17].

ГЛАВА 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧИХ МАШИН И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В процессе работы электродвигателей и рабочих машин происходит изменение их угловой скорости, а вместе с тем изменяются вращающие моменты двигателей и моменты сопротивления рабочих машин. Зависимости между скоростью и моментами, выраженные в аналитической или графической форме называются механическими характеристиками.

2.1. Механические характеристики рабочих машин

Зависимость между моментами сопротивления и угловой скоростью рабочей машины называется ее механической характеристикой $M_c = f(\omega)$. Различные производственные механизмы обладают своими, присущими их типу, механическими характеристиками. Эмпирическая формула, позволяющая с достаточной степенью точности устанавливать эту зависимость, принимается в качестве уравнения механической характеристики производственного механизма:

$$M_c = M_o + (M_{c.n} - M_o) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (2.1)$$

где M_c — момент сопротивления механизма при скорости ω ;

M_o — момент сопротивления трения в движущихся частях механизма;

$M_{c.n}$ — момент сопротивления при номинальной скорости ω_n ;

x — коэффициент, характеризующий изменение момента сопротивления при изменении скорости.

Для различных типов машин коэффициент x может быть положительным и отрицательным, целым и дробным числом.

В качестве примеров ниже приводятся наиболее характерные механические характеристики.

1. Механическая характеристика при моменте сопротивления, не зависящем от скорости.

При $x = 0$ согласно формулы (2.1) $(\omega/\omega_n)^x = 1$ и, следовательно, $M_c = M_{c.n} = const$. Момент сопротивления не зависит от скорости (прямая 1 на рис. 2). Такой характеристикой обладают подъемные краны, лебедки, ленточные транспортеры, конвейеры, работающие с постоянной нагрузкой. Сюда же могут быть отнесены с известным приближением все механизмы, у которых основным моментом сопротивления является момент трения, так как обычно в пределах рабочих скоростей момент трения изменяется мало.

2. Линейно возрастающими механическими характеристиками обладают механизмы, у которых $x = 1$ (кривая 2 на рис. 2) и выражаются уравнением

$$M_c = M_o + \frac{M_{c.n} - M_o}{\omega_n} \omega .$$

Типичным примером подобных механизмов может служить генератор постоянного тока независимого возбуждения, работающий на постоянное внешнее сопротивление.

3. Механизмы с нелинейно-возрастающей (параболической) механической характеристикой (кривая 3 на рис. 2).

Этой характеристике соответствует $x = 2$; момент сопротивления M_c здесь пропорционален квадрату скорости

$$M_c = M_o + \frac{M_{c.n} - M_o}{\omega_n^2} \omega^2 .$$

Такой механической характеристикой обладают вентиляторы, центробежные насосы, сепараторы, гребные винты, молотильные барабаны и т.п. Эти характеристики принято называть вентиляторными.

4. Нелинейно-спадающие механические характеристики (кривая 4 на рис. 2). Здесь $x = -1$ и момент сопротивления изменяется в соответствии с уравнением

$$M_c = M_o + \frac{M_{c.n} - M_o}{\omega} \omega_n .$$

Такими механическими характеристиками обладают некоторые металлорежущие станки, колосовые элеваторы, зерновые норрии и др.

Если учесть, что потребная мощность любой машины выражается как $P = M_n \omega$, то, без учета момента сопротивления при трогании, можно установить зависимость потребной мощности каждого типа машин от угловой скорости. Для механизмов 1-й группы ($x = 0$) $M_c = \text{const}$. Для механизмов второй группы ($x = 1$) $M_c = k\omega$ — момент пропорционален скорости. Для механизмов третьей группы ($x = 2$) момент пропорционален квадрату скорости и для четвертой группы ($x = -1$) момент обратно пропорционален скорости.

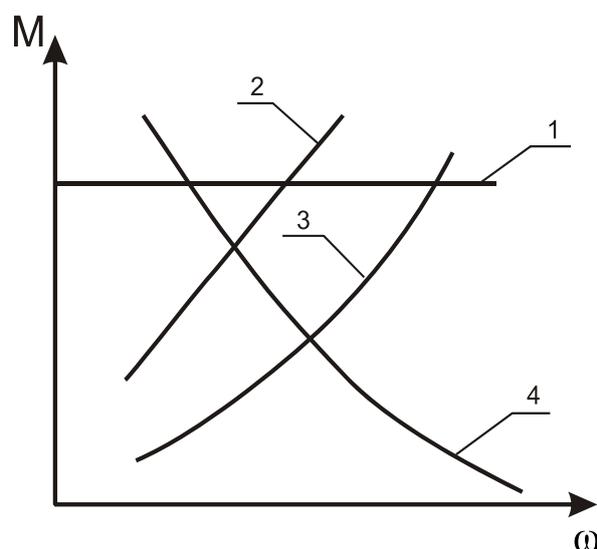


Рис. 2. Механические характеристики рабочих машин

Приведенная классификация не исчерпывает всех возможных типов механических характеристик исполнительных органов, так как кроме целых чисел показатель степени может иметь дробные, положительные и отрицательные значения, но дает представление о типичных характеристиках производственных механизмов.

2.2. Механические характеристики электродвигателей

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость развиваемого им момента от угловой скорости, т.е. $M = f(\omega)$.

В большинстве учебников по электроприводу под механической характеристикой подразумевается зависимость $\omega = f(M)$. Однако, зависимость $M = f(\omega)$ более точно отвечает физическому смыслу явлений, протекающих в двигателе, позволяет отображать его механические характеристики при том же расположении координатных осей, что и механические характеристики рабочих машин. Для асинхронного электродвигателя практически невозможно выразить механическую характеристику уравнением $\omega = f(M)$.

При изменении угловой скорости вала двигателя в обмотках ротора (якоря) изменяются э.д.с., токи, а у двигателей переменного тока частота и коэффициент мощности. Все эти факторы зависят от скорости вала двигателя и оказывают влияние на величину вращающего момента, что и отражается в механической характеристике, представленной как $M = f(\omega)$.

Механические характеристики наиболее распространенных типов электродвигателей представлены на рисунке 3: 1 — характеристика синхронного двигателя; 2 — ДПТ независимого и параллельного возбуждения; 3 — последовательного возбуждения; 4 — асинхронного двигателя.

Наряду с механическими характеристиками практический интерес представляет зависимость, показывающая как изменяется ток от угловой скорости, т.е. $I = f(\omega)$. Эту зависимость называют электромеханической или скоростной характеристикой двигателя.

Механические характеристики двигателей подразделяют на естественные и искусственные.

Характеристики, соответствующие работе двигателя при номинальных параметрах питающего тока (напряжение, частота), отсутствии добавочных сопротивлений в цепях обмоток и нормальной схеме соединения, называются *естественными*.

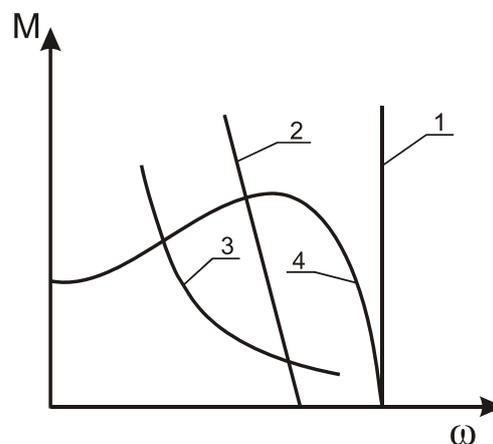


Рис. 3. Механические характеристики электродвигателей

Характеристики двигателя при изменении одного или нескольких из выше перечисленных факторов называются *искусственными*. Они используются для регулирования координат, создания оптимальных условий при пусках, торможении и реверсировании.

Понятие жесткости механических характеристик. Из графиков механических характеристик (см. рис. 2 и 3) видно, что при одинаковом изменении угловой скорости в разных точках характеристик отношение приращений момента ΔM к приращению угловой скорости $\Delta\omega$ будет различным.

Пределы изменения момента, соответствующие определенному изменению скорости в данной точке механической характеристики, принято оценивать величиной, называемой коэффициентом жесткости или жесткостью механической характеристики в этой точке. Под жесткостью механической характеристики электродвигателя β_δ понимают отношение приращения момента двигателя к соответствующему приращению угловой скорости, а под жесткостью механической характеристики рабочего механизма β_c — отношение приращения момента сопротивления к соответствующему приращению угловой скорости в данной точке, т.е.

$$\beta_\delta = \frac{\Delta M_\delta}{\Delta\omega} \quad \text{и} \quad \beta_c = \frac{\Delta M_c}{\Delta\omega}. \quad (2.2)$$

Если принять, что $\Delta\omega \rightarrow 0$, то пределы отношений в формуле (2.2) выразятся как производная момента по угловой скорости

$$\beta_\delta = \frac{\partial M_\delta}{\partial\omega} \quad \text{и} \quad \beta_c = \frac{\partial M_c}{\partial\omega}.$$

Обычно на рабочих участках механические характеристики двигателей имеют отрицательную жесткость $\beta_\delta < 0$. Линейные механические характеристики обладают постоянной жесткостью. В случае нелинейных характеристик их жесткость не постоянна и определяется в каждой точке.

По величине жесткости механические характеристики электродвигателей разделяются на четыре основные категории.

1. *Абсолютно жесткая* механическая характеристика ($\beta_\delta = \infty$) — это характеристика, при которой угловая скорость с изменением момента остается неизменной. Такой характеристикой обладают синхронные двигатели (кривая 1 на рис. 2).

2. *Жесткая* механическая характеристика — это характеристика, которая показывает, что при незначительном изменении угловой скорости момент изменяется значительно. Жесткой механической характеристикой обладают двигатели постоянного тока с параллельным и независимым возбуждением при работе на естественной характеристике, асинхронные двигатели на рабочей ветви естественной характеристики (кривые 2 и 4 на рис. 2, $\beta_\delta = 10 \dots 40$).

3. *Мягкая* механическая характеристика отражает зависимость, при которой значительным изменениям скорости соответствуют относительно малые изменения момента. Такими свойствами обладают характеристики двигателей последовательного и смешанного возбуждения со значительным числом ампервитков последовательной обмотки (кривая 3 на рис. 2, $\beta \leq 10$), а также двигатели постоянного тока при работе на искусственных механических характеристиках.

4. *Абсолютно мягкая* характеристика — это характеристика, при которой изменение угловой скорости не сопровождается изменением вращающего момента. Таким свойством обладает, например, механическая характеристика асинхронного двигателя в точке максимального момента.

Литература: [6, с.21-25; 7, с.23-28; 10, с. 32-36; 11, с. 10-12].

Статическая устойчивость электропривода. Одним из основных требований, предъявляемых к электродвигателю в любом электроприводе, является его способность преодолевать момент сопротивления рабочего органа при заданной скорости. Работа электропривода в стационарном режиме (работа с постоянной скоростью) возможна в том случае, если сохраняется равенство между моментами двигателя и рабочей машины, а также в том случае, если при нарушении равновесия возникает такое изменение скорости, при котором равновесие восстанавливается при большем или меньшем отклонении угловой скорости от предыдущей. Для этого в неэлектрических двигателях применяются специальные регуляторы, которые воздействуют на источник энергии с целью увеличить или уменьшить момент двигателя. В электрическом двигателе роль автоматического регулятора выполняет э.д.с. Этим он выгодно отличается от других типов двигателей. При нарушении равновесия моментов происходит изменение угловой скорости и пропорциональной ей э.д.с., а вместе с ней тока и вращающего момента двигателя. Восстановление равновесия моментов может происходить по-разному: в зависимости от того насколько быстро происходит изменение возмущающих воздействий. При быстром их изменении сохранение равновесия моментов может происходить как за счет момента, развиваемого электродвигателем, так и за счет динамического момента, вызванного появлением значительных ускорений. В этом случае речь идет о динамической устойчивости. При медленных нарушениях равновесия моментов, когда ускорения незначительны и его восстановление обусловлено только свойствами механических характеристик, имеет место устойчивость статическая. В электроприводе, не обладающем статической устойчивостью, не может быть и динамической устойчивости. Вопросы динамической устойчивости рассматриваются в разделе переходных процессов в электроприводе и в курсе автоматики. Под статической устойчивостью электропривода понимают способность электродвигателя восста-

навливать равновесие между моментами электродвигателя и рабочей машины, нарушаемое при сравнительно медленных изменениях возмущающих воздействий. Условия, при которых обеспечивается статическая устойчивость электропривода, можно проанализировать на примере механических характеристик электродвигателя $M_{\partial\delta}(\omega)$ и рабочей машины $M_c(\omega)$ на рисунке 4. При угловой скорости ω_0 моменты двигателя $M_{\partial\delta}$ и рабочей машины M_c равны между собой и, согласно основному уравнению движения $M_{\partial\delta} - M_c = Jd\omega/dt$, выполняется условие работы электропривода с постоянной скоростью, т.к. ускорение равно нулю. Если под действием каких-либо возмущающих воздействий произойдет отклонение скорости на величину $\Delta\omega$, моменты получат приращения соответственно $\Delta M_{\partial\delta}$ и ΔM_c . Тогда основное уравнение движения электропривода при постоянном моменте инерции для приращений моментов и скорости запишется в виде

$$\Delta M_{\partial\delta} - \Delta M_c = J \frac{d(\Delta\omega)}{dt}, \quad (2.3)$$

где J — момент инерции электропривода.

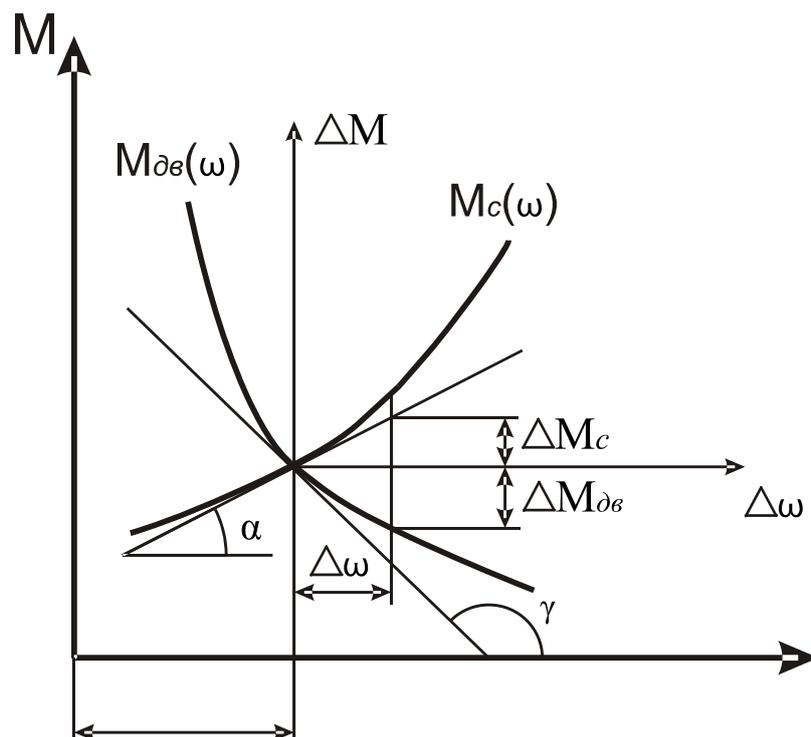


Рис. 4. К выводу критерия статической устойчивости

Поскольку отклонение угловой скорости предполагается незначительным, механические характеристики с точностью до малых второго порядка в точке равновесия можно заменить соответствующими касательными.

Выразим в формуле (2.3) моменты двигателя и рабочей машины через коэффициенты жесткости механических характеристик и приращение угловой скорости

$$\Delta M_{\delta} = \beta_{\delta}(\Delta\omega) \quad \text{и} \quad M_c = \beta_c(\Delta\omega).$$

Подставив эти значения моментов в формуле (2.3), и, вынося общий множитель за скобки, получим:

$$\Delta\omega (\beta_{\delta} - \beta_c) = J \frac{d(\Delta\omega)}{dt}$$

или

$$\frac{\beta_{\delta} - \beta_c}{J} dt = \frac{d(\Delta\omega)}{\Delta\omega}.$$

Решением этого уравнения является

$$\Delta\omega = \Delta\omega_{нач} e^{\frac{\beta_c - \beta_{\delta}}{J} t}, \quad (2.4)$$

где $\Delta\omega_{нач}$ — начальное отклонение угловой скорости.

Очевидно, что равновесие будет устойчивым в том случае, если начальное отклонение угловой скорости с течением временем уменьшается, а моменты двигателя и рабочей машины стремятся к своему равновесию. И напротив, равновесие моментов при угловой скорости ω_0 неустойчиво, если первоначальное отклонение скорости со временем будет увеличиваться. Как следует из формулы (2.4), условию устойчивости отвечает соотношение $\beta_c > \beta_{\delta}$. Это условие принято называть критерием статической устойчивости электропривода. Таким образом, электропривод статически устойчив, если коэффициент жесткости механической характеристики рабочего механизма в точке равновесия моментов больше коэффициента жесткости механической характеристики двигателя. Поскольку жесткость механических характеристик выражается через соответствующие производные, условие статической устойчивости можно записать как $tg\alpha > tg\gamma$ (рис. 4). Из этого следует, что для оценки статической устойчивости электропривода в точке равновесия моментов не обязательно вычислять производные функций. Достаточно провести в этой точке касательные к кривым механических характеристик и сравнить величину соответствующих углов.

Условия статической устойчивости можно наглядно представить на примере электропривода с асинхронным электродвигателем и рабочими органами, имеющими различные механические характеристики (рис. 5). Здесь M_{δ} — механическая характеристика асинхронного двигателя; M_{c1} — механическая характеристика подъемного механизма; M_{c2} и M_{c3} — механические характеристики центробежных вентиляторов с различными номинальными угловыми скоростями.

В точках 1, 2, 3 и 4 моменты двигателя и моменты сопротивления равны, что, в общем, предполагает работу соответствующих механизмов с постоянной скоростью. Реально же равновесия моментов будут сохраняться лишь в тех равновесных точках, в которых коэффициенты жесткости механических характеристик рабочих органов больше коэффициентов жесткости механической характеристики электродвигателя. К статически устойчивым относятся равновесия в точках 1, 3 и 4. В точке 2 угол наклона касательной к линии M_{c1} равен нулю, а угол α_2 — острый; следовательно, $\operatorname{tg} \alpha > \operatorname{tg} \gamma$ и требование критерия устойчивости не выполняется.

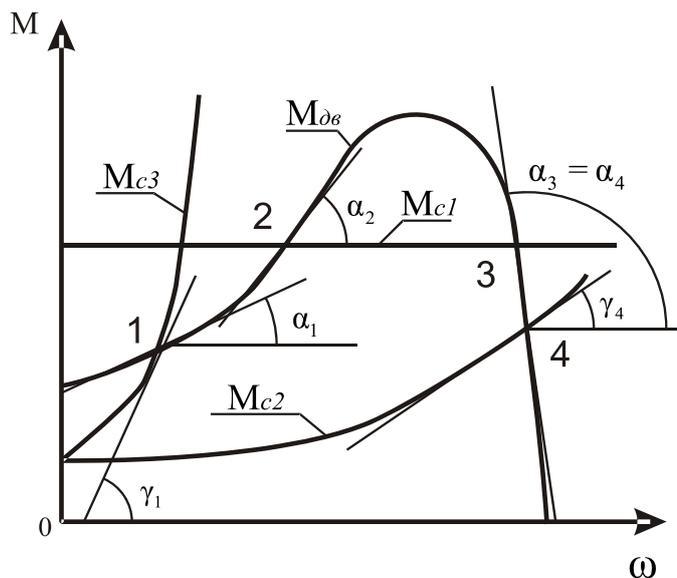


Рис. 5. К анализу статической устойчивости электропривода

2.3. Механические характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

Электродвигатели постоянного тока подразделяются по способу присоединения обмотки возбуждения к якорю на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Из курса электрических машин известно, что при установившемся режиме работы двигателей приложенное к якорной цепи напряжение уравновешивается наводимой в якоре электродвижущей силой и падением напряжения на сопротивлениях в цепи якоря. Электродвижущая сила пропорциональна угловой скорости, а электромагнитный момент пропорционален току якоря, т.е.

$$U = E + I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}}), \quad (2.5)$$

$$E = c\Phi\omega, \quad (2.6)$$

$$M = c\Phi I_{\text{я}}, \quad (2.7)$$

где U — напряжение, подведенное к якорной цепи двигателя, В;
 $I_{\text{я}}$ — ток, протекающий по обмотке якоря, А;
 E — электродвижущая сила, наводимая в обмотке якоря, В;
 M — электромагнитный момент двигателя, Нм;
 $r_{\text{я}}$ — сопротивление обмотки якоря, Ом;
 $R_{\text{д}}$ — добавочное сопротивление в цепи обмотки якоря, Ом;
 c — конструктивная постоянная обмотки якоря;
 Φ — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, Вс;
 ω — угловая скорость двигателя, с^{-1} .

Подставим значение э.д.с. из выражения (2.6) в (2.5) и решим его относительно тока якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U - c\Phi\omega}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}. \quad (2.8)$$

Полученное выражение представляет собою зависимость тока от угловой скорости, которое принято называть скоростной или электромеханической характеристикой двигателя постоянного тока. Умножив обе части выражения (2.8) на $c\Phi$, получим зависимость момента, развиваемого двигателем от угловой скорости, называемую механической характеристикой

$$M = \frac{Uc\Phi}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} - \frac{(c\Phi)^2}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} \omega. \quad (2.9)$$

Отсюда следует, что уравнения скоростных и механических характеристик в общем виде справедливы для двигателей постоянного тока всех систем возбуждения. Свойства характеристик отдельных типов двигателей определяются схемой присоединения обмотки возбуждения.

На рисунке 6 представлена принципиальная электрическая схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения. В этой схеме обмотка якоря M и обмотка возбуждения OB получают питание от различных, независимых друг от друга источников, что позволяет регулировать напряжение на каждой из обмоток в отдельности и выполнять их на разные номинальные напряжения. При отсутствии независимых источников питания, обе обмотки могут присоединяться к одному источнику по схеме параллельного включения; такой двигатель называется двигателем параллельного возбуждения. В обоих случаях токи в обмотках возбуждения $I_{\text{в}}$ не зависят от токов, протекающих по обмоткам якоря $I_{\text{я}}$. Следовательно, если учесть, что электродвигатели снабжены компенсационными обмотками и реакция якоря не оказывает существенного влияния, магнитный поток у обоих типов этих машин можно принять постоянным, не зависящим от тока нагрузки, а их механические и скоростные характеристики одинаковыми.

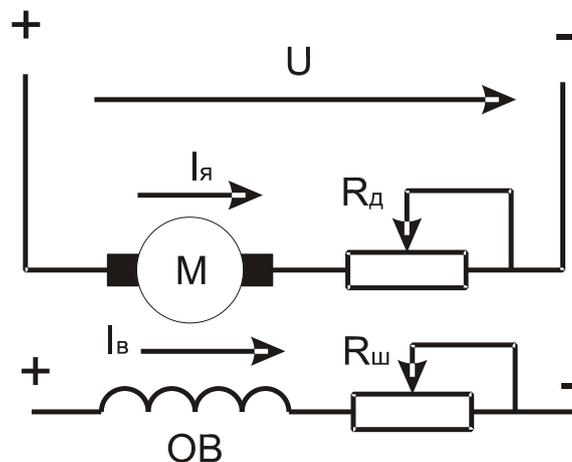


Рис. 6. Принципиальная схема ДПТ независимого возбуждения

При постоянных значениях напряжения сети, сопротивления цепи обмотки якоря, тока возбуждения и магнитного потока уравнение (2.8) можно представить как

$$I = A - B\omega,$$

где $A = \frac{U}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}$ и $B = \frac{c\Phi}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}$ — постоянные коэффициенты.

Соответственно выражение (2.9) при тех же условиях можно представить как

$$M = A^1 - B^1\omega,$$

где $A^1 = \frac{Uc\Phi}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}$ и $B^1 = \frac{(c\Phi)^2}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}$ также постоянные коэффициенты.

Из полученных выражений следует, что моменты и токи этих двигателей являются линейными функциями угловой скорости, поэтому их механические и электромеханические характеристики представляют собою прямые линии, а наличие свободного члена в уравнениях свидетельствует о том, что эти характеристики не проходят через начало координат. Графики этих характеристик можно совмещать, т.к. они отличаются между собою лишь масштабом оси ординат на величину $c\Phi$. Вторым свойством, присущим естественным скоростным и механическим характеристикам этих двигателей, является их большая жесткость. Так, если выражения (2.8) и (2.9) решить относительно угловой скорости, приняв $R_{\text{д}} = 0$, можно получить зависимость угловой скорости от нагрузки как:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{\text{я}}}{c\Phi} I_{\text{я}} \quad \text{и} \quad \omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{\text{я}}}{(c\Phi)^2} M.$$

Расчеты показывают, что при изменении нагрузки от нуля до номинальной (на 100%) скорость изменяется всего лишь на 3-6% от номинальной. Большее изменение скорости у двигателей меньшей мощности, у двигателей большой мощности изменение скорости меньше.

2.3.1. Искусственные характеристики ДПТ НВ

Механические и электромеханические характеристики двигателей при номинальных параметрах (номинальном напряжении, номинальном магнитном потоке и отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря) называются естественными. При изменении любого из этих параметров характеристики приобретают новые свойства и называются искусственными.

Искусственные характеристики при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря. При введении добавочного сопротивления в цепь якоря выражение (2.9) можно записать как

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{(c\Phi)^2} M. \quad (2.10)$$

Здесь сомножитель при моменте есть коэффициент, который характеризует собою угол наклона механической характеристики к положительному направлению оси скорости. Отсюда следует, что угловая скорость двигателя состоит из двух слагаемых. Первая из них, называемая скоростью идеального холостого хода, может быть достигнута при отсутствии нагрузки на валу двигателя и момента сопротивления трения (идеальный холостой ход, $M = 0$):

$$\omega_o = \frac{U}{c\Phi}. \quad (2.11)$$

Вторая составляющая в выражении (2.10) пропорциональна нагрузке; она показывает на сколько падает скорость с увеличением нагрузки. Эта составляющая называется статическим падением (перепадом) скорости

$$\Delta\omega = \frac{(r_{я} + R_{\partial})}{(c\Phi)^2} M. \quad (2.12)$$

Таким образом, выражение (2.10) можно представить как

$$\omega = \omega_o - \Delta\omega \quad (2.13)$$

Из формулы (2.12) следует, что при определенном значении момента статический перепад скорости будет тем больше, чем больше добавочное сопротивление в якорной цепи. Такие характеристики носят название резисторных.

На рисунке 7 показаны естественная механическая характеристика при $R_{\partial} = 0$ и искусственные при $R_{\partial} > 0$, причем с увеличением сопротивления наклон характеристик увеличивается, жесткость их уменьшается и, как следует из формулы (2.13), все они пересекаются в точке идеального холостого хода ω_o .

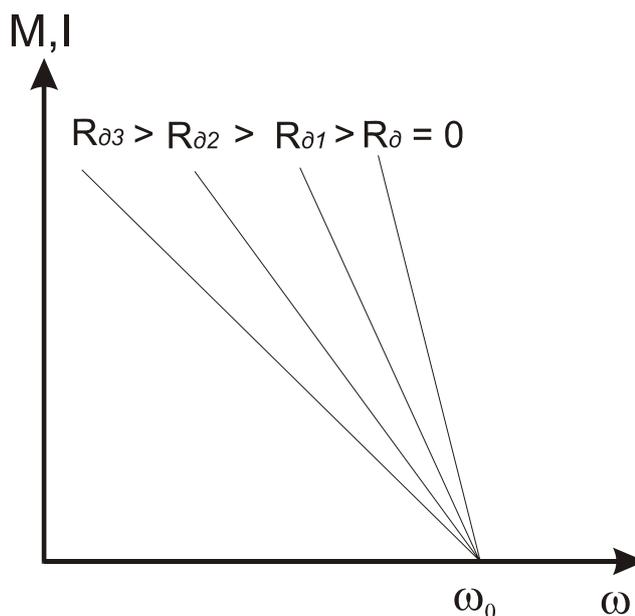


Рис. 7. Естественные и искусственные механические и скоростные характеристики ДПТ независимого возбуждения ($R = var$)

Искусственные характеристики при изменении напряжения на якоре. Из выражения (2.11) видно, что изменение подводимого к цепи якоря напряжения приводит к пропорциональному изменению скорости идеального холостого хода. Подавать на токоприемники напряжение выше номинального не принято, т.к. это может привести к негативным последствиям: увеличивается вероятность пробоя изоляции, ис-

крения щеток и др. С понижением подводимого напряжения скорость идеального холостого хода уменьшается. При этом, как следует из формулы (2.10), коэффициент при переменной (угловой коэффициент) остается неизменным, из чего следует, что характеристики смещаются в сторону уменьшения скорости, оставаясь между собою параллельными. На рисунке 8 показаны механические и скоростные характеристики этих двигателей, из которых видно, что жесткость их остается неизменной.

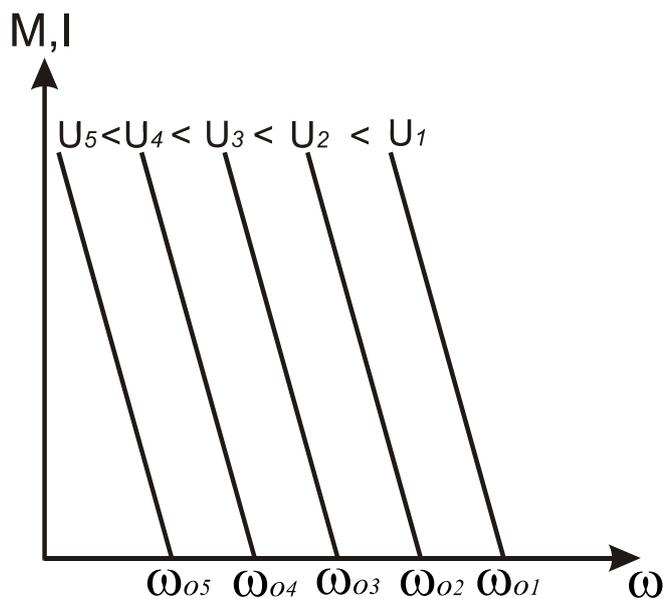


Рис. 8. Механические и скоростные характеристики ДПТ независимого возбуждения ($U = var$)

Искусственные характеристики при изменении магнитного потока. При регулировании тока возбуждения путем изменения напряжения на зажимах этой обмотки, или сопротивления $R_{ш}$ (см. рис. 6) изменяется основной магнитный поток двигателя. Величина магнитного потока считается номинальной при номинальном напряжении на зажимах обмотки возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в этой цепи. Поэтому под регулированием магнитного потока следует понимать его уменьшение. Как видно из выражения (2.8) при любом значении магнитного потока тип уравнения скоростных характеристик не изменяется, следовательно, они остаются линейными. Пусковой ток (ток при скорости, равной нулю) от величины магнитного потока не зависит, тогда как согласно формуле (2.11) скорость идеального холостого хода с уменьшением магнитного потока увеличивается. Характеристики двигателя, как показано на рисунке 9 (сплошные линии), выходят из одной точки и проходят с тем меньшим наклоном к оси абсцисс, чем меньше магнитный поток.

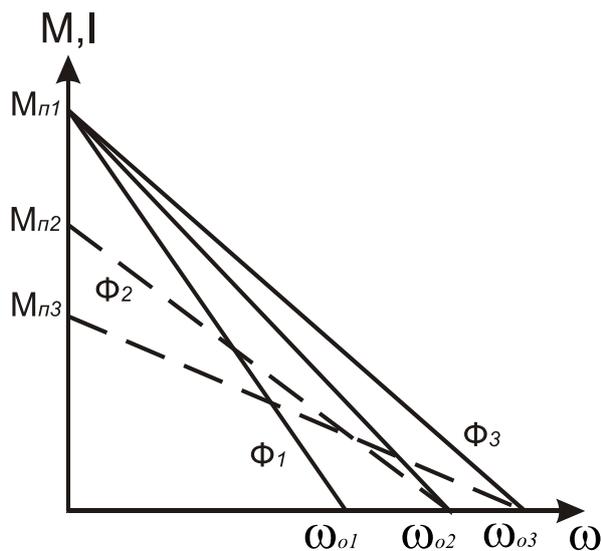


Рис. 9. Механические и скоростные характеристики ДПТ независимого возбуждения ($\Phi = var$)

Механические характеристики при изменении магнитного потока согласно (2.9) также остаются линейными. Из выражения (2.10) следует, что при моменте, равном нулю, скорость идеального холостого хода с уменьшением магнитного потока увеличивается, а пусковой момент, определяющийся как произведение неизменного пускового тока на магнитный поток, уменьшается. На рисунке 9 штриховыми линиями показаны искусственные механические характеристики при изменении магнитного потока.

2.3.2. Механические и скоростные характеристики в относительных единицах

Уравнения механических и скоростных характеристик в относительных единицах могут быть получены из уравнения (2.9). Для этого вычитаемое уравнения (2.9) умножим на отношение ω_o/ω_o :

$$M = \frac{U_n c\Phi}{r_{\text{я}} + R_o} - \frac{(c\Phi)^2}{\kappa_{\text{я}} + R_o} \omega \frac{\omega_o}{\omega_o}. \quad (2.14)$$

В выражении (2.14) произведем подстановки:

$$U_n = I_n R_n, \quad c\Phi\omega_o = U_n, \quad \frac{\omega}{\omega_o} = v.$$

Подставляя эти значения в формулу (2.14), получим:

$$M = \frac{I_n R_n c\Phi}{r_{\text{я}} + R_o} - \frac{U_n c\Phi}{r_{\text{я}} + R_o} v.$$

Учитывая, что $M_n = c\Phi I_n$, а $\rho = \frac{r_{\text{я}} + R_o}{R_n}$, можно записать:

$$M = \frac{M_n}{\rho} - \frac{M_n}{\rho} v. \quad (2.15)$$

Разделим левую и правую части этого равенства на номинальный момент. Тогда с учетом того, что $s = 1 - v$ выражение (2.15) получит вид:

$$\mu = i = \frac{s}{\rho}, \quad (2.16)$$

$$\text{или } \rho = \frac{s}{i} = \frac{s}{\mu},$$

где μ и i — соответственно относительные значения момента и тока якоря.

Таким образом, уравнения скоростной и механической характеристик в относительных единицах связывают одной и той же зависимостью моменты и токи со скоростью (скольжением) и сопротивлением цепи якоря. Из этого уравнения следует, что относительное сопротивление якорной цепи при любой нагрузке равно скольжению, соответствующему этой нагрузке, деленному на величину нагрузки, выраженную относительным током или моментом. В частном случае следует, что при работе двигателя на данной характеристике с номинальной нагрузкой (I_n, M_n , тогда $I = 1, \mu = 1$) относительное сопротивление якорной цепи численно равно скольжению.

2.3.3. Построение механических характеристик по паспортным данным

В паспорте двигателей постоянного тока приводятся основные номинальные величины: мощность — P_n , напряжение — U_n , ток — I_n , частота вращения — n_n , к.п.д. — η_n . Ввиду линейности характеристик этих двигателей для их построения достаточно иметь координаты двух точек, которые легко вычисляются по паспортным данным. Такими координатами для построения естественных характеристик являются: M_n, ω_n и $M=0, \omega_o$.

Координаты первой точки вычисляются из соотношений:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} \quad \text{и} \quad M_n = \frac{P_n}{\omega_n}.$$

Для построения второй точки скорость идеального холостого хода можно найти, воспользовавшись выражением (2.11):

$$\omega_o = \frac{U_n}{c\Phi}.$$

Значение $c\Phi$ вычисляется из уравнения скоростной характеристики (2.8), если принять входящие в него величины номинальными, а добавочные сопротивления равными нулю:

$$c\Phi = \frac{U_n - I_n r_y}{\omega_n}.$$

Здесь r_y — сопротивление обмотки якоря, которое вычисляется, исходя из предположения, что при номинальной нагрузке потери в обмотке якоря (потери в меди) приблизительно равны половине общих потерь в двигателе:

$$\Delta P_m = 0,5 P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}. \quad (2.17)$$

С другой стороны, потери в меди можно выразить как

$$\Delta P_m = I_n^2 r_y.$$

Приравнивая между собою правые части этих выражений, находим

$$r_y = 0,5 R_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}.$$

Резисторные искусственные характеристики строятся по координатам точек: $M=0, \omega_o$ и M_n, ω_{ni} . Здесь ω_{ni} — угловая скорость при номинальном моменте и i -ом добавочном сопротивлении определяется из выражения (2.10).

Аналогичным образом, используя выражение (2.10), строятся искусственные механические характеристики при изменении напряжения и магнитного потока.

2.3.4. Тормозные режимы ДПП независимого возбуждения

Роль электродвигателей в современном электроприводе далеко не исчерпывается их способностью к преобразованию электрической энергии в механическую с целью приведения в движение исполнительных органов рабочих машин. Современное производство нуждается в средствах торможения не менее, чем в средствах для осуществления движения. Возможность быстрой и плавной остановки рабочей машины, удержание частоты вращения в определенных пределах, нагрузочное устройство при испытаниях двигателей внутреннего сгорания, остановка механизма в заданном месте или в заданное время — вот далеко не полный перечень направлений, в которых электродвигатель выступает в качестве средства торможения. Трудно назвать устройства и механизмы, в которых электродвигатели не использовались бы в тормозных режимах. Не будет большим преувеличением утверждение, что все современные металлообрабатывающие станки оснащены средствами электрического торможения. В подъемных кранах, шахтных подъемниках, лифтах используются тормозные режимы электродвигателей при спусках грузов с заданной скоростью и остановках в заданном месте. Электрифицированный транспорт применяет тормозные режимы тяговых электродвигателей для ограничения скорости на спусках и для остановок. Возможность использования приводных электродвигателей для торможения освобождает от необходимости применять какие-либо специальные средства. Это значительно упрощает конструкцию приводов, повышает их надежность и производительность, безопасность и экономичность, улучшает качество выпускаемой продукции.

В основе работы электродвигателей в тормозных режимах лежит принцип обратимости электрических машин. При работе любой электрической машины в ней одновременно присутствует принцип двигателя и генератора. То, какое из этих двух начал проявляется в каждом конкретном случае, зависит от величины и направления угловой скорости вала электрической машины. Благодаря этому принципу, машина легко переходит из преобразователя электрической энергии в механическую (двигательный режим), к преобразователю механической энергии в электрическую (генераторный режим). Говоря о тормозных режимах электродвигателей, следует четко представлять их отличие от режимов двигательных: в двигательном режиме направление вращающего момента совпадает с направлением угловой скорости (момент и скорость имеют одинаковые знаки), в тормозном режиме их направления взаимно противоположны. В соответствии с этим на координатной плоскости в первом и третьем квадрантах изображаются механические и скоростные характеристики двигательных режимов, а во втором и четвертом квадрантах — характеристики тормозных режимов.

По способу получения, диапазону изменения скорости при торможении, направлению энергетических потоков различают три типа тормозных режимов электродвигателей: генераторный тормозной режим с отдачей электрической энергии в сеть (рекуперативный тормозной ре-

жим); генераторный тормозной режим с отдачей электрической энергии автономному потребителю (динамический тормозной режим); генераторный тормозной режим с отдачей энергии сопротивлению, включенному последовательно с сетью (торможение противовключением).

Генераторный тормозной режим с отдачей электрической энергии в сеть. При рассмотрении тормозных режимов условимся положительное направление скорости принимать за прямое вращение, а отрицательное — за обратное. Когда скорость двигателя положительна и меньше скорости идеального холостого хода, э.д.с. будет меньше приложенного напряжения, ток якоря и вращающий момент также положительны, т.е. направление момента совпадает с направлением скорости, следовательно, имеет место двигательный режим. Этот режим характеризуют соотношения:

$$\omega_i > \omega > 0; \quad E < U; \quad I = \frac{U - E}{R} > 0; \quad M > 0; \quad P = UI > 0.$$

При этом мощность двигателя также положительна, т.е. электрическая энергия подводится из сети к двигателю, что свойственно для двигательного режима работы.

Если к валу двигателя, включенного для работы в двигательном режиме, будет приложен положительный момент со стороны исполнительного механизма, то под действием этих двух моментов скорость двигателя станет увеличиваться. С увеличением скорости увеличивается э.д.с. и снижается ток якоря. По достижении двигателем скорости идеального холостого хода э.д.с. станет равной приложенному напряжению, а ток, момент и мощность двигателя будут равны нулю.

Под действием момента со стороны исполнительного механизма скорость двигателя становится больше скорости идеального холостого хода, а э.д.с. больше приложенного напряжения. Ток в цепи якоря, согласно формуле (2.8), изменяет свое направление, следовательно, направление момента двигателя и мощности изменятся на противоположное. Если в двигательном режиме момент и мощность были положительными, то теперь их знак становится отрицательным. Отрицательный знак момента при положительной скорости говорит о его тормозном характере, а смена знака у мощности — о том, что двигатель отдает электрическую энергию в сеть, т.е. о его генераторном режиме. Дальнейшее увеличение скорости происходит до наступления равенства тормозного момента двигателя и момента исполнительного механизма. Этот режим характеризуется соотношениями:

$$\omega > \omega_0; \quad E > U; \quad I = \frac{U - E}{R} < 0; \quad M < 0; \quad P = UI < 0.$$

Поскольку уравнения механических и скоростных характеристик при этом не меняются, их графики, как и в двигательном режиме, остаются линейными и при положительном знаке скорости идеального холостого хода переходят из первого в четвертый квадрант (рис. 10).

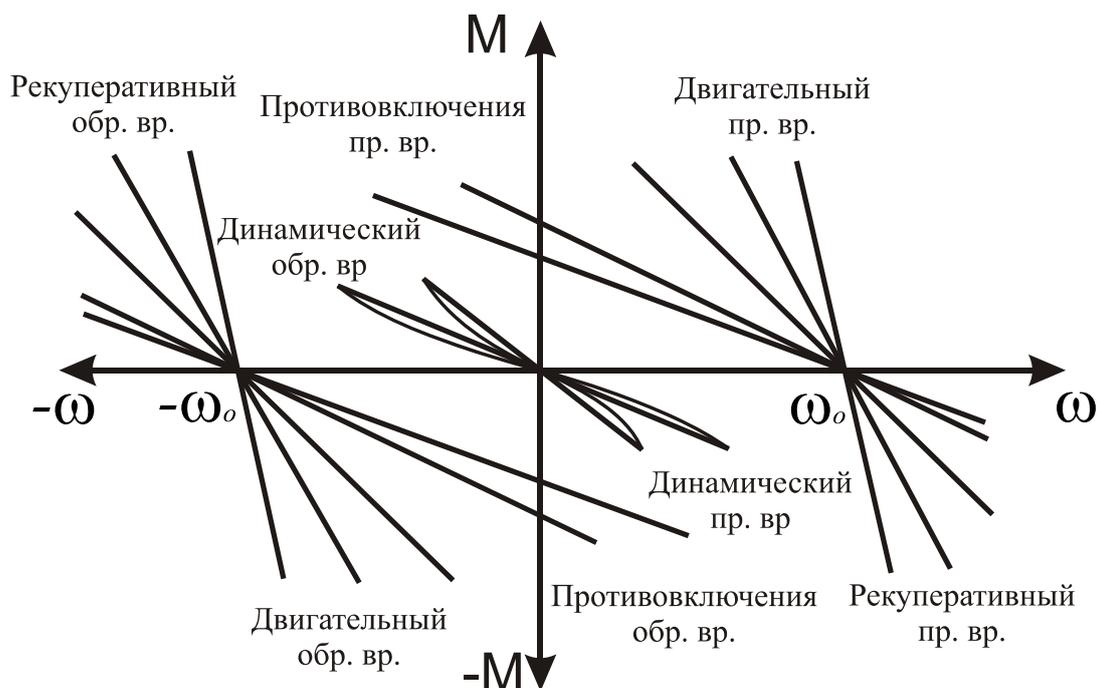


Рис. 10. Механические характеристики тормозных режимов ДПТ НВ

Таким образом, для того, чтобы двигатель перешел из двигательного режима в рекуперативный тормозной, достаточно увеличить его угловую скорость выше скорости идеального холостого хода. В этом тормозном режиме двигатели могут работать как на естественных, так и на искусственных характеристиках, то есть характеристики тормозного режима являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима. Согласно формуле (2.10), наклон (жесткость) механических характеристик определяется множителем второго члена уравнения $(r_{\text{я}} + R_{\text{д}}) / (c\Phi)^2$, который по абсолютному значению (при заданном сопротивлении $R_{\text{д}}$) остается неизменным. Поскольку электрические машины являются реверсивными, при обратном вращении, как показано на рисунке 10, характеристики двигательного режима располагаются в третьем, а рекуперативного тормозного во втором квадрантах. Этот способ торможения возможен, например, в приводах транспортных и подъемных механизмов при спуске груза, при некоторых способах регулирования скорости. Так, при понижении напряжения, пока двигатель переходит от высшей скорости ω_{01} к низшей ω_{02} , он работает в тормозном режиме пока $\omega > \omega_{02}$. Этот тормозной режим является весьма экономичным, поскольку он не связан с возникновением дополнительных потерь (за вычетом обычных потерь в двигателе) и сопровождается отдачей электрической энергии в сеть.

Динамический тормозной режим. При работе в двигательном режиме на естественной характеристике с нагрузкой M_c в точке статического равновесия I (рис. 11, б) угловая скорость якоря меньше скорости идеального холостого хода, а э.д.с. меньше приложенного к якорю напряжения. Согласно формулам (2.8) и (2.9), ток в якоря и развиваемый двига-

телем момент имеют положительные знаки. Если при этом обмотку якоря отсоединить от источника питания и замкнуть на внешнее сопротивление $R_{вн}$ (рис. 11, а), образуется схема генератора с независимым возбуждением. При вращении якоря под действием э.д.с. ток в якоре изменит свое направление. Момент, развиваемый двигателем, становится отрицательным, т.е. тормозным, а его начальное значение в зависимости от величины внешнего сопротивления $R_{вн}$ будет соответствовать точкам 2, 3 и т.д. Под действием этого тормозного момента скорость двигателя уменьшается до нуля.

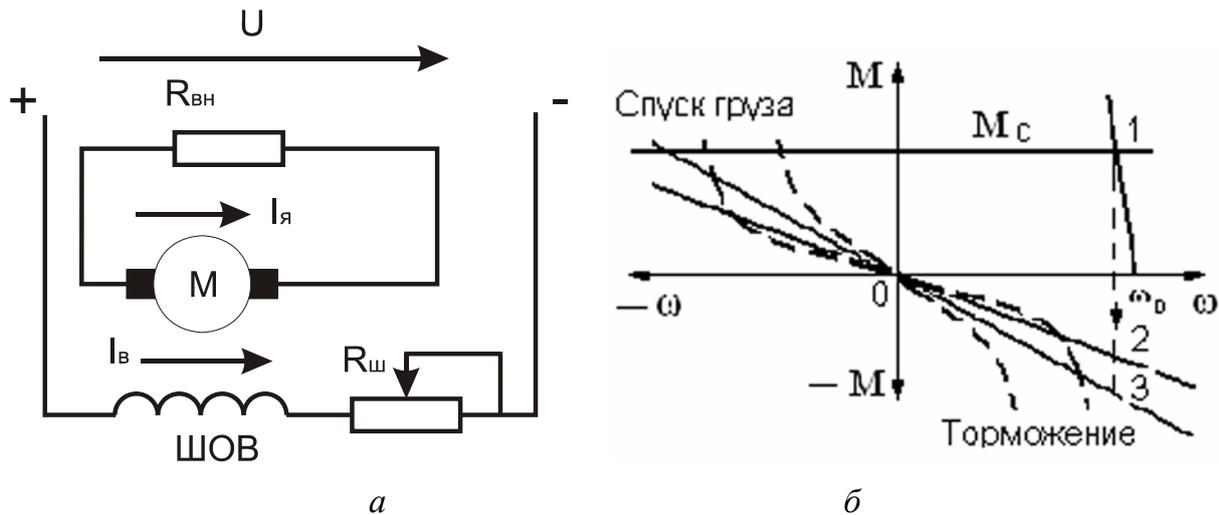


Рис. 11. Схема (а) и механические характеристики (б) динамического тормозного режима

Такой тормозной режим называется динамическим с независимым возбуждением. Механическая энергия, подводимая к валу двигателя, преобразуется вначале в электрическую, затем в тепловую на сопротивлениях якорной цепи. Параметры, определяющие работу двигателя в этом режиме, характеризуются соотношениями:

$$I_{я} = \frac{0 - c\Phi\omega}{r_{я} + R_{вн}} < 0; \quad M = c\Phi\Phi_{я} < 0; \quad P = UI < 0.$$

Подставляя значение тока в выражения момента и мощности, получаем уравнения скоростной и механической характеристик для динамического тормозного режима:

$$I = -\frac{c\Phi\omega}{r_{я} + R_{вн}}, \quad (2.18)$$

$$M = -\frac{(c\Phi)^2\omega}{r_{я} + R_{вн}}. \quad (2.19)$$

Отсюда следует, что уравнения (2.18) и (2.19) являются линейными и их графики проходят через начало координат. Наклон характеристик при постоянном магнитном потоке зависит от величины внешнего сопротивления: при $R_{вн} = \infty$ (обмотка якоря разомкнута) ток в якоре и тормозной момент отсутст-

вуют, при $R_{\text{вн}} = 0$ (обмотка якоря замкнута накоротко) характеристики тормозного режима параллельны естественным характеристикам двигательного режима. На рисунке 11, б сплошными линиями показаны характеристики динамического торможения для двигателей с независимым возбуждением при некоторых промежуточных значениях внешних сопротивлений.

Если к валу двигателя приложен момент сопротивления, направление которого не зависит от направления скорости (момент на барабане лебедки при подъеме и опускании груза), то при переходе от двигательного режима к схеме (рис. 11, а) он сначала затормаживается, а после остановки начинает вращаться в противоположном направлении, развивая тормозной момент и спуск груза с постоянной скоростью. Динамический тормозной режим возможен также по схеме с самовозбуждением, когда обмотка возбуждения также отключается от независимого источника и включается параллельно с обмоткой якоря. При этом ток в обмотке возбуждения и магнитный поток определяются величиной э.д.с., которая в свою очередь зависит от скорости:

$$I_{\text{я}} = - \frac{c\Phi}{r_{\text{я}} + \frac{r_{\text{в}} R_{\text{вн}}}{r_{\text{в}} + R_{\text{вн}}}} \omega,$$

где $r_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения.

Отрицательный знак показывает, что направление тока в обмотке якоря изменяется на противоположное, следовательно, направление тока в обмотке возбуждения и полярность магнитного потока остаются неизменными. Умножая обе части выражения для тока на $c\Phi$, получим уравнение механической характеристики для тормозного режима:

$$M = - \frac{(c\Phi)^2}{r_{\text{я}} + \frac{r_{\text{в}} R_{\text{вн}}}{r_{\text{в}} + R_{\text{вн}}}} \omega.$$

Эти характеристики, представляют собою сложные зависимости токов и тормозных моментов от скорости из-за нелинейной зависимости насыщения стали сердечников. На рисунке 11, б они показаны штриховыми линиями.

Динамическое торможение широко используется для останова привода при отключении его от сети, при спуске грузов в подъемных механизмах. Оно достаточно экономично, хотя и уступает в этом отношении генераторному торможению с отдачей энергии в сеть.

Тормозной режим противовключением. Режимом противовключения электродвигателя вообще называется режим, при котором напряжение и э.д.с. якоря совпадают по направлению. Такой режим возможен в том случае, если якорь двигателя принудительно приводится во вращение в сторону, противоположную его включению.

Если двигатель работает на приводе подъемной лебедки, то при работе на естественной характеристике равновесие моментов двигателя и лебедки будет при положительной скорости двигателя ω_1 (рис 12, а). В якоре протекает ток I_c , необходимый для создания момента двигателя, равного моменту сопротивления (точка 1 на рис. 12, а):

$$I_c = \frac{U - c\Phi\omega_1}{r_a}. \quad (2.20)$$

При введении в цепь якоря добавочного сопротивления ток уменьшается и момент двигателя становится меньше момента сопротивления (точка 2 на рис. 12, а), в результате чего скорость двигателя и э.д.с. якоря уменьшаются до нуля в точке 3. Но и в этом случае ток недостаточен для создания необходимого вращающего момента. Поэтому якорь под действием груза начинает вращаться в обратную сторону и его скорость достигает величины ω_2 , при которой сумма напряжения и э.д.с., обеспечивает величину тока, необходимую для создания момента двигателя, равного моменту сопротивления (точка 4). С момента, когда скорость становится отрицательной, наступает режим торможения противовключением. Таким образом, на участке механической характеристики 2-3 (рис. 12, а) режим двигательный, на участке 3-4 режим тормозной противовключением. Как следует из приведенных графиков, механические характеристики тормозного режима противовключением являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима.

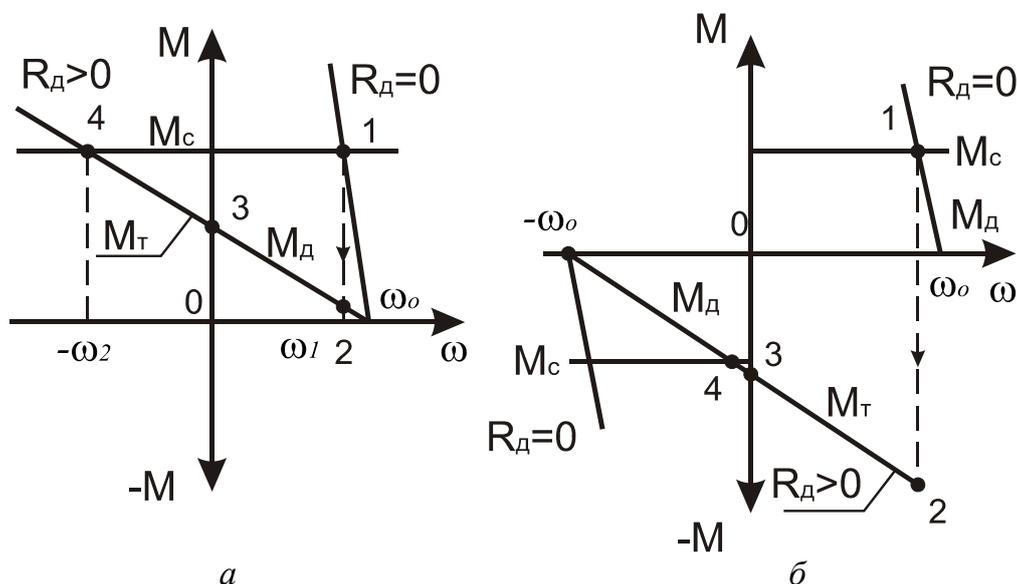


Рис. 12. Механические характеристики ДПТ НВ
в режиме торможения противовключением:
а — при спуске груза на резисторной характеристике;
б — при торможении реверсированием

Тормозной режим противовключением возможно получить также путем изменения полярности включения обмотки якоря (или обмотки возбуждения) работающего двигателя. Если при работе в двигательном режиме (точка 1

на рис. 12, б) произойдет изменение полярности на зажимах якоря, то за счет запаса кинетической энергии в момент переключения двигатель будет продолжать вращаться в прежнем направлении, тогда как ток и момент изменят свои знаки на противоположные. Момент двигателя из двигательного режима в точке 1 переходит в точку 2 и становится тормозным. В тормозном режиме противовключением двигатель работает до остановки в точке 3, после чего, если его не отключить, он переходит в двигательный режим обратного вращения. Таким образом, на участке 2 – 3 механической характеристики двигатель работает в режиме торможения противовключением, на участке 3 – 4 и до скорости $-\omega_0$ — в двигательном режиме обратного вращения. Такой способ носит название торможение реверсированием.

При переходе из точки 1 в точку 2 величина тока в обмотке якоря будет определяться суммой напряжения и э.д.с. и сопротивлением якорной цепи. Для ограничения тока и момента допустимыми пределами при реверсировании двигателя необходимо в цепь якоря вводить добавочные сопротивления. В противном случае могут возникнуть сильное искрение на щетках и динамические удары, приводящие к преждевременному выходу из строя двигателя и передаточных устройств.

Следует иметь в виду, что торможение противовключением связано с большими электрическими потерями. Так, на основании уравнения баланса напряжений якорной цепи для этого режима, можно записать:

$$U + E = I_a(r_a + R_d).$$

Умножив обе части этого выражения на ток якоря, получим баланс мощностей:

$$I_a U + I_a E = I_a^2 (r_a + R_d)$$

Левая часть этого выражения представляет собою сумму электрической мощности, подведенной к двигателю из сети, и механической, подведенной со стороны вала. Вся эта мощность преобразуется в тепло на сопротивлениях цепи якоря.

Торможение противовключением обычно применяется в приводах подъемно-транспортных машин для спуска грузов и торможения на уклонах. Для реверсивных приводов, где торможение и пуск двигателя в обратном направлении представляют собой единый процесс, целесообразно применять торможение реверсированием, которое дает выигрыш во времени.

Литература: [2, с. 27-35; 4, с. 118-121; 6, с. 47-52; 10, с. 48-65].

2.3.5. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений

Как отмечалось ранее, естественные механические и электромеханические характеристики двигателей постоянного тока параллельного возбуждения в двигательном и тормозных режимах, благодаря малым сопротивлениям якорных обмоток, обладают высокой жесткостью, поэтому при скорости, равной и близкой к нулю, токи и моменты достигают больших величин, во много раз превосходящих их номинальные

значения. Чрезмерные величины токов и моментов вредно сказываются на работе двигателей т.к. могут привести к повышенному искрению щеток, вплоть до появления кругового огня, разрушению обмоток двигателя, срезанию шпонок и шлицев, скручиванию валов и т.д. Поэтому пуск и торможение этих двигателей осуществляются при введении в цепь якоря добавочных (пусковых) сопротивлений, ограничивающих величины пусковых токов и моментов. По мере разбега двигателя ток якоря уменьшается вследствие увеличения противо-э.д.с. и пусковые сопротивления постепенно отключаются. После отключения последней ступени двигатель выходит на естественную характеристику. Изменение тока в процессе пуска двигателя показано на диаграмме (рис. 13), которая называется пусковой диаграммой. Количество ступеней сопротивлений, а также пределы изменения тока в процессе пуска зависят от требований, предъявляемых рабочей машиной к двигателю. Если рабочая машина допускает большие ускорения и существенное их изменение при пуске, то пределы изменения тока могут быть значительными, а количество ступеней пускового сопротивления будет невелико. Для рабочих машин, требующих плавного нарастания скорости, диапазон колебания пусковых токов и моментов должен быть небольшим, что ведет к увеличению числа ступеней пусковых резисторов.

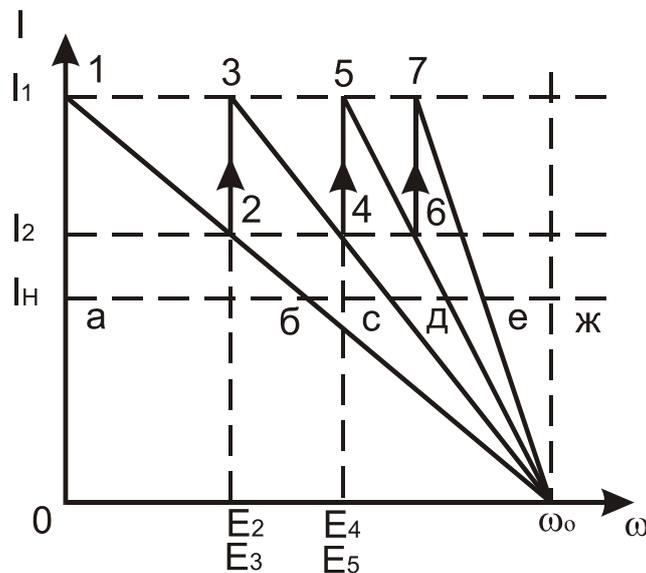


Рис. 13. Пусковая программа ДПТ НВ

Расчет сопротивлений предусматривает определение полного добавочного сопротивления, числа ступеней и сопротивления каждой ступени пускового резистора. При этом необходимо соблюдать условия, чтобы токи в процессе пуска изменялись в пределах от I_1 до I_2 и после отключения последней ступени обеспечивался выход на естественную характеристику при токе I_1 .

При отсутствии особых условий значения токов I_1 и I_2 обычно принимаются:

$$I_1 = (2,0 \dots 2,5)I_i, \quad I_2 = (1,1 \dots 1,3)I_i.$$

Расчет пусковых и тормозных сопротивлений двигателей постоянного тока параллельного и независимого возбуждения может выполняться аналитическим и графическим методами.

Аналитический метод. Как следует из пусковой диаграммы (см. рис. 13), при скорости, равной нулю, пусковой ток якоря равен максимальному I_1 . Когда при разбеге ток достигнет значения I_2 (ток переключения), происходит отключение ступени пускового резистора, в результате чего ток снова увеличивается до значения I_1 , и так до выхода на естественную характеристику в точке 7.

На рисунке 14 приведена схема пуска двигателя, на которой изображены ступени пускового резистора, отключаемые путем их шунтирования контактами KM_1, KM_2 и т.д. Сопротивления ступеней обозначены малыми буквами латинского алфавита $r_1, r_2 \dots r_m$, а сопротивления обмотки якоря со ступенями пускового резистора большими буквами $R_m, R_{m-1} \dots R_1$. Здесь m — число ступеней пускового резистора.

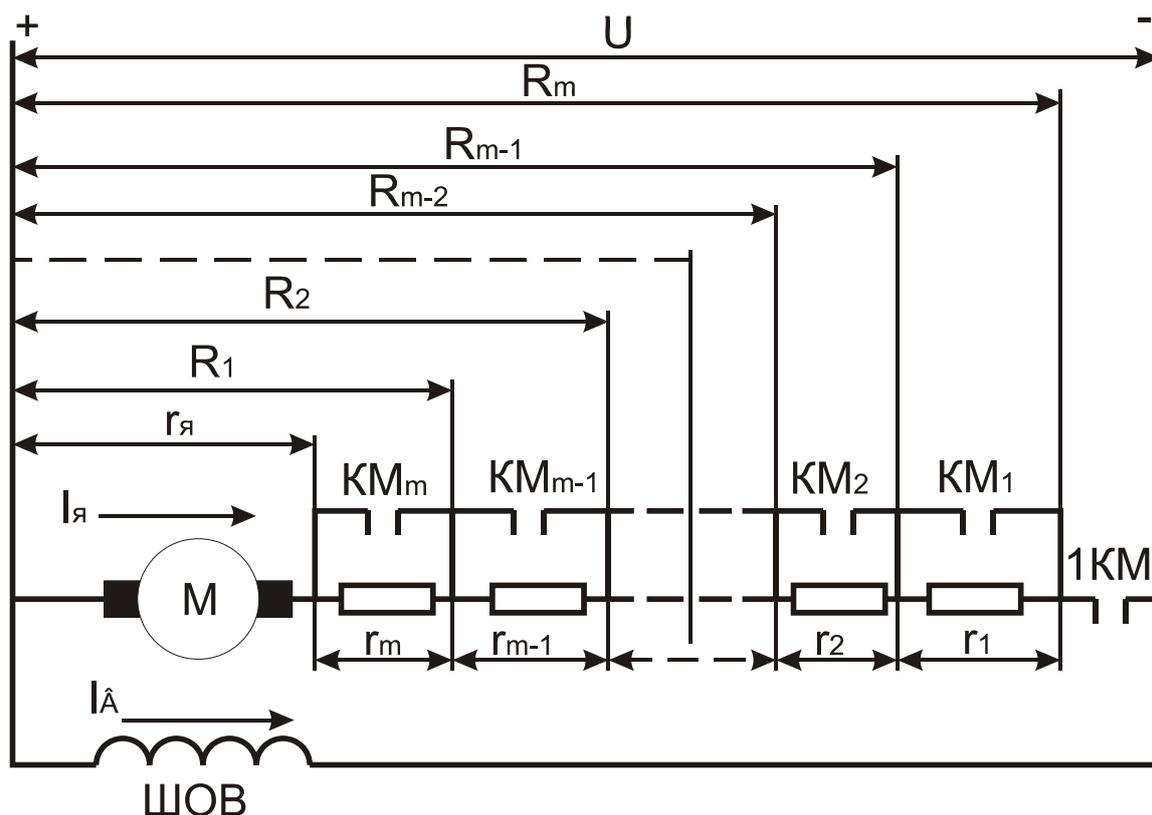


Рис. 14. Схема пуска ДПТ параллельного возбуждения

Полное сопротивление якорной цепи при пуске, когда скорость и э.д.с. равны нулю, находим как

$$R_m = \frac{U}{I_1}.$$

Пусковые токи в точках 2 и 3 пусковой программы:

$$I_1 = \frac{U - E_3}{R_{m-1}} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{U - E_2}{R_m},$$

где E_2 и E_3 — э.д.с. якоря в указанных точках; они между собою равны, поскольку определяются одной и той же скоростью.

Используя значения этих токов, найдем их кратность

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U - E_3}{R_{m-1}}}{\frac{U - E_2}{R_m}} = \frac{R_m}{R_{m-1}}.$$

Аналогичным образом можно записать значения пусковых токов и их кратность для точек 4 и 5, 6 и 7 и далее для всех точек пусковой диаграммы, соответствующих отключению ступеней пусковых сопротивлений:

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_m}{R_{m-1}} = \frac{R_{m-1}}{R_{m-2}} = \dots = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{r_y}.$$

Из этих отношений следует, что

$$\left. \begin{array}{l} R_1 = r_y \lambda \\ R_2 = R_1 \lambda = r_y \lambda^2 \\ \dots \\ R_{m-1} = R_{m-2} \lambda = r_y \lambda^{m-1} \\ R_m = R_{m-1} \lambda = r_y \lambda^m \end{array} \right\}$$

Отсюда из выражения полного сопротивления якорной цепи определим число ступеней:

$$m = \frac{\ln \frac{R_m}{r_y}}{\ln \lambda}. \quad (2.21)$$

Если m окажется дробным, его необходимо округлить до целого числа. Округленному числу ступеней должна соответствовать новая кратность пусковых токов, которая определяется из формулы (2.21)

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_m}{r_y}} \quad (2.22)$$

В этом выражении и в дальнейших расчетах символами m и λ будем обозначать округленное число ступеней и соответствующую ему кратность пусковых токов.

Величину сопротивлений каждой ступени $r_1, r_2, \dots, r_{m-1}, r_m$, в соответствии со схемой (см. рис. 14), определим как разность между смежными сопротивлениями якорной цепи:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= R_m - R_{m-1} = r_{\text{я}} \lambda^m - r_{\text{я}} \lambda^{m-1} = r_{\text{я}} \lambda^{m-1} (\lambda - 1), \\ r_2 &= R_{m-1} - R_{m-2} = r_{\text{я}} \lambda^{m-1} - r_{\text{я}} \lambda^{m-2} = r_{\text{я}} \lambda^{m-2} (\lambda - 1), \\ &\dots\dots\dots \\ r_{m-1} &= R_2 - R_1 = r_{\text{я}} \lambda^2 - r_{\text{я}} \lambda = r_{\text{я}} \lambda (\lambda - 1), \\ r_m &= R_1 - r_{\text{я}} = r_{\text{я}} \lambda - r_{\text{я}} = r_{\text{я}} (\lambda - 1). \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Таким образом, расчет пусковых сопротивлений для двигателя постоянного тока производится в следующем порядке:

1. Определяются пусковые токи I_1 и I_2 и их кратность $\lambda = I_1 / I_2$.
2. По паспортным данным двигателя вычисляется сопротивление обмотки якоря и добавочных полюсов

$$r_{\text{я}} = 0,5 \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{ян}}} (1 - \eta_{\text{н}}),$$

где $\eta_{\text{н}}$ — номинальный к.п.д. двигателя.

3. Определяется полное сопротивление якорной цепи при пуске

$$R_m = U_{\text{н}} / I_1.$$

4. По выражению (2.21) определяется число ступеней пускового резистора, которое необходимо округлить до целого числа.

5. Используя выражение (2.22), определяется новая кратность пусковых токов, соответствующая целому числу ступеней. При этом значении кратности пусковых токов определяется фактическое значение тока переключения I_2 .

6. По соотношениям (2.23) рассчитываются сопротивления ступеней пускового резистора.

В тормозных режимах, как правило, применяются сопротивления с одной ступенью. Для их расчета должны быть заданы параметры торможения: режим торможения, тормозной ток (или момент) и скорость.

При генераторном торможении добавочное сопротивление определяется из выражения:

$$R_{\text{рек}} = \frac{U - c\Phi\omega_{\text{рек}}}{I_{\text{рек}}} - r_{\text{я}}, \quad (2.24)$$

где $I_{\text{рек}}$ — ток при торможении, задается с отрицательным знаком;
 $\omega_{\text{рек}}$ — угловая скорость при торможении.

При динамическом торможении сопротивление торможения определится из выражения (2.24) при напряжении в числителе, равном нулю

$$R_{\partial} = \frac{|-c\Phi\omega_{\partial}|}{I_{\partial}} - r_{я}.$$

Здесь при определении полного сопротивления якорной цепи принимается абсолютное значение дроби.

Сопротивление торможения противовключением определяется из выражения (2.24) с учетом отрицательного знака скорости

$$R_{np} = \frac{U - c\Phi(-\omega_{np})}{I_{np}} - r_{я}.$$

Графический метод расчета пусковых и тормозных сопротивлений является более наглядным по сравнению с аналитическим, однако требует больших затрат времени для построения пусковой диаграммы, отвечающей поставленным условиям. Точность полученных результатов в значительной степени зависит от точности и тщательности выполнения графических работ. Этот метод основан на том, что, как было показано ранее, на линии номинального тока двигателя относительное сопротивление якорной цепи численно равно скольжению $\rho = s$ для любой скоростной характеристики. Расчет следует начинать с построения пусковой диаграммы (см. рис. 13) при заданных значениях токов I_1 и I_2 . Если при первом варианте построения не удастся выйти на естественную характеристику при токе I_1 , необходимо изменять значение тока I_2 и повторять построения пусковой диаграммы до выполнения этого условия.

Из пусковой диаграммы следует, что при работе на естественной характеристике отрезок прямой $eж$ на линии номинального тока соответствует в определенном масштабе номинальному скольжению и, следовательно, относительному сопротивлению обмотки якоря. Отрезок $бж$ соответствует скольжению при полном пусковом сопротивлении. Он же численно равен относительному сопротивлению якорной цепи при этом сопротивлении. Поскольку отрезок $eж$ — это относительное сопротивление обмотки якоря, то отрезок $бе$ есть относительное сопротивление пускового резистора. При отключении первой ступени сопротивления и переходе двигателя на вторую пусковую характеристику отрезок $се$ выражает добавочное сопротивление якорной цепи без первой ступени, отрезок $де$ — без второй ступени и т.д. Отсюда следует, что относительные сопротивления отдельных ступеней пускового резистора выражаются отрезками прямой на линии номинального тока, заключенными между смежными пусковыми характеристиками: сопротивление первой ступени — между первой и второй пусковыми характеристиками, второй ступени — между второй и третьей и т.д.

Для того, чтобы найти абсолютные величины ступеней сопротивлений необходимо определить масштаб. Относительное сопротивление, равное единице, как отмечалось в главе 1, соответствует номинальному сопротив-

лению в цепи якоря. Оно же численно равно скольжению при неподвижном якоре. Таким образом, на пусковой диаграмме (см. рис. 13) в отрезке от 0 до ω_o содержится относительное сопротивление, равное единице, или номинальное сопротивление в абсолютных единицах. Разделив это сопротивление на отрезок $0 - \omega_o$, находим масштаб сопротивления

$$m_r = \frac{R_n}{0 - \omega_o}, \text{ Ом/м.}$$

Тогда сопротивления ступеней пускового резистора, согласно диаграмме (рис. 13), находим как:

$$r_1 = m_r bc, \quad r_2 = m_r cd, \quad r_3 = m_r de.$$

В основе графических методов расчета добавочных сопротивлений для тормозных режимов используется положение, согласно которому при неизменных сопротивлениях якорной цепи характеристики этих режимов являются продолжением соответствующих характеристик двигательных режимов или проходят параллельно им через начало осей координат. Так характеристики генераторного режима с отдачей энергии в сеть являются продолжением характеристик двигательного режима при увеличении угловой скорости выше скорости ω_o , характеристики торможения противовключением — это продолжение характеристик двигательного режима при изменении направления скорости, характеристики динамического торможения проходят через начало осей координат параллельно характеристикам двигательного режима при соответствующих сопротивлениях якорной цепи.

Для расчета сопротивлений тормозных режимов при заданных параметрах торможения (способ торможения, ток, скорость) строятся соответствующие характеристики торможения и естественные характеристики двигательного режима прямого или обратного вращения: характеристика генераторного торможения — линия fc , торможения противовключением — линия hz и динамического тормозного режима — линия ob (рис. 15).

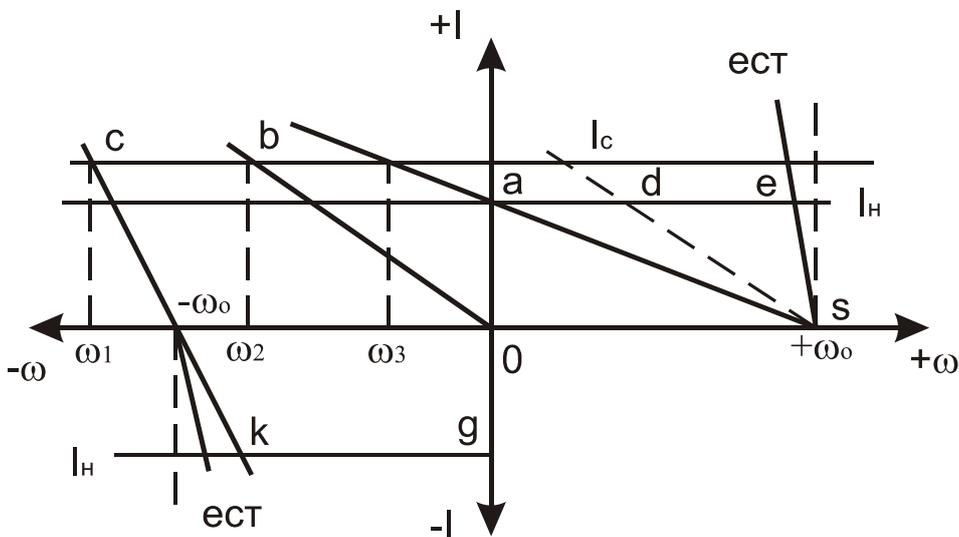


Рис. 15. К расчету тормозных сопротивлений

После этого характеристики тормозных режимов генераторного и противовключением продолжают до пересечения с линиями номинального тока. Для динамического тормозного режима проводится вспомогательная линия hd через точку ω_0 параллельно характеристике торможения до пересечения с линией номинального тока. Искомые сопротивления выражаются отрезками прямых, заключенными между точками пересечения естественных характеристик и соответствующих характеристик тормозных режимов с линиями номинального тока.

Так, при спуске груза с координатами генераторного тормозного режима $I_c, -\omega_1$ строится тормозная характеристика fc и ее продолжение fk до линии номинального тока. Искомое сопротивление выражается отрезком kg на линии номинального тока, заключенным между естественной характеристикой и продолжением характеристики тормозного режима. При спуске груза с параметрами $I_c, -\omega_2$ в режиме динамического торможения строится характеристика Ob и параллельная ей вспомогательная линия hd . Тормозное сопротивление выражается отрезком de . Характеристика при спуске груза в режиме торможения противовключением с параметрами $I_c, -\omega_3$ показана линией hz , а требуемое добавочное сопротивление определяется отрезком ae .

Литература: [2, с.35-40; 3, с.36-55].

2.4. Характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения

Отличительной особенностью двигателей последовательного возбуждения является включение обмотки возбуждения последовательно с обмоткой якоря (рис. 16) и создание основного магнитного потока этим током. При сравнительно малых нагрузках, когда сердечники двигателя не насыщены, магнитный поток пропорционален току, т.е.

$$\Phi = kI_{\text{я}}. \quad (2.25)$$

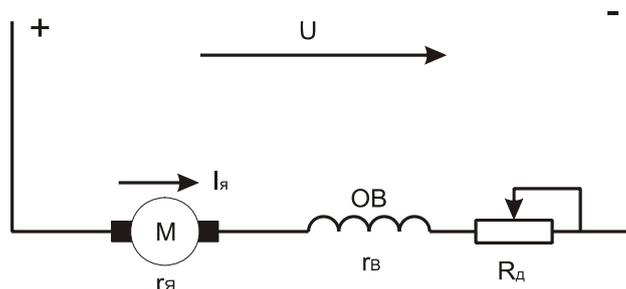


Рис. 16. Схема включения ДПТ последовательного возбуждения

Подставляя эту зависимость в выражение (2.7) для электромагнитного момента, получим:

$$M = c\Phi I_{\text{я}} = ckI_{\text{я}}^2, \quad (2.26)$$

где k — коэффициент пропорциональности между током якоря и магнитным потоком.

Как известно из курса электрических машин, допустимые нагрузки двигателей постоянного тока определяются главным образом допустимыми токами якоря, которые могут приводить к перегреву обмоток якоря и повышенному искрению щеток. Из этого следует, что двигатели последовательного возбуждения, у которых момент пропорционален квадрату тока якоря, обладают большей перегрузочной способностью, чем двигатели с параллельным возбуждением.

Уравнение скоростной характеристики этого двигателя можно получить из (2.8), выразив в нем магнитный поток через ток якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{r_{\text{я.ц}} + R_{\text{д}}} - \frac{ckI_{\text{я}}}{r_{\text{я.ц}} + R_{\text{д}}} \omega. \quad (2.27)$$

Здесь $r_{\text{я.ц}}$ — сопротивление якорной цепи, куда входит: $r_{\text{я}}$ — сопротивление обмотки якоря, $r_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения и $r_{\text{д.п}}$ — сопротивление дополнительных полюсов. В расчетах обычно принимают $r_{\text{я.ц}} \approx 1,5r_{\text{я}}$.

Решив выражение (2.27) относительно тока, получим уравнение скоростной характеристики двигателя:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{r_{\text{я.ц}} + R_{\text{д}} + ck\omega}. \quad (2.28)$$

Из этого выражения следует, что ток двигателя является гиперболической функцией угловой скорости при малых нагрузках, когда магнитный поток пропорционален току якоря. В дальнейшем, при увеличении нагрузки и насыщении сердечников зависимость тока от скорости переходит в прямую линейную.

После умножения обеих частей выражения (2.27) на $c\Phi$, получаем уравнение механической характеристики:

$$M = \frac{Uc\Phi}{r_{\text{я.ц}} + R_{\text{д}}} - \frac{(c\Phi)^2}{r_{\text{я.ц}} + R_{\text{д}}} \omega.$$

Отсюда угловая скорость:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{\text{я.ц}} + R_{\text{д}}}{(c\Phi)^2} M. \quad (2.29)$$

Подставив сюда значения магнитного потока из (2.25) и момента из формулы (2.26), после небольших преобразований получим:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{Mck}} - \frac{r_{\text{я.ц}} + R_{\text{д}}}{ck}.$$

В полученном выражении для постоянных величин введем обозначения $A_1 = \frac{U}{\sqrt{ck}}$ и $B_1 = \frac{r_{\text{я.ц}} + R_{\text{д}}}{ck}$, и решим его относительно момента:

$$M = \frac{A_1^2}{(\omega + B_1)^2}.$$

Реально величина B_1 намного меньше номинальной скорости двигателя, поэтому без большой погрешности можно принять $B_1 \approx 0$. Тогда уравнение механической характеристики запишется как:

$$M = \frac{A_1^2}{\omega^2}. \quad (2.30)$$

Отсюда следует, что механическая характеристика двигателя представляет собою квадратичную гиперболу.

Уравнения скоростной (2.28) и механической (2.30) характеристик выводились в предположении, что магнитная цепь двигателя ненасыщенна и магнитный поток пропорционален току якоря. На практике современные двигатели при нагрузках, близких к номинальным, работают в зоне насыщения магнитопроводов, линейная зависимость между током и магнитным потоком нарушается, а характеристики из гиперболических постепенно переходят в прямолинейные. Поэтому эти уравнения справедливы только при малых нагрузках и не соответствуют реальным характеристикам. Для их построения обычно используются не уравнения, а графические зависимости момента и скорости от тока якоря, выраженные в относительных единицах, приводимых в каталогах и справочниках (рис. 17).

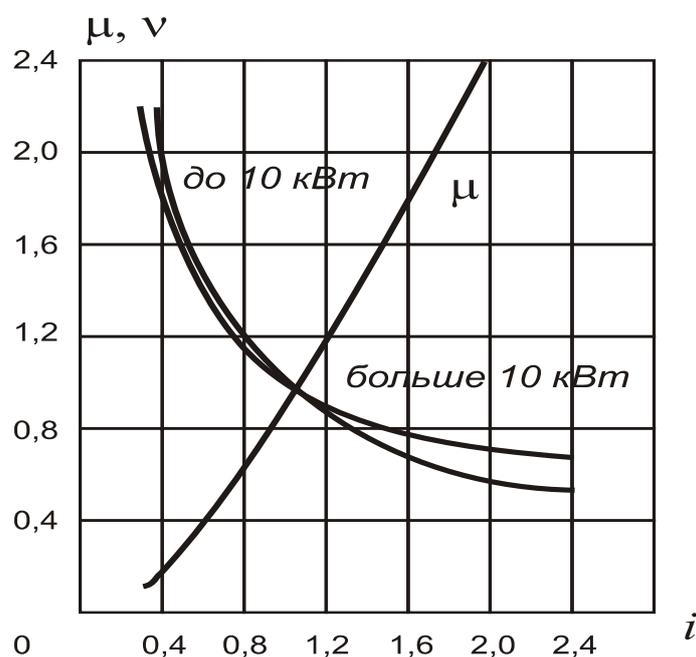


Рис. 17. Универсальные характеристики ДПП последовательного возбуждения

Эти характеристики называются универсальными, т.к. могут использоваться для широкого ряда мощностей электродвигателей. Естественные механическая $\mu = f(v)$ и скоростная $I = \varphi(v)$ характеристики двигателя последовательного возбуждения в относительных единицах представлены на рисунке 18.

Из графиков (рис. 18) видно, что при малых нагрузках механические и скоростные характеристики обладают невысокой жесткостью, т.е. при незначительном изменении нагрузки угловая скорость изменяется в широких пределах. При возрастании тока нагрузки жесткость характеристик увеличивается.

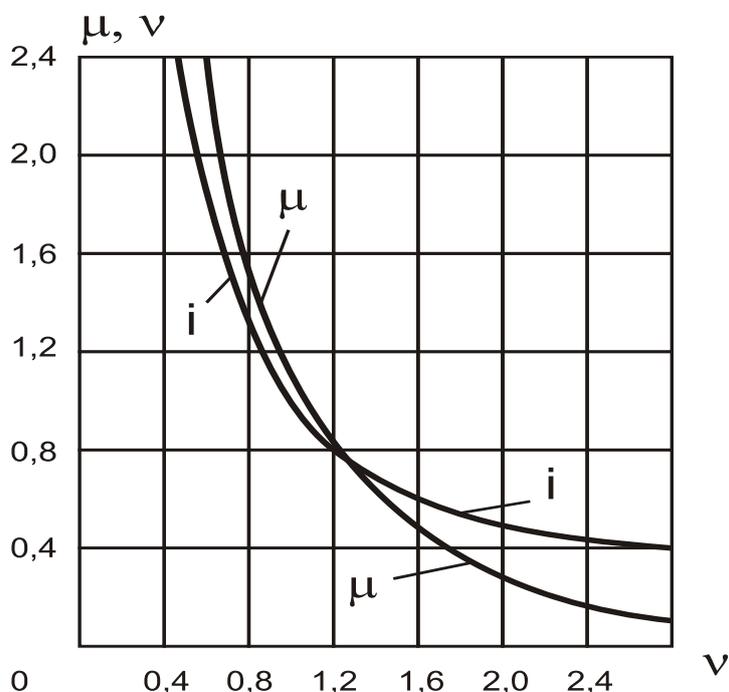


Рис. 18. Естественная механическая (μ) и скоростная (i) характеристики ДПТ последовательного возбуждения

Двигатели с такими свойствами механических характеристик находят применение в тех установках, где по роду работы не требуется постоянства скорости, но важным является преодоление больших нагрузок. В связи с этим двигатели постоянного тока последовательного возбуждения применяются в подъемно-транспортных установках: трамваях, троллейбусах, электрокарах, электропоездах и т.п.

При значительном уменьшении нагрузки (в том числе при режиме холостого хода) скорость двигателя сильно увеличивается, теоретически она стремится к бесконечности. Практически из-за механических потерь и остаточного магнетизма, он набирает скорость в 5-6 раз больше номинальной (говорят двигатель идет вразнос), что вызывает сильное искрение на коллекторе вплоть до появления кругового огня и может привести к разрушению двигателя. По этим соображениям в электроприводах с такими двигателями не разрешается применять ременные и клиноременные передачи в связи с опасностью обрыва или соскальзывания ремней; в этих приводах применяются соединения муфтами, цепные, зубчатые или червячные передачи. Не допускается также работа этих двигателей при нагрузках меньше 25% от номинальной.

2.4.1. Построение естественных и искусственных характеристик

Для построения естественных скоростных и механических характеристик используются паспортные данные и универсальные характеристики. Вначале задаются рядом значений относительных токов с требуемым шагом. Далее, по универсальным характеристикам находят относительные скорости, соответствующие принятым значениям относительных токов. Используя номинальные значения тока и скорости из паспорта данного двигателя, полученные относительные значения этих величин переводятся в абсолютные, по которым строится естественная электромеханическая характеристика. Аналогичным образом строится и механическая характеристика. Для этого при тех же значениях относительных токов по универсальным характеристикам составляется ряд относительных моментов. По номинальной мощности и скорости двигателя вычисляется номинальный момент, затем относительные значения момента переводятся в абсолютные. По полученным данным момента и скорости строится естественная механическая характеристика.

Расчет искусственных механических и скоростных характеристик по уравнениям (2.27) и (2.29) из-за непостоянства магнитного потока не представляется возможным. Учитывая, что при одном и том же значении тока якоря на естественной и искусственной характеристиках магнитный поток один и тот же, из уравнения (2.27) можно выразить угловые скорости:

на естественной характеристике

$$\omega_e = \frac{U_n - I_{я} r_{я.ц}}{c\Phi}, \quad (2.31)$$

на искусственной реостатной характеристике

$$\omega_{ur} = \frac{U_n - I_{я}(r_{я.ц} + R_d)}{c\Phi}. \quad (2.32)$$

Поделив правые и левые части выражений (2.31) и (2.32), получим уравнение скоростной искусственной характеристики при заданном добавочном сопротивлении R_d :

$$\omega_{ur} = \omega_e \frac{U_n - I_{я}(r_{я.ц} + R_d)}{U_n - I_{я} r_{я.ц}}. \quad (2.33)$$

После несложных преобразований в (2.33) нетрудно перейти от уравнения в абсолютных величинах к уравнению в относительных единицах.

Для этого разделим обе части равенства (2.33) на ω_n , числитель и знаменатель правой части разделим на U_n , а токи в числителе и знаменателе умножим на отношение R_n / R_n .

Полагая далее, что

$$\omega_{ur} / \omega_n = v_{ur}, \quad \omega_e / \omega_n = v_e, \quad U_n / I_n = R_n \text{ и } (r_{я.ц} + R_d) / R_n = \rho_{я.ц} + \rho_d,$$

окончательно можно записать

$$v_{ur} = v_e \frac{1 - i_{я}(\rho_{я.ц} + \rho_d)}{1 - i_{я}\rho_{я.ц}}. \quad (2.34)$$

Уравнения (2.33) и (2.34) позволяют строить естественные и искусственные резисторные характеристики в абсолютных и относительных единицах. При изменении напряжения в них следует принять добавочное сопротивление равным нулю и изменять подводимое напряжение. В этом случае механическая характеристика в относительных единицах принимает вид:

$$v_{ur} = v_e \frac{u - i_{я}\rho_{я.ц}}{1 - i_{я}\rho_{я.ц}}. \quad (2.35)$$

На рис. 19 показаны механические характеристики в относительных единицах: *a* — естественная и искусственные: *c* — при напряжении $0,5U_n$ и *b* — при $R_d = 2 r_{я.ц}$.

Литература: [2, с. 42-50; 3, с. 115-122; 10, с. 65-69].

2.4.2. Тормозные режимы ДПТ последовательного возбуждения

У двигателей постоянного тока последовательного возбуждения возможны два тормозных режима: динамический и противовключением. Генераторный тормозной режим невозможен, т.к. у этих двигателей отсутствует скорость, при которой электродвижущая сила превышала бы напряжение сети. В режим торможения противовключением двигатель переходит, когда за счет приложенного к валу внешнего момента, он начинает вращаться в сторону,

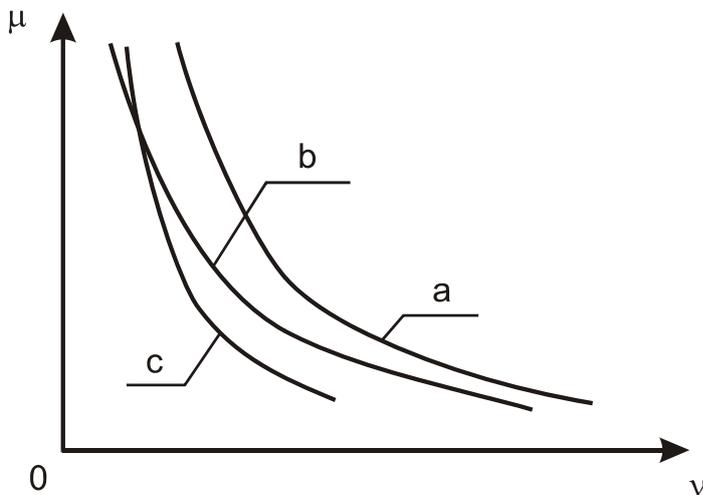


Рис. 19. Естественная и искусственные механические характеристики ДПТ последовательного возбуждения

противоположную включению. При этом для ограничения тока в цепь якоря необходимо ввести соответствующей величины добавочное сопротивление. Если принять, что двигатель нагружен постоянным, не зависящим от величины и направления скорости моментом сопротивления M_c , то при работе на естественной характеристике (кривая 1 на рис. 20) в точ-

ке a момент двигателя и скорость ω_1 имеют одинаковые знаки, что соответствует двигательному режиму. При введении в цепь якоря добавочного сопротивления двигатель перейдет на искусственную характеристику (кривая 2) в точке e . При этом момент, развиваемый двигателем, меньше момента сопротивления, в результате чего вначале происходит замедление и затем изменение направления скорости до $-\omega_2$, когда наступает равновесие моментов в точке b .

При положительном моменте скорость становится отрицательной и двигатель работает в режиме торможения противовключением. Этот способ торможения обычно применяется для спуска грузов, поэтому его еще называют режимом тормозного спуска. Торможение противовключением можно получить путем реверсирования двигателя, то есть, поменяв полярность обмотки якоря или обмотки возбуждения, с одновременным введением в цепь якоря необходимого добавочного сопротивления для ограничения тока.

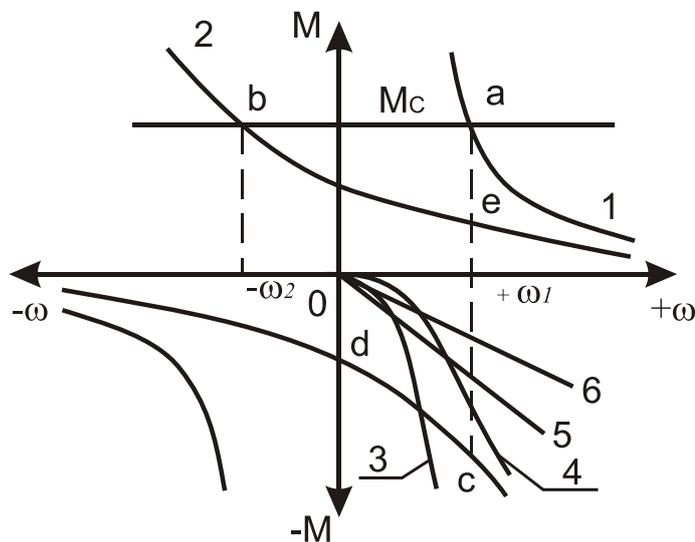


Рис. 20. Механические характеристики ДПТ последовательного возбуждения в тормозных режимах

Как показано на рисунке 20, если двигатель работал на естественной характеристике прямого вращения в точке a при скорости ω_1 , то после реверсирования он переходит на искусственную реостатную характеристику обратного вращения в точке c , развивая тормозной момент. Нетрудно убедиться в том, что в интервале скорости от точки c до точки d двигатель работает в режиме торможения противовключением.

Для динамического торможения с самовозбуждением двигатель полностью отключается от сети и цепь якоря замыкается на внешнее сопротивление (рис. 21). Во избежание саморазмагничивания необходимо изменить на противоположную полярность подключения якоря или обмотки возбуждения. В момент включения двигателя, благодаря остаточному магнетизму, в якоре наводится э.д.с., и происходит процесс самовозбуждения.

Вначале намагничивающий ток, обусловленный э.д.с. от остаточного магнетизма невелик. В дальнейшем ток быстро возрастает и происходит резкий скачок тормозного момента (линии 3 и 4 на рис. 20), что при сравнительно больших инерционных массах механизма может вызвать нежелательные удары в звеньях передаточного устройства. В связи с этим на практике для двигателей постоянного тока последовательного возбуждения чаще применяется динамическое торможение с независимым возбуждением (рис. 22). Здесь об-

мотка возбуждения через сопротивление, ограничивающее в ней ток, подключается к источнику постоянного тока, а обмотка якоря замыкается на внешнее сопротивление. В этом случае динамический тормозной режим ни чем не отличается от ранее рассмотренного для двигателей параллельного возбуждения: механические характеристики линейные и пересекаются в точке при скорости, равной нулю (линии 5 и 6 на рис. 20).

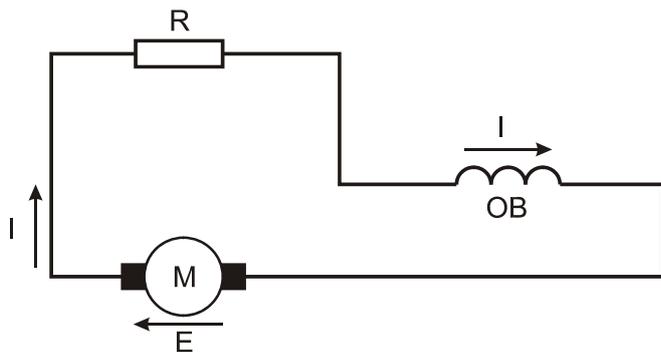


Рис. 21. Схема включения ДПТ последовательного возбуждения при динамическом торможении с самовозбуждением

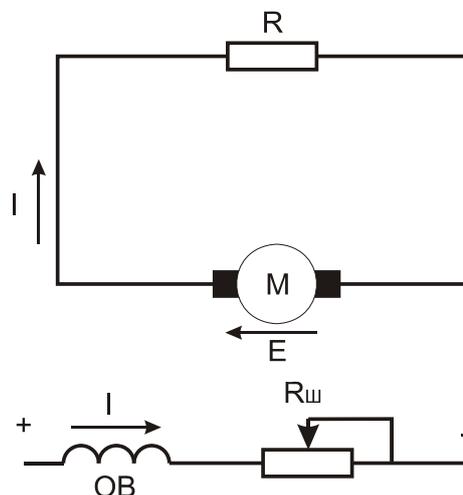


Рис. 22. Схема включения ДПТ последовательного возбуждения при динамическом торможении с независимым возбуждением

Литература: [3, с. 126-134; 10, с. 65-69].

2.4.3. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений

Расчет пусковых сопротивлений двигателей постоянного тока последовательного возбуждения, как и двигателей параллельного возбуждения, предусматривает нахождение полного сопротивления, числа ступеней и сопротивления каждой ступени. После отключения последней ступени выход на естественную характеристику должен происходить при пусковом токе I_1 .

Расчеты пусковых и тормозных сопротивлений можно производить графо-аналитическим и графическим методами.

Графо-аналитический метод. При расчете пусковых сопротивлений этим методом необходимо построить пусковую диаграмму при заданных значениях токов максимального I_1 и переключения I_2 , которые определяются так заданными условиями пуска. Пример схемы пуска и пусковой диаграммы для трех ступеней сопротивлений приведен на рис. 23, а и 23, б. Как отмечалось ранее при малых нагрузках зависимость между током и магнитным потоком нелинейна. Однако при токе якоря, превышающем номинальный, скоростные характеристики становятся близкими к линейным, поскольку незначительное увеличение потока при росте тока за коленом кривой намагничивания компенсируется реакцией якоря. Таким образом, в этой об-

ласти результирующий поток, пересекающий обмотку якоря, практически остается постоянным ($c\Phi \approx const$). Прямые, продолжающие линейные участки характеристик на рис. 23, б пересекаются в одной точке k , так как подобные треугольники с параллельными основаниями, образуемыми линиями пускового тока I_1 и тока переключения I_2 , имеют общую сторону. Например $\Delta kdc \sim \Delta kfh$; $\Delta kcb \sim \Delta khg$; сторона kc — общая.

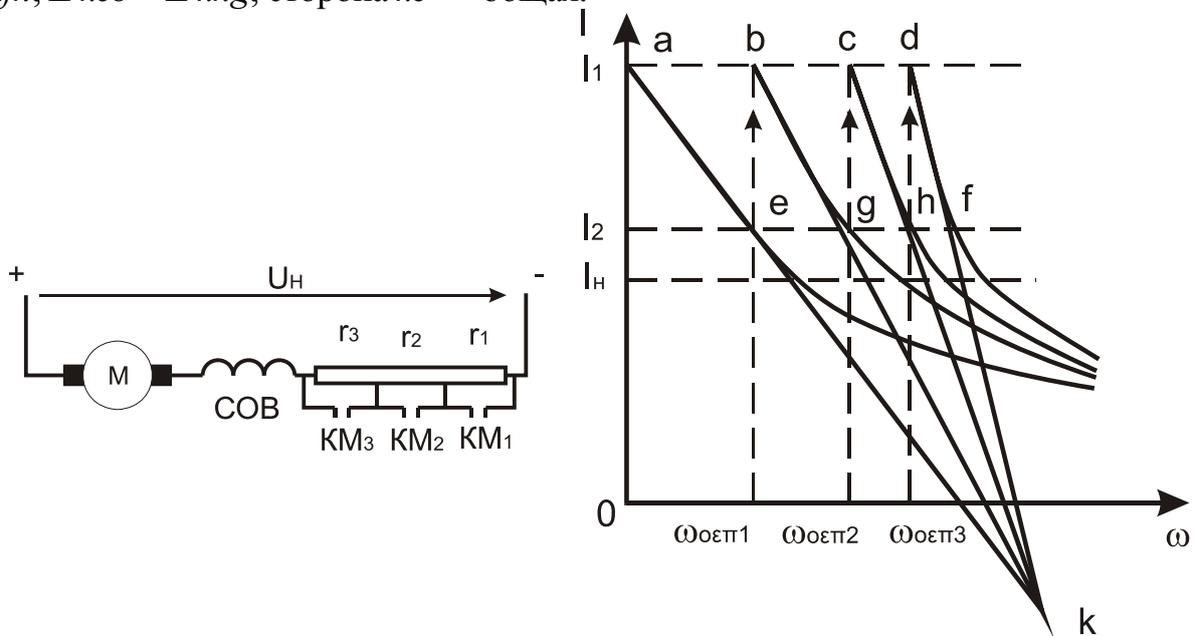


Рис. 23. Схема пуска (а) и пусковая диаграмма (б) ДПТ ПВ

Расчет ступеней пусковых резисторов ведется в следующем порядке. Задавшись значениями пускового тока I_1 и тока переключения I_2 , рассчитываем полное сопротивление якорной цепи при пуске

$$R_{\text{доб}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_1} - r_{\text{я.ц.}}$$

По универсальным характеристикам строим естественную и по выражению (2.33) искусственную при полном добавочном сопротивлении) скоростные характеристики двигателя. Линейные части характеристик продлеваем до пересечения в точке k . Из точки пересечения линии тока I_2 и первой пусковой характеристики проводим линию перехода тока на вторую пусковую характеристику после отключения первой ступени сопротивления (линия eb на рис. 23, б). Из точки b проводим линию bk и так далее до полного построения пусковой диаграммы. Если при отключении последней ступени сопротивления, выход на естественную характеристику окажется выше или ниже точки d , необходимо изменить величину тока переключения I_2 и вновь повторить построение пусковой диаграммы. Значения сопротивлений отдельных ступеней определяются из соотношения пропорциональных сторон подобных треугольников:

$$r_1 = \frac{R_{\text{доб}}}{ad} ab \quad r_2 = \frac{R_{\text{доб}}}{ad} bc \quad r_3 = \frac{R_{\text{доб}}}{ad} cd .$$

В этих выражениях величина $R_{доб}/ad$ может рассматриваться, как масштаб сопротивления, а отрезки ab , bc и cd пропорциональны сопротивлениям первой, второй и третьей ступени пускового резистора.

Графический метод. По описанной ранее методике строим естественную электромеханическую характеристику, определяем пусковые токи I_1 и I_2 , наносим их на пусковую диаграмму (рис. 24) и проводим горизонтали до пересечения с характеристикой в точках a и b . На оси ординат вниз от нуля откладываем в произвольном масштабе сопротивление якорной цепи $r_{яц}$, которое определяется по приближенной формуле:

$$r_{яц} = 1,5 \cdot 0,5 \frac{U_n}{I_n} (1 - \eta_n).$$

Через полученную точку проводим линию, параллельную оси абсцисс. Из точек пересечения линий пусковых токов с естественной характеристикой a и b проводим вертикали до пересечения с линией $r_{яц}$, в точках c и d . Далее определяем полное добавочное пусковое сопротивление R_1 и вспомогательное сопротивление R_2 :

$$R_1 = \frac{U_n}{I_1} - r_{яц} \quad \text{и} \quad R_2 = \frac{U_n}{I_2} - r_{яц}$$

Эти сопротивления откладываются на оси ординат вниз от $r_{яц}$ в том же масштабе. Через концы этих отрезков и точки c и d проводим наклонные линии. Начиная с точки e , строим ступенчатую линию $egvhn$. В том случае, если точка n не совпадет с вертикалью cb , необходимо изменить значение тока переключения I_2 и вновь произвести построения, добиваясь этого совпадения. Количество вертикальных отрезков ступенчатой линии gv , zh и т.д. указывает на количество ступеней пускового резистора, а их величины в принятом масштабе выражают сопротивления этих ступеней.

Расчет сопротивления торможения противовключением производится по заданным параметрам торможения: I_m и ω_m . По этим координатам строим точку p , через которую проводим горизонталь до пересечения с естественной характеристикой в точке m . Из этой точки проводим вертикаль до точки s . По заданному току торможения определяем вспомогательную величину тормозного

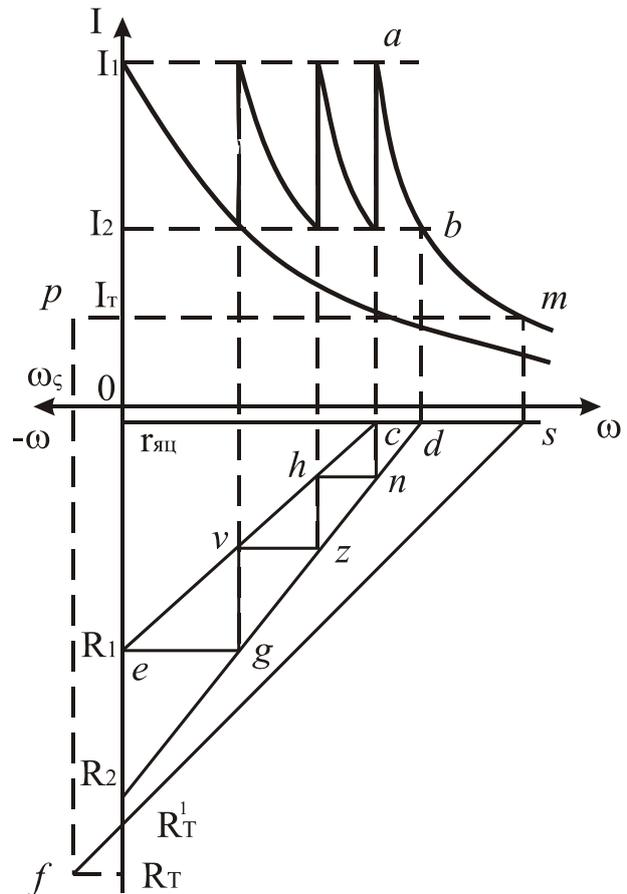


Рис. 24. К расчету пусковых и тормозных сопротивлений ДПТ ПВ графическим методом

сопротивления $R'_m = \frac{U}{I_m} - r_{яц}$, отрезок которого откладывается на оси ординат вниз от сопротивления якорной цепи в принятом масштабе. Через точки s и конец отрезка сопротивления R'_m проводим линию до пересечения с границей скорости торможения в точке f . Проецируя точку f на ось ординат, получаем искомое сопротивление торможения R_m .

Литература: [2, с. 51-53; 3, с. 122-126; 8, с. 40-41].

2.5. Механические характеристики двигателей постоянного тока смешанного возбуждения

Двигатели смешанного возбуждения имеют две обмотки возбуждения, одна из которых включается параллельно якорю (ШОВ), и вторая (СОВ) последовательно (рис. 25). Магнитный поток главных полюсов складывается из двух потоков: постоянного, независимого от нагрузки, и потока, создаваемого током якоря. Поэтому в двигателе смешанного возбуждения сочетаются свойства двигателей параллельного и последовательного возбуждения, а его механические характеристики занимают промежуточное положение между характеристиками этих двигателей. Соотношение магнитных потоков параллельной и последовательной обмоток у двигателей различного типа может быть различным; чаще всего применяются двигатели, у которых при номинальном токе нагрузки намагничивающие силы обеих обмоток равны. Двигателям смешанного возбуждения свойственно значительное насыщение магнитной системы при нагрузках номинальных и выше. Вследствие изменения магнитного потока при изменении нагрузки аналитического выражения для механических и скоростных характеристик не существует, поэтому при расчетах обычно пользуются универсальными характеристиками (рис. 26), аналогичными характеристикам двигателей последовательного возбуждения. Эти характеристики приводятся в справочной литературе.

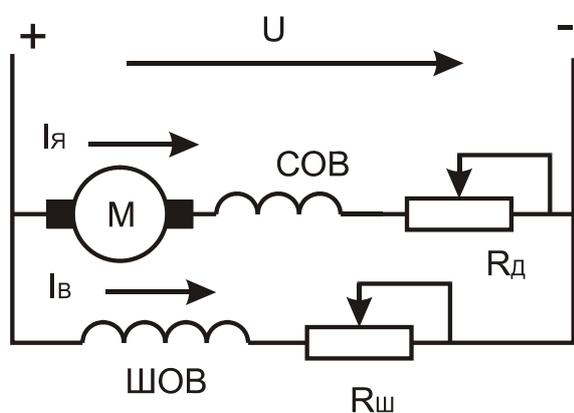


Рис. 25. Принципиальная электрическая схема ДПТ смешанного возбуждения

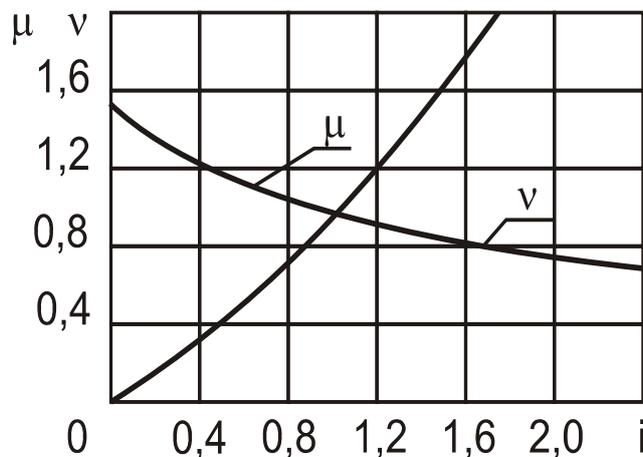
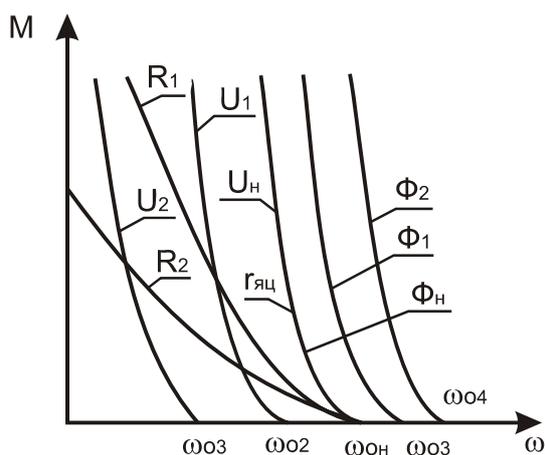


Рис. 26. Универсальные характеристики двигателей смешанного возбуждения

Двигатели смешанного возбуждения могут работать на искусственных характеристиках при изменении сопротивления якорной цепи, напряжения и магнитного потока. Выведенные ранее общие выражения для скоростных (2.8) и механических (2.9) характеристик двигателей постоянного тока справедливы и для двигателей смешанного возбуждения. Из этих уравнений следует, что при токе нагрузки, равном нулю, резисторные характеристики проходят через точку скорости идеального холостого хода. Эти двигатели в отличие от двигателей последовательного возбуждения имеют конечную величину скорости идеального холостого хода, которая определяется магнитным потоком, создаваемым параллельной обмоткой возбуждения. При увеличении тока нагрузки скорость вначале резко снижается, а затем по мере насыщения магнитной системы падает более медленно и по линейному закону, как у двигателей параллельного возбуждения. Угол наклона характеристик зависит от сопротивления цепи якоря.

При снижении напряжения на зажимах якоря уменьшается скорость идеального холостого хода, поэтому искусственные характеристики смещаются в сторону уменьшения скорости (рис. 27). При уменьшении магнитного потока параллельной обмотки скорость идеального холостого хода увеличивается, что приводит к смещению характеристик в сторону больших скоростей.

Двигатели смешанного возбуждения могут работать во всех трех режимах электрического торможения: с отдачей электрической энергии в сеть, динамическом и противовключением. На рисунке 28 приведены механические характеристики тормозных режимов двигателя со смешанным возбуждением. Торможение с отдачей энергии в сеть происходит при изменении направления тока в якоре и в последовательной обмотке возбуждения, когда скорость становится выше скорости идеального холостого хода.



$$R_1 > R_2 > \gamma_{яц} \quad U_1 < U_2 < U_H \quad \Phi_H > \Phi_1 > \Phi_2$$

Рис. 27. Естественная и искусственные механические характеристики двигателей смешанного возбуждения

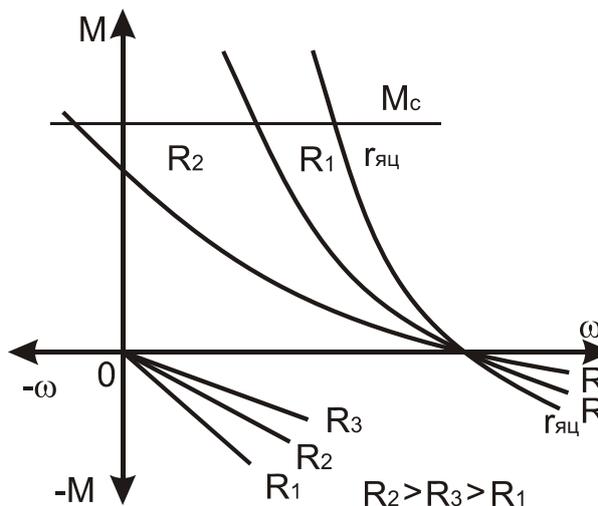


Рис. 28. Механические характеристики двигателей смешанного возбуждения в тормозных режимах

Это может привести к размагничиванию двигателя и снижению эффективности торможения. Поэтому этот тормозной режим обычно осуществляют при зашунтированной последовательной обмотке по системе независимого возбуждения и механические характеристики принимают вид прямых. По тем же соображениям и динамический тормозной режим целесообразно осуществлять по схеме независимого возбуждения при линейных механических характеристиках (см. рис. 28). Тормозной режим противовключением аналогично двигателям с параллельным возбуждением получают путем принудительного вращения вала двигателя против направления его включения при введенных в цепь якоря токоограничительных сопротивлений.

Литература: [3, с. 154-163; 9, с. 73-74].

2.6. Механические характеристики асинхронных электродвигателей

Асинхронные электродвигатели находят широкое применение во всех отраслях народного хозяйства, благодаря большим преимуществам этих двигателей по сравнению с другими типами. Они обладают высокой надежностью в эксплуатации, не предъявляют высоких требований к обслуживанию и условиям окружающей среды, имеют меньшую массу и расход цветных металлов, приходящиеся на единицу мощности, в них отсутствуют контакты скольжения, что делает их безопасными в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

2.6.1. Вывод уравнений

механических и электромеханических характеристик

Из курса электрических машин известно, что асинхронный двигатель по характеру протекающих в нем процессов и принципу работы представляет собою трансформатор. В частности, для вывода уравнений механических и скоростных характеристик могут использоваться различные схемы замещения, применяемые в теории трансформаторов. Для асинхронных двигателей наиболее часто применяется упрощенная Г-образная схема замещения одной фазы. При выводе уравнений принимается ряд допущений. В частности, активное сопротивление обмотки ро-

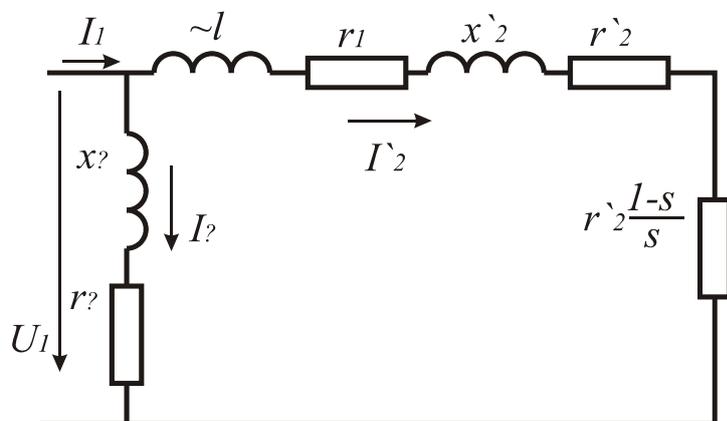


Рис. 29. Упрощенная схема замещения двигателя

стных характеристик могут использоваться различные схемы замещения, применяемые в теории трансформаторов. Для асинхронных двигателей наиболее часто применяется упрощенная Г-образная схема замещения одной фазы. При выводе уравнений принимается ряд допущений. В частности, активное сопротивление обмотки ро-

тора не зависит от частоты тока в ней, насыщение магнитной системы не влияет на реактивные сопротивления обмоток ротора и статора, проводимость намагничивающего контура остается постоянной и зависит только от приложенного напряжения, отсутствуют добавочные потери и высшие гармонические составляющие магнитодвижущих сил.

Для параметров схемы замещения приняты следующие обозначения (см. рис. 29):

- U_1 — первичное фазное напряжение;
- I_1 — фазный ток статора;
- I'_2 — ток ротора, приведенный к обмотке статора;
- I_μ — ток намагничивания;
- x_1 — реактивное сопротивление обмотки статора;
- x'_2 — реактивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;
- x_μ — реактивное сопротивление контура намагничивания;
- r_1, r'_2, r_μ — активные сопротивления обмоток статора, приведенное ротора и контура намагничивания соответственно;
- s — скольжение, определяемое как:

$$s = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o}, \quad (2.36)$$

где ω_o — угловая скорость вращающегося магнитного поля (синхронная скорость);

ω — угловая скорость ротора.

Угловая скорость вращающегося магнитного поля определяется из выражения:

$$\omega_o = \frac{2\pi f_1}{p},$$

где f_1 — частота тока сети;

p — число пар полюсов вращающегося магнитного поля.

В отличие от трансформатора активная мощность двигателя расходуется на создание механической мощности на его валу. В схеме замещения асинхронного двигателя активная мощность, приходящаяся на одну фазу, выражается равноценным ей (эквивалентным) активным сопротивлением $r'_2(1-s)/s$. Суммируя активное сопротивление обмотки ротора и эквивалентное сопротивление, получим активное сопротивление фазы ротора:

$$r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s} = \frac{r'_2}{s}.$$

Ток в обмотке статора складывается из приведенного тока ротора I'_2 и намагничивающего тока I_μ :

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_\mu + \bar{I}'_2.$$

При постоянном напряжении на зажимах двигателя намагничивающий ток практически не зависит от нагрузки, поэтому в дальнейших расчетах он не учитывается, т.е. можно принять $I_1 \approx I'_2$.

Исходя из схемы замещения, можно записать выражение для приведенного тока ротора:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}} = \frac{U_1 s}{\sqrt{(r_1 s + r'_2)^2 + x_k^2 s^2}}, \quad (2.37)$$

где $x_k = x_1 + x'_2$ — индуктивное сопротивление двигателя при коротком замыкании.

Полученное выражение представляет собою уравнение скоростной или электромеханической характеристики асинхронного двигателя, поскольку с учетом формулы (2.36) выражает зависимость приведенного тока ротора от угловой скорости.

Подведенная к обмоткам статора электрическая мощность P_1 частично теряется в сердечнике ΔP_c и в обмотках статора ΔP_{m1} , оставшаяся электромагнитная мощность $P_{эм}$ через вращающееся электромагнитное поле передается в ротор двигателя, т.е.

$$P_1 = \Delta P_c + \Delta P_{m1} + P_{эм},$$

В связи с тем, что при работе двигателя в режиме близком к номинальному частота тока в роторе весьма мала, потери в его сердечнике можно не учитывать. Следовательно, передаваемая в ротор электромагнитная мощность расходуется в активных сопротивлениях обмотки ротора и в сопротивлении, эквивалентном механической нагрузке. Эту мощность можно выразить как

$$P_{эм} = m I_2'^2 \frac{r'_2}{s}, \quad (2.38)$$

где m — число фаз (для трехфазного двигателя m равно трем).

С другой стороны мощность, передаваемую в ротор, можно выразить через механические параметры: электромагнитный момент $M_{эм}$ и синхронную угловую скорость

$$P_{эм} = M_{эм} \omega_o. \quad (2.39)$$

Приравняв между собою правые части выражений (2.38) и (2.39), найдем электромагнитный момент:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_o} = \frac{m}{\omega_o} I_2'^2 \frac{r'_2}{s}. \quad (2.40)$$

Здесь и в дальнейшем индексы у момента двигателя опущены.

Подставим значение тока ротора из (2.37) в выражение (2.40), тогда

$$M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r'_2 s}{(r_1 s + r'_2)^2 + x_k^2 s^2}. \quad (2.41)$$

Полученное выражение представляет собою уравнение механической характеристики двигателя, в котором угловая скорость входит через скольжение; уравнение называется параметрическим, поскольку выражено через параметры обмоток статора и ротора.

Уравнение (2.41) представляет собою довольно сложную зависимость момента от скольжения, поэтому для выявления характера этой зависимости и обнаружения экстремумов необходимо взять первую производную этой функции по скольжению и приравнять к нулю:

$$\frac{dM}{ds} = \frac{mU_1^2 r_2'}{\omega_o} \frac{[(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2] - s[2r_1(r_1 s + r_2') + 2x_k^2 s]}{[(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2]^2} = 0.$$

После преобразования числителя:

$$\frac{dM}{ds} = \frac{mU_1^2 r_2'}{\omega_o} \frac{r_2' - r_1^2 s^2 - x_k^2 s^2}{[(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2]^2} = 0. \quad (2.42)$$

Производная выражения (2.42) может быть равна нулю в том случае, когда равен нулю числитель, или бесконечности знаменатель. Второй вариант свидетельствует о том, что ротор должен вращаться в сторону обратную направлению вращения магнитного поля с бесконечно большой скоростью, что практически нереально. Приравнявая нулю числитель, получим:

$$r_2' - r_1^2 s^2 - x_k^2 s^2 = 0,$$

откуда

$$s = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = s_k. \quad (2.43)$$

Проведенный анализ показывает, что уравнение механической характеристики является функцией непрерывной. У этой функции имеет место два максимума при скольжении, которое принято называть критическим и обозначать символом s_k . Один из них при $s_{k\delta} > 0$ — в двигательном режиме, второй при $s_{k\delta} < 0$ — в генераторном режиме.

Если в уравнение механической характеристики (2.41) подставить значение положительного критического скольжения из формулы (2.43), получим максимальный или критический момент для двигательного режима

$$M_{к\delta} = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 r_2' \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}}{\left(\frac{r_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} + r_2' \right)^2 + x_k^2 \left(\frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \right)^2}.$$

Проведя ряд алгебраических преобразований, получим:

$$M_{к\delta} = \frac{m}{2\omega_o} \frac{U_1^2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1}. \quad (2.44)$$

Максимальный момент для генераторного режима имеет место при отрицательном критическом скольжении:

$$M_{кз} = -\frac{m}{2\omega_o} \frac{U_1^2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r_1}. \quad (2.45)$$

Из сопоставления формул (2.44) и (2.45) видно, что максимальный момент в генераторном режиме численно больше, чем в двигательном. Действительно,

$$\frac{M_{кз}}{M_{кд}} = -\frac{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r_1}.$$

Разделим числитель и знаменатель на $\sqrt{r_1^2 + x_k^2}$, тогда

$$\frac{M_{кз}}{M_{кд}} = -\frac{1 + \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}}{1 - \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}}.$$

Умножив дроби числителя и знаменателя на отношение r_1/r_2' , получим:

$$\frac{M_{кз}}{M_{кд}} = \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}.$$

Здесь с учетом формулы (2.43)

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \frac{r_2'}{r_1} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \frac{r_1}{r_2'} = as_k, \quad (2.46)$$

где $\alpha = r_1/r_2'$ — коэффициент сопротивлений.

Для упрощения расчетов без большой погрешности можно принять $a \approx 1$, тогда $\varepsilon \approx s_k$.

Уравнение механической характеристики (2.41) имеет тот недостаток, что входящие в него параметры обмоток двигателя не всегда доступны, поэтому его преобразуют к более удобному для практического использования виду. С этой целью разделим уравнение (2.41) на выражение (2.44)

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2U_1^2 m r_2' s \omega_o}{U_1^2 m \omega_o} \frac{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2 s^2}.$$

Произведя алгебраические преобразования, с учетом формул (2.43) и (2.46) получим:

$$M = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}. \quad (2.47)$$

Полученное уравнение также представляет собою зависимость момента от скольжения, но в отличие от выражения (2.41), в него входят величины, легко определяемые из паспортных и каталожных данных электродвигателей. Это уравнение принято называть по имени его автора уточненной формулой Клосса.

У электродвигателей мощностью 20 и более кВт индуктивное сопротивление короткого замыкания значительно больше активного сопротивления обмотки статора, т.е. $x_k \gg r_1$, поэтому без большой погрешности можно принять $r_1 = 0$ и тогда формула (2.47) становится более удобной для расчетов:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (2.48)$$

Это выражение носит название упрощенной формулы Клосса.

Критическое скольжение, входящее в выражения (2.47) и (2.48), можно найти из выражения (2.47), записав его для номинального режима и обозначив $M_k / M_n = \mu_k$:

$$\mu_k = \frac{\frac{s_n}{s_k} + \frac{s_k}{s_n} + 2\varepsilon}{2(1 + \varepsilon)}$$

Если учесть, что $\alpha = r_1 / r_2' \approx 1$, то

$$\mu_k = \frac{\frac{s_n}{s_k} + \frac{s_k}{s_n} + 2s_k}{2(1 + s_k)}.$$

Решением этого выражения относительно s_k является:

$$s_k = \frac{s_n \left[\mu_k \pm \sqrt{\mu_k^2 + 2s_n(\mu_k - 1) - 1} \right]}{1 - 2s_n(\mu_k - 1)} \quad (2.49)$$

Аналогично для упрощенной формулы Клосса из выражения (2.48) следует:

$$s_k = s_n \left(\mu_k \pm \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right). \quad (2.50)$$

Один из корней в последних двух выражениях имеет отрицательный знак. Он соответствует случаю, когда максимальный момент наступает при $s_n > s_k > 0$, что нереально; таким образом, это решение отпадает.

2.6.2. Анализ механических и электромеханических характеристик

Из уравнений механических характеристик (2.41) и (2.48) следует, что зависимость момента электродвигателей от угловой скорости вала является сложной. Для большей наглядности целесообразно принять некоторые упрощения в выражении (2.47) и исследовать эту зависимость по частям. Вначале рассмотрим уравнение механической характеристики в зоне малых и отрицательных скоростей, что соответствует скольжениям близким к единице, т.е. $s \geq 1$. У асинхронных двигателей общего назначения критическое скольжение $s_k = 0,12 \dots 0,15$. Из этого следует, что второе слагаемое в знаменателе выражения (2.48) значительно меньше первого и им можно пренебречь. Тогда уравнение упрощается и принимает вид гиперболы (участок ab на рис. 30):

$$M = \frac{2M_k}{s} s_k.$$

В зоне скоростей, близких к синхронной, когда $s \rightarrow 0$, отношение s / s_k становится сколь угодно малым и уравнение механической характеристики становится линейной функцией скольжения (участок cd на рис. 30):

$$M = \frac{2M_k}{s_k} s.$$

Проведенное ранее исследование уравнения механической характеристики на экстремум выявило непрерывность функции, из чего следует, что между этими двумя участками кривая совершает плавный переход при максимальном моменте M_k и критическом скольжении s_k . Таким образом, точка максимального момента M_k делит механическую характеристику на две части. На участке от точки a до M_k — ветвь разбега, на участке от M_k до ω_0 — рабочая ветвь. На

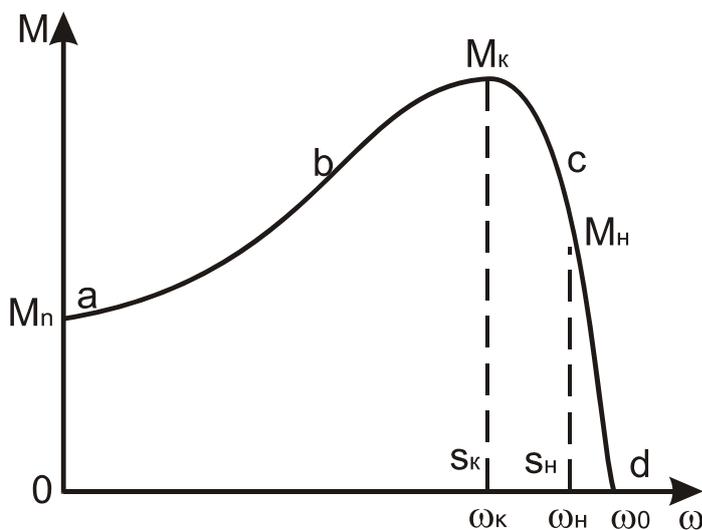


Рис. 30. Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

этой ветви расположены параметры номинального режима работы двигателя: M_n и ω_n , она обладает высокой жесткостью. При изменении нагрузки от нуля до номинальной статическое падение скорости составляет от 3 до 6% от синхронной скорости. Момент, развиваемый двигателем при скорости, равной нулю, называется пусковым. Отношение пускового момента к номинальному называется кратностью пускового момента:

$$\mu_n = M_n / M_n.$$

Кратность пускового момента двигателей должна быть $\mu_n = 1 \dots 1,8$, а для крановых $\mu_k \geq 1,7$. Обычно кратность пускового момента асинхронных двигателей колеблется в пределах $\mu_n = 1 \dots 2$, некоторые типы двигателей имеют $\mu_n = 2,5 \dots 2,8$.

Отношение максимального или критического момента к номинальному называется кратностью максимального момента:

$$\mu_k = \frac{M_k}{M_n}$$

Кратность максимального момента двигателей нормального исполнения с короткозамкнутым ротором должна быть не ниже 1,7, а двигателей с фазным ротором не ниже 1,8. Для асинхронных двигателей общего назначения кратность максимального момента обычно лежит в пределах $\mu_k = 1,7 \dots 2,2$, для крановых двигателей серии МТКФ и МТКН $\mu_k = 2,3 \dots 3,4$.

Нелинейность уравнений механических характеристик асинхронных электродвигателей обусловлена теми процессами, которые происходят в обмотках и сердечниках при изменении скорости. Электромагнитный момент, развиваемый двигателем переменного тока, определяется выражением:

$$M = c\Phi I'_2 \cos \varphi_2,$$

где c — конструктивная постоянная;

Φ — магнитный поток вращающегося магнитного поля;

I'_2 — ток в обмотках ротора, приведенный к статору;

φ_2 — угол сдвига по фазе между током и э.д.с. в обмотке ротора.

В момент включения двигателя магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, вращается с угловой скоростью ω_o , в то время как скорость двигателя равна нулю. В обмотках ротора наводится большая э.д.с. частотой тока сети, при которой индуктивное сопротивление в них значительно превышает активное, что приводит к снижению коэффициента мощности в роторе. В то же время пусковой ток ротора, в несколько раз превосходящий номинальный, создает свое магнитное поле, которое приводит к размагничиванию машины. Вследствие этих причин короткозамкнутый асинхронный двигатель без дополнительных мер развивает сравнительно небольшой пусковой момент (см. рис. 30). По мере увеличения скорости в роторе уменьшаются э.д.с., ток и частота тока. При этом $\cos \varphi_2$ и результирующий магнитный поток увеличиваются быстрее, чем уменьшается ток, что, согласно формулы (2.27), обуславливает увеличение вращающего момента (участок ab на рис. 30). В дальнейшем, начиная от скорости ω_k , ток ротора настолько быстро падает, что рост $\cos \varphi_2$ и восстановление магнитного потока не компенсируют его уменьшения и вращающий момент двигателя быстро снижается вплоть до нуля при синхронной скорости.

Анализ уравнения скоростной характеристики (2.37) показывает, что в двигательном режиме, при $|s| \rightarrow +\infty$, ток ротора монотонно возрастает и стремится к своему предельному значению:

$$I'_{2np} = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}.$$

При отрицательных скольжениях (генераторный режим) эта функция имеет максимум, равный $I'_{2max} = U_1 / x_k$ при скольжении:

$$s_{2.m} = -\frac{r'_2}{r_1} = -\frac{1}{a},$$

где a — коэффициент сопротивлений.

В области отрицательных скольжений при $s < s_{2.m}$ ток ротора стремится к тому же предельному значению, но сверху. Следует отметить, что для двигателей малой мощности, у которых $a \approx 1$, ток достигает максимального значения при $s_{2.m} \approx -1$, а для двигателей большой мощности, когда $a \rightarrow 0$, $s_{2.m} \rightarrow -\infty$. В последнем случае режим максимального тока практически оказывается нереализованным. Вместе с тем, как видно из рисунка 31, при одинаковых значениях скольжения ток ротора в двигательном режиме всегда меньше тока ротора в генераторном режиме.

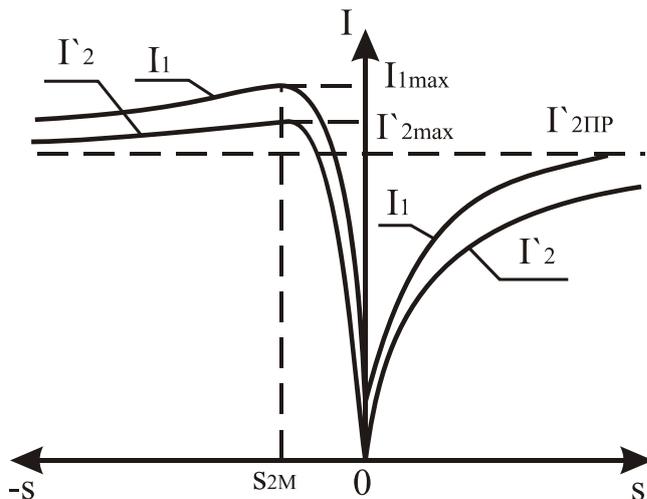


Рис. 31. Скоростные характеристики асинхронных двигателей

Ток ротора I'_2 является основной величиной для оценки режима работы двигателя. Поэтому также важной является задача построения зависимости $I_1(\omega)$ и $I'_2(\omega)$. Использование для этого уравнения формулы (2.37) не всегда возможно ввиду отсутствия подробных данных о сопротивлениях двигателя. В данном случае уравнение скоростной характеристики удобно выразить через параметры, применяемые для построения механических характеристик.

Для этого, приравняв правые части уравнений (2.38) и (2.47), получим:

$$I'_2 = \sqrt{\frac{2M_\kappa (1 + \varepsilon) \omega_o s}{m(s/s_k + s_k/s + 2\varepsilon)r'_2}}.$$

Или, применяя упрощенную формулу Клосса, можно записать

$$I'_2 = \sqrt{\frac{2M_\kappa \omega_o s}{m(s/s_k + s_k/s)r'_2}}.$$

Для схемы замещения, принятой на рис. 29, ток намагничивания I_μ сохраняется неизменным при всех режимах. С достаточной степенью точности его можно считать чисто реактивным, если пренебречь потерями мощности на перемагничивание сердечника статора. Величину этого тока можно определить из паспортных данных, как $I_\mu = I_n \sin \varphi_n$, где

$$\sin \varphi_n = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n}.$$

Зная ток намагничивания и приведенный ток ротора, определяем ток статора:

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + I_2'^2 (1 + 2\alpha)}. \quad (2.51)$$

где $\alpha = I_\mu / I_{2np}'$, где I_{2np}' — предельный ток ротора (см. рис. 31).

У выпускаемых электродвигателей $\alpha = 0,115 \dots 0,13$, поэтому без большой погрешности выражение (2.51) можно записать как:

$$I_1 \approx \sqrt{I_\mu^2 + I_2'^2}.$$

На рис. 31 приведены скоростные характеристики для токов ротора и статора асинхронного двигателя.

2.6.3. Искусственные механические характеристики

Для получения искусственных характеристик асинхронного электродвигателя достаточно изменить хотя бы один из параметров, входящих в уравнение (2.41): подводимое к обмотке статора напряжение, активные или индуктивные сопротивления в цепи обмоток статора или ротора, частоту тока, число пар полюсов.

Искусственные характеристики при изменении напряжения. Как видно из уравнения (2.41), момент, развиваемый двигателем, пропорционален квадрату напряжения, т.е. $M = kU_1^2$, где k — коэффициент, зависящий от параметров двигателя.

Из формул (2.36) и (2.43) видно, что угловая скорость магнитного поля и критическое скольжение не зависят от напряжения, и механические характеристики при снижении напряжения приобретают вид, показанный на рис. 32: все искусственные характеристики проходят через точку ω_0 , а критический момент наступает при неизменном критическом скольжении. Столь существенная зависимость моментов асинхронных двигателей от на-

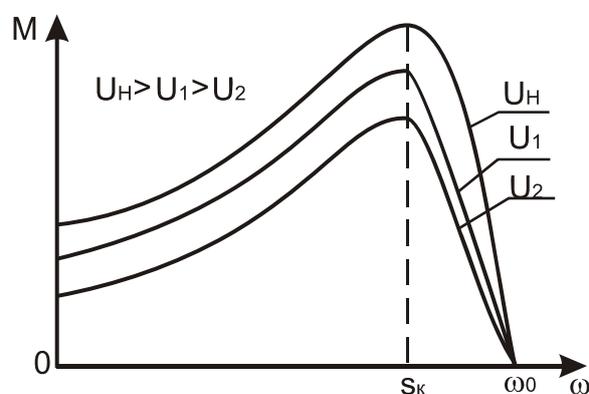


Рис. 32. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения

пряжения должна учитываться при проектировании электроприводов и условиях эксплуатации. Это особенно следует иметь в виду в условиях сельскохозяйственного электроснабжения, где мощности электродвигателей нередко бывают соизмеримы с мощностью источников питания, а питающие линии имеют большую протяженность. Поэтому при выборе двигателей их необходимо проверять по условиям запуска с учетом возможного падения напряжения, а ранее включенные двигатели проверять на перегрузочную способность.

Искусственные характеристики при изменении активного и индуктивного сопротивлений в цепи обмотки статора. Активные и индуктивные сопротивления вводят в цепь обмотки статора с целью уменьшения пускового тока и момента. Падение напряжения на добавочных сопротивлениях при большом пусковом токе двигателя приводит к снижению напряжения на зажимах обмотки статора, что и приводит к снижению пускового тока и пускового момента. По мере разбега ток и падение напряжения на добавочных сопротивлениях уменьшаются, а на зажимах двигателя напряжение увеличивается. Из уравнения (2.41) следует, что введение добавочных активного и индуктивного сопротивлений при пуске оказывает большее влияние, чем при критическом скольжении, когда значительно уменьшившийся ток приведет к меньшему падению напряжения на этих сопротивлениях. Этим объясняется тот факт, что при одинаковом уменьшении пускового момента от введения сопротивлений и от снижения напряжения, критический момент в случае с сопротивлениями снижается в меньшей степени (кривые 1 и 2 на рис. 33), чем в случае с понижением напряжения (кривая 3). Там же показана естественная характеристика (кривая 4). Как видно на рис. 33 влияние активного сопротивления на величину максимального момента больше, чем индуктивного.

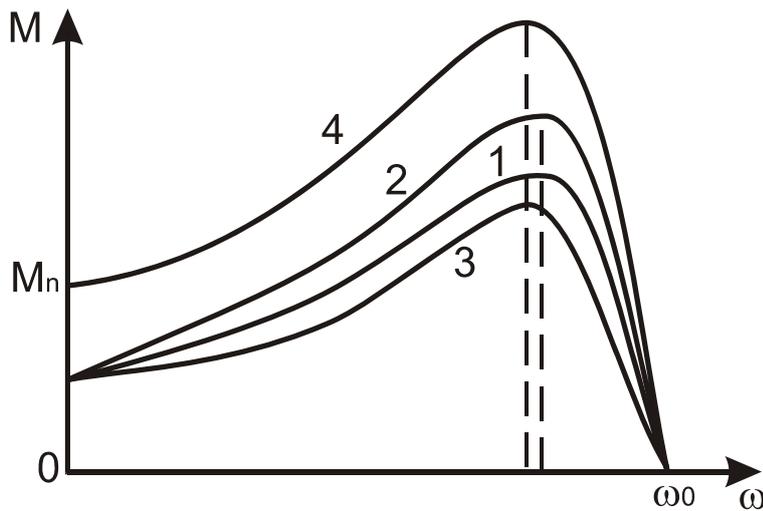


Рис. 33. Механические характеристики асинхронного двигателя при включении в цепь статора: 1 — активного; 2 — индуктивного сопротивлений; 3 — снижению напряжения

Это связано с тем, что в знаменателе выражения (2.44) активное сопротивление входит дважды, тогда как индуктивное один раз.

При введении активных и индуктивных сопротивлений в цепь обмотки статора критическое скольжение, как следует из формулы (2.43), несколько уменьшается. Угловая скорость магнитного поля от сопротивления обмоток статора не зависит.

Искусственные характеристики при введении активного сопротивления в цепь обмотки ротора. Из выражений (2.36) и (2.44) видно, что при увеличении активного сопротивления в роторе максимальный момент и синхронная угловая скорость остаются неизменными. Критическое скольжение, как следует из формулы (2.43), увеличивается с ростом активного сопротивления (рис. 34). При этом имеют место соотношения: $r_{доб.2} > r_{доб.1} > 0$ и $s_{к.2} > s_{к.1} > s_{ке}$, т.е. критический момент смещается в сторону меньших скоростей, оставаясь неизменным по величине. Это объясняется тем, что вначале с увеличением активного сопротивления в роторе увеличивается коэффициент мощности и растет пусковой момент. Это продолжается до наступления равенства:

$$r_2' + r_{доб}' = \sqrt{r_1'^2 + x_k'^2},$$

при котором критическое скольжение становится равным единице, а пусковой момент двигателя — максимальному. Однако дальнейшее увеличение активного сопротивления в роторе приводит к быстрому снижению пускового тока и пускового момента (характеристика при $r_{доб.3}$ на рис. 34).

При этом наклон рабочей ветви механических характеристик увеличивается, а их жесткость снижается. Свойства механических характеристик при изменении активного сопротивления ротора широко используются на практике.

Благодаря им, представляется возможным уменьшать пусковые токи, запускать двигатели при максимальном моменте, регулировать угловую скорость при неизменной перегрузочной способности, осуществлять торможение противовключением при допустимых токах. Для реализации этих возможностей трехфазная обмотка ротора выполняется изолированным проводом в виде катушек по аналогии с обмоткой статора, соединяется по схеме звезда, три конца которой выводятся на контактные кольца, установленные на валу двигателя. Такие двигатели называются двигателями с фазным ротором или с контактными кольцами.

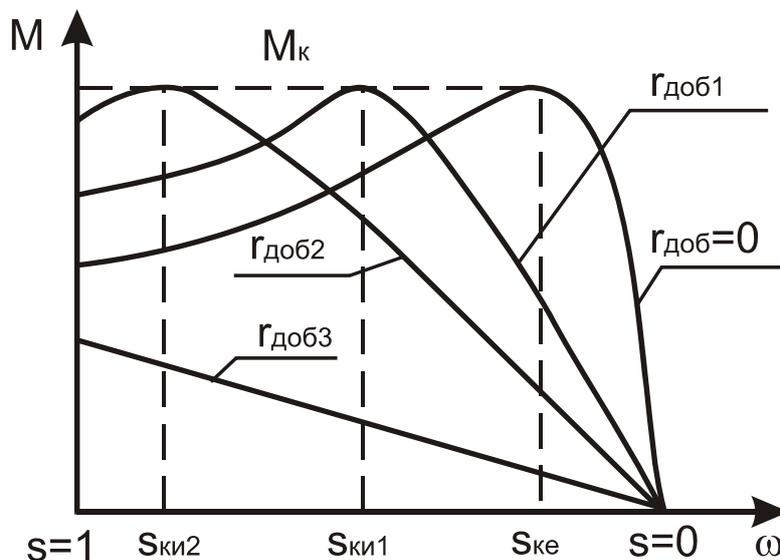


Рис. 34. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении активного сопротивления ротора

Искусственные характеристики при введении активных и индуктивных сопротивлений в цепь обмотки ротора. Индуктивное сопротивление, вводимое в цепь ротора, изменяется с изменением скорости вала двигателя: в момент пуска двигателя частота тока в роторе равна частоте тока сети и индуктивное сопротивление реактора велико. Как следует из уравнения скоростной характеристики (2.37), увеличение индуктивного сопротивления в цепи ротора приводит к уменьшению пускового тока, пускового и максимального моментов (2.41), (2.44) и увеличению угла сдвига по фазе между током и э.д.с. ротора. По мере нарастания скорости ток, э.д.с., частота тока в роторе и индуктивное сопротивление реактора падают, но ток уменьшается с меньшей интенсивностью, чем при добавочном активном сопротивлении. Уменьшение индуктивного сопротивления реактора способствует более быстрому росту $\cos \varphi_2$, поэтому на ветви разбега интенсивность увеличения момента такая же, как и на естественной характеристике. При необходимости поддержания постоянства пускового момента двигателя в цепь ротора, кроме индуктивного сопротивления, вводят еще и активное. Оно может быть включено последовательно (рис. 35, а) или параллельно (рис. 35, б) с реактором. При последовательном включении из-за большой частоты тока в реакторе в момент пуска и большого суммарного сопротивления пусковой ток относительно мал, но, благодаря добавочному активному сопротивлению, увеличивается $\cos \varphi_2$ и пусковой момент оказывается больше, чем при одной индуктивности (кривая 3 на рис. 36).

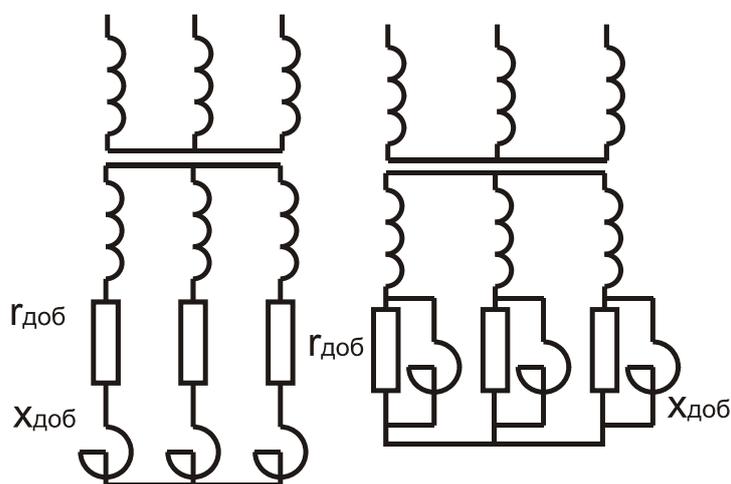


Рис. 35. Схема последовательного (а) и параллельного (б) включения добавочных активного и индуктивного сопротивлений в цепь ротора

При параллельном соединении индуктивного и активного сопротивлений в цепи ротора по мере разгона двигателя происходит перераспределение токов в параллельных ветвях. В момент пуска основная часть тока идет по активному сопротивлению, так как индуктивное сопротивление

реактора относительно велико, В процессе разгона двигателя частота тока в реакторе снижается, индуктивное сопротивление уменьшается, и по нему начинает протекать большая часть тока. В результате переменных соотношений между активными и реактивными сопротивлениями удастся получить искусственные механические характеристики при почти постоянном моменте двигателя в период пуска (кривая 2 на рис. 37).

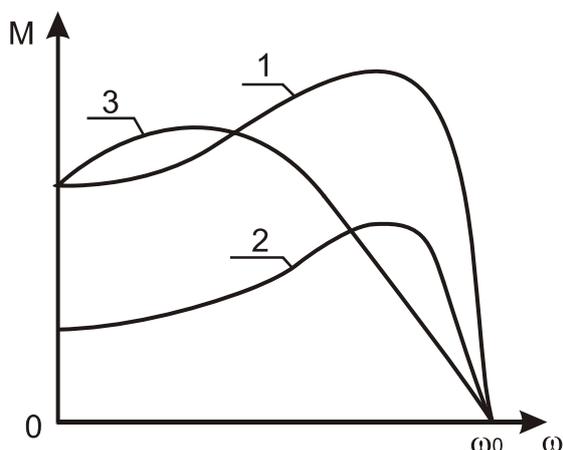


Рис. 36. Механические характеристики асинхронного двигателя:

1 — естественная; 2 — при включении реактора и 3 — активного сопротивления последовательно с индуктивностью

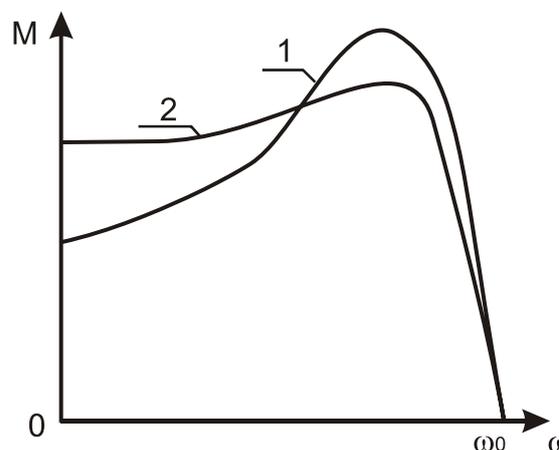


Рис. 37. Механические характеристики асинхронного двигателя:

1 — естественная; 2 — при параллельном включении активного сопротивления с индуктивностью

Искусственные характеристики при изменении частоты тока сети. Основные выражения, характеризующие работу асинхронных двигателей, такие как: уравнение механической характеристики (2.41), формулы максимального момента (2.44), критического скольжения (2.43), синхронной скорости (2.36), содержат параметры, зависящие от частоты тока, поэтому ее влияние на механические характеристики очевидно. Как известно, у асинхронных двигателей индуктивное сопротивление короткого замыкания значительно больше активного сопротивления обмотки статора, т.е. $x_k \gg r_l$, поэтому, с целью упрощения дальнейших выкладок, без большой погрешности, активным сопротивлением можно пренебречь, т.е. принять $r_l \approx 0$. Тогда выражение (2.44) при стандартной частоте, можно записать как:

$$M_{кст} = \frac{m}{2\omega_{ост}} \frac{U_1^2}{x_{кст}}, \quad (2.52)$$

где $M_{кст}$ — критический момент двигателя при стандартной частоте тока сети;

$\omega_{ост}, x_{кст}$ — синхронная скорость и сопротивление короткого замыкания при стандартной частоте.

При изменении частоты тока ее можно выразить как $f_1 = f_{cm} \varphi$, а синхронную скорость и сопротивление короткого замыкания через стандартную и относительную частоту:

$$\omega_o = \frac{2\pi f_{cm} \varphi}{p} = \omega_{o_{cm}} \varphi \text{ и } x_k = 2\pi f_{cm} \varphi L_k = x_{k_{cm}} \varphi.$$

Подставив значения этих параметров в формулу (2.52), получим выражение для критического момента при изменении частоты тока:

$$M_k = \frac{m}{2\omega_{o_{cm}}} \frac{U_1^2}{x_{k_{cm}} \varphi^2}. \quad (2.53)$$

С учетом выражения (2.52) можно записать:

$$M_k = \frac{M_{k_{cm}}}{\varphi^2}. \quad (2.54)$$

Из этого выражения следует, что критический момент обратно пропорционален квадрату частоты тока.

Если в формуле (2.44) пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, то критическое скольжение при изменении частоты тока будет

$$s_k = \frac{s_{k_{cm}}}{\varphi}. \quad (2.55)$$

Жесткость рабочей ветви механической характеристики двигателя при снижении частоты возрастает, поскольку разность между синхронной и критической угловой скоростью от частоты тока не зависит. Это следует из того, что

$$s_k \omega_o = \omega_o - \omega_k = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{s_{k_{cm}}}{\varphi} \omega_{o_{cm}} \varphi = \omega_o - \omega_k = \text{const}.$$

Искусственные механические характеристики двигателя при частотах тока, отличных от номинальной, можно построить по уравнениям (2.47) или (2.48), пересчитав соответственно величины максимального момента и критического скольжения по формулам (2.53) и (2.55). Эти характеристики при относительных частотах $\varphi = 0,5; 1; 2$ приведены на рис. 38. Как следует из выражения (2.53) и видно на рис. 38 перегрузочная способность и пусковой моменты двигателя сильно падают при увеличении частоты тока, что является большим недостатком этих искусственных характеристик. С точки зрения практики частотного регулирования скорости асинхронных двигателей, представляют большой интерес искусственные характеристики при одновременном регулировании частоты тока и напряжения, подводимого к обмоткам статора, по закону $U/f = \text{const}$, т.е. пропорциональном изменении этих параметров. Если при учесть, что критический момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения, то при изменении напряжения и частоты выражение (2.53) можно записать как:

$$M_k = \frac{m}{2\omega_{o_{cm}}} \frac{U_{1cm}^2 u^2}{x_{k_{cm}} \varphi^2} = M_{k_{cm}}, \quad (2.56)$$

где u — относительное напряжение.

Поскольку по условию изменения напряжения и частоты одинаковы, в выражении (2.56) $\varphi = u$ то, следовательно, критический момент остается неизменным. Механические характеристики, построенные по уравнению (2.56) для относительных частот и напряжений $\varphi = u = 0,5; 1$ и 2 , показаны на рис. 39 сплошными линиями. Они показывают, что максимальный момент двигателя при всех частотах остается неизменным. Реально активное сопротивление обмоток статора не равно нулю и, как показано на рис. 39 штриховыми линиями, критический и пусковой моменты с понижением частоты тока и напряжения несколько уменьшаются.

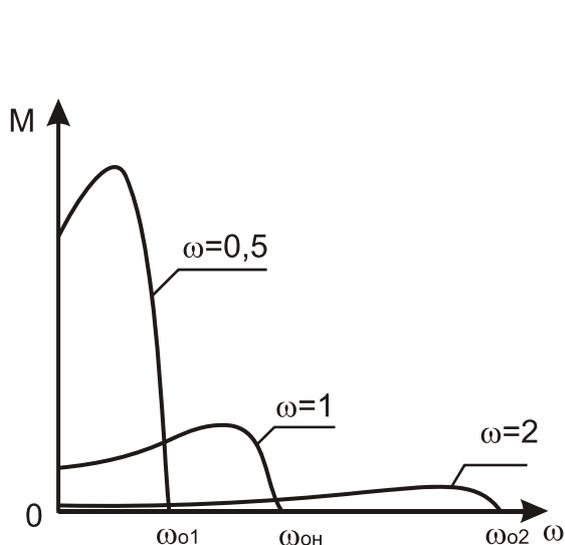


Рис. 38. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении частоты тока сети

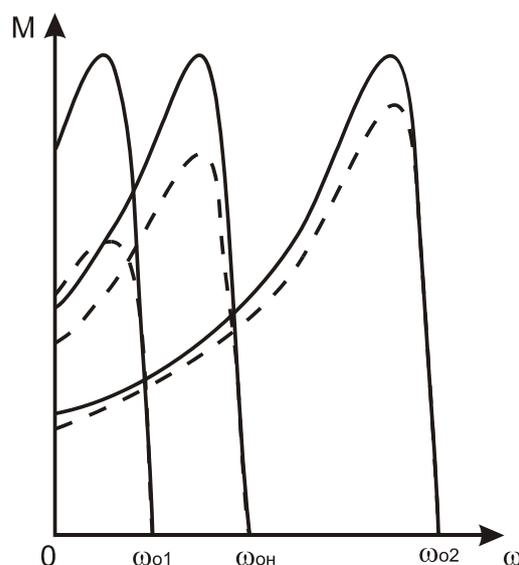


Рис. 39. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении частоты и напряжения

2.6.4. Корректирование уравнений механических характеристик короткозамкнутых двигателей

Одним из важнейших параметров электродвигателей всех типов, в том числе и асинхронных, является величина пускового момента, призванного обеспечивать надежный пуск рабочих машин с нагрузкой. У двигателей с фазным ротором увеличение пускового момента достигается за счет введения в цепь ротора добавочных активных сопротивлений, позволяющих получать пусковой момент равным критическому. У двигателей с короткозамкнутым ротором для увеличения пускового момента используется тот же прием — увеличение активного сопротивления обмотки ротора при пуске, но достигается это путем придания пазу определенной формы и использования явления вытеснения тока. Для этого паз выполняется либо в виде глубокой узкой щели (рис. 40, а, двигатель с глубоким пазом), либо в виде двух, расположенных один под другим, пазов (рис. 40, б, двигатель с двойной беличьей клеткой). В момент пуска, когда по стержням обмотки ротора протекает повышенный пусковой ток с частотой тока сети, магнитный по-

ток, создаваемый током стержня, концентрируется, главным образом, вокруг нижней части паза, т.к. здесь сопротивление магнитным силовым линиям меньше, чем в верхней части паза, где участок с неферромагнитной средой больше. В результате, в нижней части паза образуется большое индуктивное сопротивление и ток вытесняется к верхней части, что фактически означает уменьшение сечения стержня, следовательно, к увеличению его активного сопротивления. Аналогичные явления происходят и в роторе с двойной беличьей клеткой (рис. 40, б). В дальнейшем, с нарастанием скорости ротора уменьшается ток, частота тока и индуктивное сопротивление нижней части стержня. Ток распределяется равномерно по всему сечению стержня, что равнозначно уменьшению его активного сопротивления, и при скольжении, близком к критическому, двигатель выходит на естественную механическую характеристику. Варьируя формой паза и сплавами, из которых изготавливаются стержни, получают двигатели с пусковыми моментами, отвечающими требованиям ГОСТ.

Уравнения механических характеристик (2.41) и (2.47) на ветви разбега дают зависимость момента от скорости, представленную кривой 1 на рис. 41, согласно которой расчетный пусковой момент $M_{n,рас}$ далеко не совпадает с фактическим $M_{n,фак}$. Для двигателей с глубоким пазом и двойной беличьей клеткой не существует строго выведенных уравнений, отражающих действительное протекание механических характеристик. Вместе с тем, при решении различных задач динамики, переходных процессов, определения потерь и т.д. требуются уравнения, максимально отражающие реальные процессы. С этой целью некоторые авторы рекомендуют использовать искусственно подобранные уравнения механических характеристик. Одним из них является уравнение типа

$$M = \frac{2M_k(1 + \varepsilon')}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon'} \quad (2.57)$$

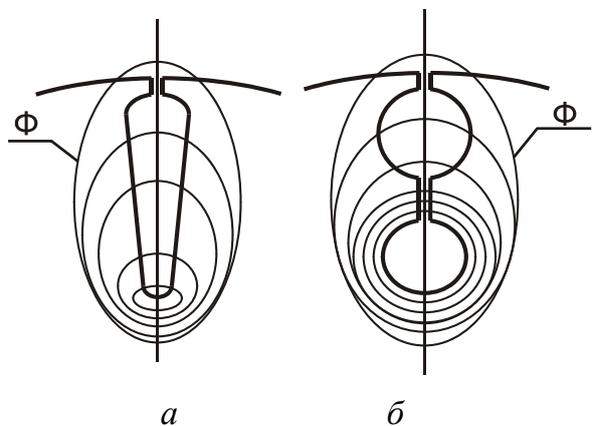


Рис. 40. Конфигурация пазов роторов короткозамкнутых асинхронных двигателей

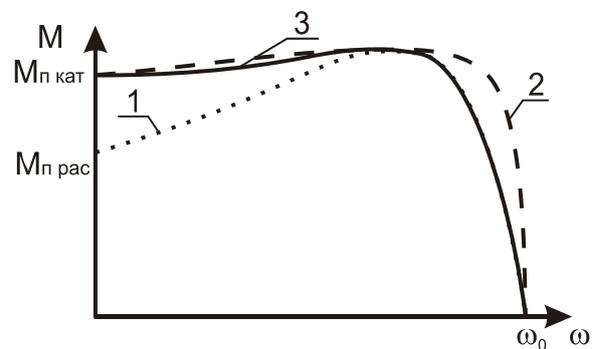


Рис. 41. Механические характеристики асинхронного двигателя с корректированием ветви разбега

Коэффициент ε' можно определить из формулы (2.57), решив его относительно ε' , в котором пусковой момент следует принять равным каталожному ($M_n = \mu_n M_n$), приняв $s = 1$, тогда

$$\varepsilon' = \frac{\frac{1}{s} + s_k - 2\lambda}{2(\lambda - 1)}, \quad (2.58)$$

где $\lambda = \mu_k / \mu_n$ — отношение кратности максимального момента к кратности пускового момента.

Механическая характеристика, построенная по уравнению (2.57) с учетом (2.58), представлена кривой 2 на рис. 41.

Такая корректировка позволяет получить уравнение механической характеристики с пусковым моментом равным каталожному и ветвью разбега близкой к реальной. Однако рабочая ветвь при этом сильно деформируется.

У асинхронных двигателей с глубоким пазом и двойной беличьей клеткой увеличение пускового момента достигается за счет эффекта вытеснения тока в стержнях и увеличения активного сопротивления стержней при низких скоростях. Поэтому логично в уравнение механической характеристики (2.41) ввести дополнительный параметр в виде активного сопротивления, определенным образом изменяющегося в зависимости от скольжения. Такое уравнение имеет вид:

$$M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 s (r_2' + R s^2)}{(r_1 s + r_2' + R s^2)^2 + x_k^2 s^2} \quad (2.59)$$

Здесь R — некоторое активное сопротивление, величину которого легко определить из выражения (2.59), подставив в него пусковой момент по каталогу при скольжении равном единице, т.е. $M = M_{n \text{ кат}}$, и $s = 1$. График механической характеристики, построенный по уравнению (2.59), представлен сплошной линией 3 на рис. 41. Из графиков рис. 41 видно, что это уравнение более полно отражает реальную механическую характеристику двигателя как на ветви разбега так и на его рабочей ветви.

Литература: [2, с. 55-85; 5, с. 58-69; 6, с. 106-115; 10, с.74-82.].

2.6.5. Тормозные режимы асинхронных двигателей

Асинхронные двигатели, как и двигатели постоянного тока, могут работать в тормозных режимах: генераторном (с отдачей электроэнергии в сеть), динамическом (с отдачей электроэнергии автономному потребителю) и противовключением.

Генераторный тормозной режим с отдачей энергии в сеть. При вращении ротора с угловой скоростью меньше скорости вращающегося магнитного поля в его обмотках наводится э.д.с. и протекает ток такого направления, при котором в воздушном зазоре возникает электромагнитный момент, направленный в сторону вращения магнитного поля и ротора. Это соответствует двигательному режиму работы, когда подведенная к двигателю электрическая энергия преобразуется в механическую, используемую для приведения в движение рабочих органов. Механические характеристики этого режима показаны на рисунке 42 сплошными линиями в диапазоне угловой скорости от 0 до $+\omega_0$ для прямого вращения и от 0 до $-\omega_0$ для обратного вращения (кривые 1 и 2).

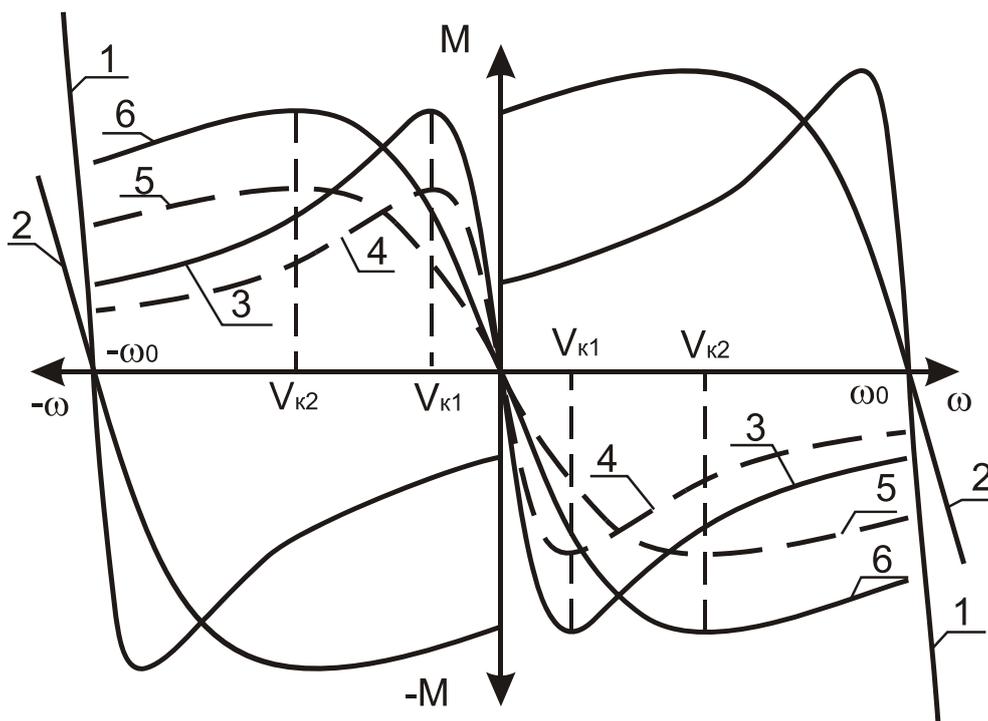


Рис. 42. Механические характеристики тормозных режимов асинхронных электродвигателей:
1 и 2 — генераторный, с отдачей электрической энергии в сеть; 3 и 4 — динамический

При вращении ротора со скоростью магнитного поля (синхронная скорость) э.д.с. и ток в роторе отсутствуют и момент двигателя равен нулю — режим идеального холостого хода. При подведении к валу двигателя дополнительной механической энергии ротор начинает вращаться со скоростью выше синхронной, э.д.с. и ток в роторе изменяют свое направление. Изменение направления тока в роторе приводит к изменению направления электромагнитного момента — он становится тормозным. Механическая энергия вращения ротора преобразуется в электрическую и отдается в сеть. Характеристики естественная 1 и реостатная 2 этого режима являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима при угловых скоростях, превышающих синхронные. Режим генераторного тормо-

жения с отдачей энергии в сеть применяется для ограничения скорости при спуске грузов на подъемных механизмах, на тормозных стендах для горячей обкатки двигателей внутреннего сгорания, для затормаживания двигателей при переходе с высшей скорости на низшую, при переключении числа пар полюсов. Метод достаточно экономичный, т.к. энергия торможения не расходуется на нагрев сопротивлений, а отдается в сеть.

Режим динамического торможения. Динамический тормозной режим получают путем отключения обмоток статора от сети переменного тока и подключения их по определенным схемам к источнику постоянного тока.

В этом случае торможение происходит по схеме независимого возбуждения. Динамическое торможение возможно также по схеме самовозбуждения, когда обмотки статора после отключения их от источника трехфазного тока подключаются к батарее конденсаторов.

В режиме динамического торможения с независимым возбуждением постоянный ток, протекая по обмоткам статора, создает постоянное неподвижное в пространстве магнитное поле. При вращении ротора в его обмотке наводится э.д.с. и протекает ток. Взаимодействие тока ротора с магнитным полем статора создает тормозной момент. Нагрузкой такого генератора служит сопротивление обмотки ротора, а в случае двигателя с фазным ротором — сопротивления ротора и внешнего резистора.

Механические характеристики динамического тормозного режима можно рассматривать как искусственные характеристики при частоте тока, питающей сети, равной нулю. Как следует из рис. 38, при уменьшении частоты тока искусственные характеристики смещаются в сторону уменьшения угловой скорости и, при частоте равной нулю (постоянный ток), они проходят через начало осей координат. На рисунке 42 эти характеристики представлены кривыми 3, 4 — при отсутствии сопротивлений в роторе и 5, 6 — при добавочных сопротивлениях.

Основные схемы подключения обмоток статора асинхронного двигателя к источнику постоянного тока в режиме динамического торможения показаны на рисунке 43. Следует иметь в виду, что обмотки статора при постоянном токе обладают только активным сопротивлением. Чтобы не допустить в них слишком больших токов, напряжение постоянного тока должно быть пониженным по сравнению с номинальным напряжением двигательного режима.

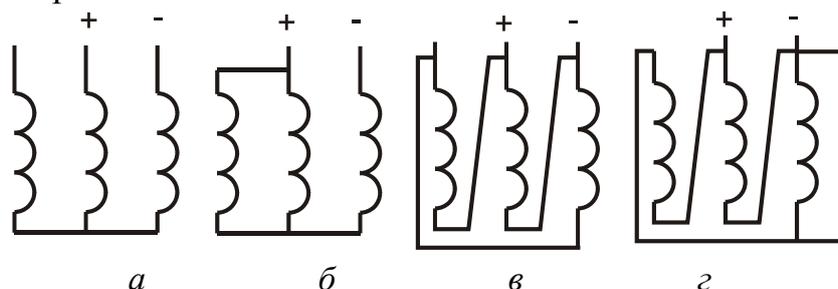


Рис. 43. Схемы включения обмоток статора асинхронного двигателя при динамическом торможении

При протекании постоянного тока по обмоткам статора создаваемая им результирующая намагничивающая сила зависит от величины тока и схемы соединения обмоток. На рис. 44 показаны векторы МДС, соответствующие номерам фаз (рис. 43), и их пространственные сдвиги. Так для схемы, представленной на рис. 43, а, магнитодвижущие силы катушек сдвинуты между собою в пространстве на угол 60 градусов. Пользуясь векторной диаграммой м.д.с. для этой схемы, запишем зависимость результирующей м.д.с. от величины постоянного тока:

$$F_n = 2I_n \omega_1 \cos 30^\circ = 2I_n \omega_1 \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_n \omega_1.$$

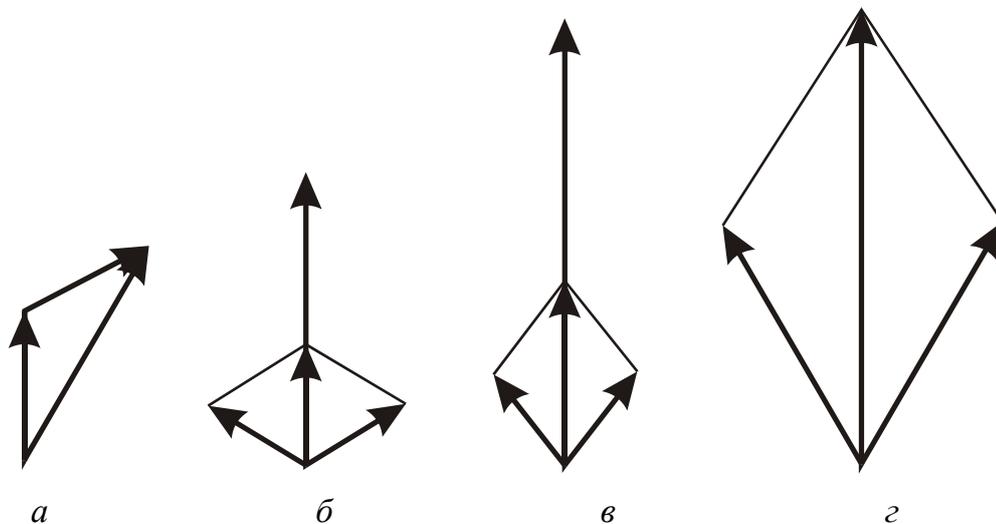


Рис. 44. Векторные диаграммы намагничивающих сил для схем динамического торможения

Согласно теории вращающегося магнитного поля, такая же м.д.с. может быть создана трехфазным переменным током I_1 :

$$F_{\approx} = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_1 \omega_1.$$

Исходя из равенства $F_n = F_{\approx}$, определяем значение постоянного тока, эквивалентного переменному:

$$\sqrt{3} I_n \omega_1 = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_1 \omega_1,$$

отсюда

$$I_n \approx 1,23 I_1.$$

Следовательно, в этих условиях постоянный ток I_n должен быть больше переменного I_1 на 23%.

На рис. 44, а, б, в и г представлены векторные диаграммы для схем (рис. 43); им соответствуют значения эквивалентного постоянного тока: $I_n = 1,23 I_1$; $I_n = 1,41 I_1$; $I_n = 2,12 I_1$ и $I_n = 2,45 I_1$.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем в режиме динамического торможения, определяется потерями вторичного контура и, следовательно, может быть выражен равенством:

$$M = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{v \omega_o} = \frac{m_1 I_1^2 x_\mu^2 r_2' v}{\omega_o [r_2'^2 + (x_\mu + x_2')^2 v^2]}, \quad (2.60)$$

где $I_2' = \frac{I_1 x_\mu v}{\sqrt{r_2'^2 + (x_\mu + x_2')^2 v^2}}$ — приведенный ток ротора;

x_μ — индуктивное сопротивление намагничивающего контура статора;

$v = \omega/\omega_o$ — относительная скорость ротора.

Полученное выражение показывает, что электромагнитный момент при динамическом торможении определяется переменным током I_1 , эквивалентным постоянному току, протекающему по обмотке статора, и является функцией относительной скорости ротора.

Исследуя выражение (2.60) на экстремум, найдем, что критический момент в этом режиме M_k наступает при относительной скорости

$$v_k = \frac{r_2'}{x_\mu + x_2'}. \quad (2.61)$$

Если в уравнение (2.60) подставить значение критической скорости из (2.61), получим выражение критического момента для режима динамического торможения:

$$M_k = \frac{m I_1^2 x_\mu^2}{2 \omega_o (x_\mu + x_2')^2}.$$

После деления левой и правой частей уравнения (2.60) на полученное выражение критического момента уравнение механической характеристики приобретает вид:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{v}{v_k} + \frac{v_k}{v}}.$$

Механические характеристики динамического тормозного режима для различных значений сопротивления ротора и тока статора представлены на рис. 42. Кривые 3 и 4 соответствуют одинаковому сопротивлению ротора и различным значениям постоянного тока в обмотке статора (кривая 3 для большего тока); кривые 5 и 6 при тех же значениях постоянного тока, но при большем сопротивлении цепи ротора. Динамический тормозной режим находит весьма широкое применение в электроприводах различного назначения. Это устройства для быстрого затормаживания механизмов в металлообрабатывающих станках, для остановки кабин в бытовых лифтах и шахтных подъемниках и т.п.

Режим динамического торможения с самовозбуждением осуществляется путем отключения обмотки статора от сети трехфазного тока и замыкания ее на батарею конденсаторов (рис. 45). При вращении ротора, благодаря остаточной намагниченности сердечников, в обмотках статора наводится первоначальная незначительная э.д.с., вызывающая протекание опережающего емкостного тока, который усиливает магнитный поток. Это приводит к дальнейшему нарастанию тока в обмотках статора и усилению магнитного потока до полного возбуждения двигателя, обусловленного кривой намагничивания сердечников, емкостью конденсаторов и сопротивлением намагничивающего контура. Установившийся магнитный поток способствует наведению э.д.с. в обмотках ротора и протеканию по ним тока. Двигатель работает, как асинхронный генератор с самовозбуждением, в котором генерируемая электрическая энергия выделяется в виде тепла в роторной цепи. Механические характеристики этого тормозного режима для различных значений емкости приведены на рисунке 46. Такой динамический тормозной режим не находит широкого применения ввиду того, что двигатель развивает тормозной момент на сравнительно узком диапазоне скорости: он возникает при скорости около половины синхронной, а его срыв происходит задолго до достижения последней. Кроме того, для получения необходимого тормозного момента при низких скоростях требуется большая емкость дорогостоящих конденсаторов.

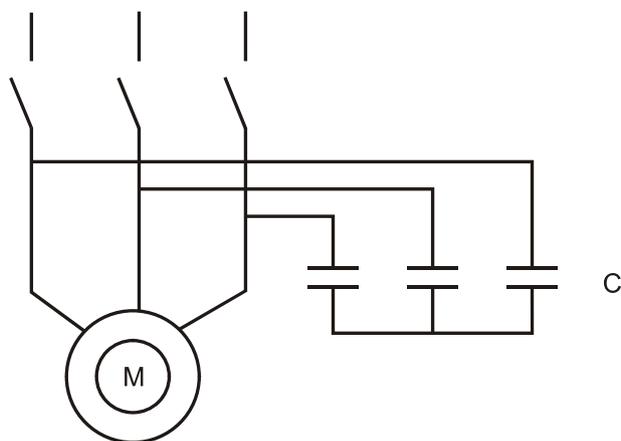


Рис. 45. Схема включения асинхронного двигателя при динамическом торможении с самовозбуждением

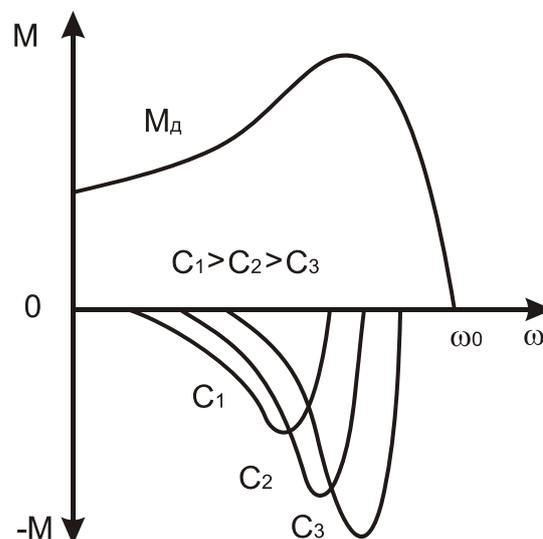


Рис. 46. Механические характеристики при динамическом торможении с самовозбуждением

Торможение противовключением. Тормозной режим противовключением наступает в том случае, когда ротор принудительно приводится во вращение в сторону, противоположную включению двигателя,

т.е. против направления вращения магнитного поля статора. Двигатель с коротко-замкнутым ротором в режиме противовключения работает на участке ab (кривая 1 на рис. 47) неустойчивой ветви механической характеристики, и его работа сопровождается протеканием по обмоткам статора и ротора больших

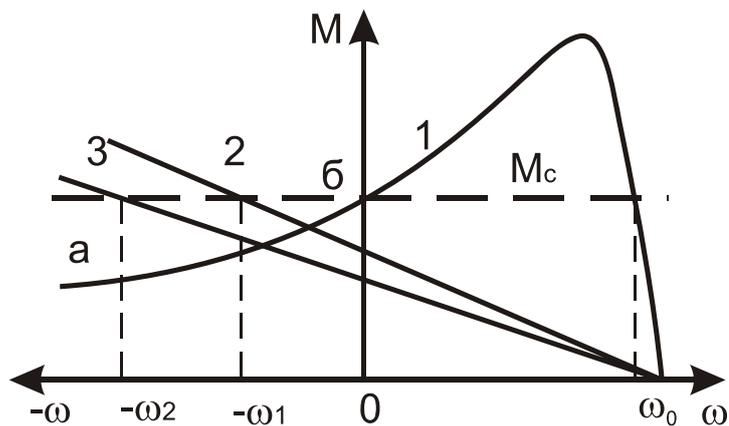


Рис. 47. Механические характеристики торможения противовключением

токов. У двигателей с фазным ротором такой режим может осуществляться на рабочей ветви механической характеристики, если в цепь ротора вводить активные сопротивления, обеспечив соответствующий наклон рабочей ветви (кривые 2 и 3 на рис. 47). Так, при нагрузке моментом сопротивления M_c (например момент, создаваемый подвешенным грузом на барабане лебедки), равновесие моментов наступает при отрицательной скорости ротора. Меняя величину активного сопротивления, можно изменять скорость при спуске груза ($-\omega_1, -\omega_2$ и т.д.). Тормозные режимы противовключением могут быть реализованы двумя методами: методом реверсирования и методом тормозного спуска. В первом случае при вращении ротора в одном направлении производят быстрое изменение чередования фаз обмотки статора. Скорость ротора в момент переключения остается прежней, двигатель переходит на механическую характеристику обратного вращения, развивая тормозной момент до полной остановки ротора. Такое торможение является весьма жестким, сопровождается большими токами в обмотках, динамическими ударами в передаточных механизмах, большими потерями энергии. Практически может применяться в электроприводах небольшой мощности при сравнительно легких инерционных массах.

Тормозные режимы противовключением на рабочей ветви механической характеристики двигателей с фазным ротором широко используются в приводах подъемно-транспортных механизмов при спуске грузов. Поэтому режим иногда называют режимом тормозного спуска.

Литература: [2, с. 75-80; 6, с. 153-158; 10, с. 82-89.].

2.6.6. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений

При пуске асинхронных электродвигателей с фазным ротором в цепь обмотки ротора включаются добавочные активные сопротивления с целью увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока. Величина пускового

сопротивления должна рассчитываться так, чтобы при скорости, равной нулю, пусковой момент двигателя равнялся критическому. Рабочая ветвь механической характеристики асинхронных двигателей принимается линейной, и на этом основании производится расчет пусковых сопротивлений графическим методом по аналогии с методикой, применяемой для двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Однако в зоне критических скольжений реальные характеристики асинхронных двигателей существенно отличаются от линейных. Это вносит значительные погрешности в результаты расчетов, а построение пусковой диаграммы по уравнениям механических характеристик является весьма трудоемким. Анализируя соотношения величин, входящих в уравнения механических характеристик асинхронных двигателей при введении сопротивлений в ротор, можно прийти к аналитическим методам расчета пусковых и тормозных сопротивлений.

Аналитический метод. Для расчета пусковых сопротивлений необходимо задаться моментами: пусковым, максимальным M_1 и моментом переключения M_2 . Момент переключения в процессе расчета может изменяться, чтобы после отключения последней ступени сопротивления обеспечивался выход на естественную характеристику при моменте M_1 .

Соответствующие этим моментам скольжения s_{o1} и s_{o2} на рабочей ветви естественной механической характеристики в точках a и b (рис. 48) находим из упрощенной формулы Клосса как:

$$s_{o1} = \frac{s_k}{\alpha_1} (1 - \sqrt{1 - \alpha_1^2}), \quad (2.62)$$

$$s_{o2} = \frac{s_k}{\alpha_2} (1 - \sqrt{1 - \alpha_2^2}). \quad (2.63)$$

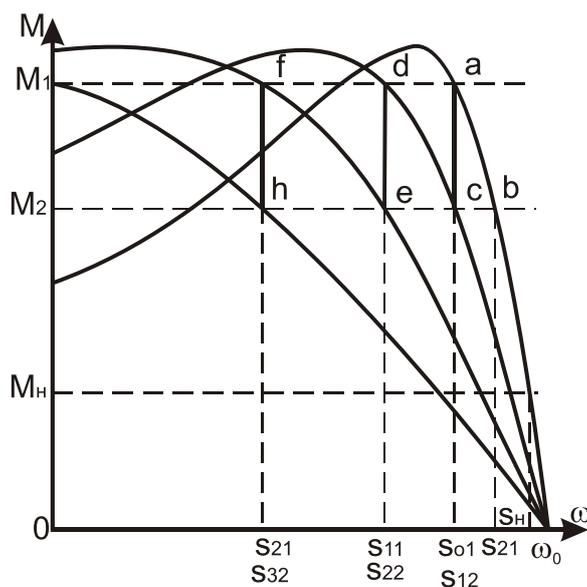


Рис. 48. К расчету пусковых сопротивлений аналитическим методом

Здесь и далее первая цифра индекса скольжения указывает на номер характеристики, начиная от естественной, вторая — на индекс пускового момента; s_k — критическое скольжение на естественной характеристике.

В выражениях (2.62) и (2.63)

$$\alpha_1 = \frac{M_1}{M_k} \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \frac{M_2}{M_k}, \quad (2.64)$$

где M_k — критическое скольжение.

Введем обозначение для отношения скольжений при пусковых моментах:

$$C = \frac{s_{o1}}{s_{o2}}. \quad (2.65)$$

С другой стороны, отношение скольжений в точках c и b можно выразить через активные сопротивления фазы обмотки ротора как

$$\frac{s_{o1}}{s_{o2}} = \frac{r_2 + R_1}{r_2}, \quad (2.66)$$

откуда следует, что

$$C = \frac{r_2 + R_1}{r_2} \quad (2.67)$$

где r_2 и R_1 — соответственно активное сопротивление фазы обмотки ротора и добавочное сопротивление для первой после естественной механической характеристики.

По аналогии можно составить отношения скольжений для последующих искусственных механических характеристик. Отношение скольжений в точках a и d равно отношению скольжений в точках c и e :

$$\frac{s_{11}}{s_{01}} = \frac{s_d}{s_a} = \frac{s_e}{s_c} = \frac{r_2 + R_1}{r_2} = \frac{r_2 + R_2}{r_2 + R_1}. \quad (2.68)$$

С учетом (2.66) следует, что

$$C = \frac{s_{01}}{s_{02}} = \frac{s_{11}}{s_{01}},$$

отношение скольжений в точках d и f равно отношению скольжений в точках e и h , следовательно, с учетом формул (2.66) и (2.68),

$$C = \frac{s_{01}}{s_{02}} = \frac{s_{11}}{s_{01}} = \frac{s_{12}}{s_{11}}.$$

На основании приведенных соотношений можно составить равенства:

$$C = \frac{s_{11}}{s_{01}} = \frac{s_{21}}{s_{11}} = \frac{s_{31}}{s_{21}} = \dots = \frac{s_{m1}}{s_{m1-1}}, \quad (2.69)$$

где s_{m1} — скольжение на последней от естественной (или 1-й пусковой) характеристике при моменте M_l ;

s_{m1-1} — скольжение на механической характеристике при отключении 1-й ступени сопротивления (2-й пусковой) при моменте M_l .

Из этих соотношений следует, что

$$\frac{s_{11}}{s_{01}} = \frac{s_{21}}{s_{11}}. \quad (2.70)$$

Умножив обе части равенства (2.70) на отношение s_{11}/s_{01} , после небольших преобразований получим

$$\frac{s_{21}}{s_{01}} = C^2.$$

Следуя логике выражений (2.69) и (2.70), можно показать, что

$$C = \frac{s_{11}}{s_{01}}, \quad C^2 = \frac{s_{21}}{s_{01}}, \quad C^3 = \frac{s_{31}}{s_{01}}, \dots, \quad C^m = \frac{s_{m1}}{s_{01}}. \quad (2.71)$$

Сопротивление в цепи ротора, соответствующее работе двигателя на ближайшей к естественной характеристике, можно записать из формул (2.66) и (2.67) как:

$$R_1 = r_2(C - 1).$$

Из выражения (2.68) с учетом (2.71) сопротивление, соответствующее второй от естественной характеристике:

$$R_2 = r_2(C^2 - 1).$$

По аналогии, для m -й искусственной характеристики, считая от естественной, т.е. для первой пусковой, сопротивление в цепи ротора определится из выражения:

$$R_m = r_2(C^m - 1). \quad (2.72)$$

Первая пусковая характеристика должна проходить через точку с координатами $s_{m1} = 1$ и M_1 , поэтому из формулы (2.71) следует, что

$$C^m = \frac{1}{s_{01}}. \quad (2.73)$$

Определив из формулы (2.65) значение C , находим число ступеней пускового резистора, решив выражение (2.73) относительно m :

$$m = \frac{\ln\left(\frac{1}{s_{o1}}\right)}{\ln(C)}. \quad (2.74)$$

В том случае, если число ступеней получится дробным, или потребуется большее число ступеней, чем найденное из выражения (2.74), необходимо его довести до требуемого целого числа m' . Изменение числа ступеней повлечет за собою изменение числа C и момента переключения M_2 . Новое значение числа C , в дальнейшем как C' , определяется из выражения (2.73) при принятом числе ступеней m' :

$$C' = \sqrt[m']{\frac{1}{s_{o1}}}. \quad (2.75)$$

Выражение (2.72) для определения полного добавочного сопротивления должно быть выражено через параметры для новых значений числа ступеней m' и C' :

$$R_{m'} = r_2(C'^{m'} - 1). \quad (2.76)$$

Сопротивления для второй и последующих пусковых характеристик запишутся аналогично:

$$R_{m'-1} = r_2(C'^{m'-1} - 1), \\ R_{m'-2} = r_2(C'^{m'-2} - 1) \text{ и т.д.}$$

Тогда сопротивления отдельных ступеней пускового резистора r_{icm} определяются как:

$$r_{1cm} = R_{m'} - R_{m'-1} = r_2(C'^{m'} - 1) - r_2(C'^{m'-1} - 1) = r_2 C'^{m'-1} (C' - 1), \quad (2.77) \\ r_{2cm} = R_{m'-1} - R_{m'-2} = r_2 C'^{m'-2} (C' - 1), \\ r_{m'cm} = r_2 (C' - 1).$$

В случае, если требуется определить момент переключения M'_2 при принятом числе ступеней m' , необходимо из формулы (2.65) определить значение s'_{o2} , как

$$s'_{o2} = \frac{s_{o1}}{C'}, \quad (2.78)$$

далее преобразовав выражение (2.63) к виду

$$\alpha'_2 = \frac{2s_k s'_{o2}}{s'^2_{o2} + s_k^2}, \quad (2.79)$$

находим величину α'_2 и из формулы (2.64) момент M'_2 .

Пример расчета пусковых сопротивлений. Для двигателя МТФ111-6УЗ рассчитать пусковое сопротивление, число ступеней и сопротивления каждой ступени. Паспортные и каталожные данные двигателя: $P_n = 3,5$ кВт, $n_n = 895$ об/мин, $n_o = 1000$ об/мин, $\mu_k = 2,36$; $U_{2н} = 165$ В; $I_{2н} = 15$ А.

По известным соотношениям вычисляем: $s_n = 0,105$; $s_k = 0,473$; $M_n = 37$ Нм и $M_k = 88$ Нм.

Задаемся условиями: момент сопротивления $M_c = M_n$, падение напряжения при пуске $\Delta U = 4\%$, принимаем максимальный пусковой момент $M_1 = \kappa_u^2 M_k$, момент переключения (предварительно) $M_2 = 1,15 M_c$.

Решение. Из выражений (2.64) определяем значения кратности пусковых моментов:

$$\alpha_1 = \frac{M_1}{M_k} = 0,92 \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \frac{M_2}{M_k} = 0,466.$$

Из формул (2.62) и (2.63) находим скольжения на рабочей ветви естественной механической характеристики при заданных значениях пусковых моментов:

$$s_{o1} = \frac{s_k}{\alpha_1} (1 - \sqrt{1 - \alpha_1^2}) = 0,312,$$

$$s_{o2} = \frac{s_k}{\alpha_2} (1 - \sqrt{1 - \alpha_2^2}) = 0,117.$$

Отношение скольжений на естественной характеристике при пусковых моментах находим из выражения (2.65):

$$C = \frac{s_{o1}}{s_{o2}} = 2,674.$$

Отношение скольжений на первой пусковой характеристике при M_1 , $s = 1$ и при M_2 , s_{o1} определяется из формулы (2.73), а из (2.74) — число ступеней пускового резистора:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{1}{s_{o1}}\right)}{\ln(C)} = 1,183.$$

Полученное число ступеней округляем до целого. Принимаем $m' = 2$.

Этому числу ступеней, согласно выражения (2.75), должно соответствовать новое отношение скольжений на естественной характеристике при M_1 и новом моменте переключения:

$$C' = \sqrt[m']{\frac{1}{s_{o1}}} = 1,789.$$

Активное сопротивление фазы ротора определяется как:

$$r_2 = \frac{U_{2H} S_H}{\sqrt{3} I_H} = 0,667 \text{ Ом.}$$

Полное добавочное сопротивление находим из формулы (2.76):

$$R_{m'} = r_2 (C'^{m'} - 1) = 1,468 \text{ Ом,}$$

сопротивления ступеней из формулы (2.77):

$$r_{1cm} = r_2 C'^{m'-1} (C' - 1) = 0,942 \text{ Ом,}$$

$$r_{2cm} = r_2 C'^{m'-2} (C' - 1) = 0,526 \text{ Ом.}$$

Определяем величину момента переключения при двух ступенях сопротивлений. Для этого вначале из формулы (2.78) находим скольжение на естественной характеристике при новом значении момента переключения:

$$s'_{o2} = \frac{S_{o1}}{C'} = 0,175,$$

затем из формулы (2.79) кратность при этом моменте:

$$\alpha'_2 = \frac{2s_k s'_{o2}}{s'^2_{o2} + s_k^2} = 0,65$$

и момент переключения из выражения (2.64) (окончательно):

$$M'_2 = M_k \alpha'_2 = 57,2 \text{ Нм.}$$

Расчет сопротивлений тормозных режимов. При расчете резистора для генераторного торможения с заданными параметрами M_2 и ω_2 (рис. 49) вычисляется обычным образом скольжение на искусственной характеристике тормозного режима s_2 , по формуле (2.62) — скольжение s_{o2} на естественной характеристике при том же моменте, по формуле (2.71) — коэффициент C_2 и по формуле (2.64) — кратность моментов:

$$s_2 = \frac{\omega_o - \omega_2}{\omega_o}, \quad s_{o2} = \frac{s_k}{\alpha_2} (1 - \sqrt{1 - \alpha_2^2}), \quad C_2 = \frac{s_2}{s_{o2}}, \quad \alpha_2 = \frac{M_2}{M_{к2}}.$$

Здесь $M_{к2}$ — критический момент для генераторного режима, который можно определить, как

$$M_{к2} = M_k \frac{1 + s_k}{1 - s_k},$$

где M_k и s_k — критический момент и критическое скольжение на естественной характеристике в двигательном режиме.

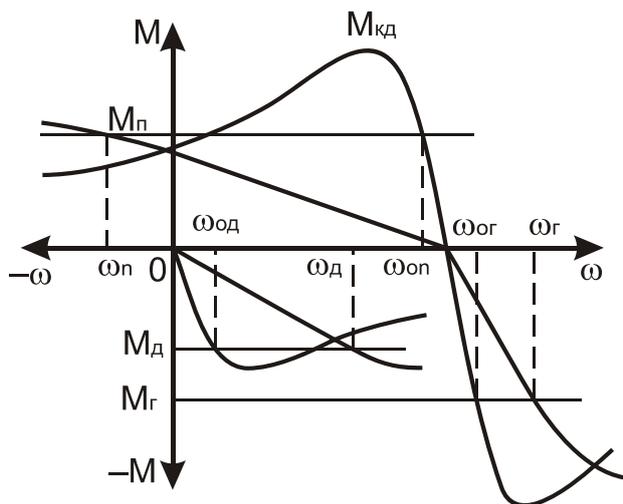


Рис. 49. К расчету сопротивлений для тормозных режимов

том же моменте; по формуле (2.71) — коэффициент C_n , и по формуле (2.64) — кратность моментов α_n . Искомое сопротивление определяется как

$$R_n = r_2(C_n - 1).$$

Для динамического тормозного режима расчет резисторов ведется аналогичным образом. При заданных параметрах торможения ω_∂ и M_∂ определяются значения относительных скоростей v_∂ и $v_{\partial\partial}$ на искусственной и естественной характеристиках:

$$v_\partial = \frac{\omega_\partial}{\omega_o}, \quad v_{\partial\partial} = \frac{v_{k\partial}}{\alpha_\partial} (1 - \sqrt{1 - \alpha_\partial^2}),$$

где $\alpha_\partial = \frac{M_\partial}{M_{k\partial}}$.

Критический момент $M_{k\partial}$ и относительная критическая скорость $v_{k\partial}$ на безреостатной характеристике динамического тормозного режима определяются из выражений:

$$M_{k\partial} = \frac{m I_1^2 x_\mu^2}{2(x_\mu + x'_2)} \quad \text{и} \quad v_{k\partial} = \frac{r'_2}{x_\mu + x'_2}.$$

Входящие в эти выражения параметры обмоток вычисляются для схемы замещения обычными методами. Соответствующее тормозное сопротивление определяется из выражения (2.72):

$$R_\partial = r_2(C_\partial - 1),$$

в котором $C_\partial = \frac{v_\partial}{v_{\partial\partial}}$.

Легко убедиться, что аналитический метод расчета пусковых и тормозных сопротивлений ДПТ независимого и параллельного возбуждения является частным случаем приведенного метода, если рабочие ветви механических характеристик асинхронного двигателя принять прямолинейными. Так, если на

Искомое сопротивление определяется из выражения (2.72) как:

$$R_c = r_2(C_c - 1).$$

Расчет сопротивления для тормозного режима противовключением ведется по заданным угловой скорости торможения ω_n и тормозному моменту M_n . По скорости торможения вычисляется скольжение s_n на искусственной характеристике тормозного режима; по формуле (2.62) скольжение s_{on} на естественной характеристике двигателя при

участке $\omega_0 - a$ (рис. 48) принять механическую характеристику линейной, то треугольники $\omega_0 s_{01} a$ и $\omega_0 s_{02} b$ подобны. Из пропорциональности сторон этих треугольников отношение скольжений в формуле (2.64) можно заменить отношением соответствующих моментов, из чего следует, что $C = \lambda$. Подставляя в выражение (2.74) это значение C , получим известное выражение для расчета числа ступеней сопротивлений этих двигателей:

$$m = \frac{\ln \frac{R_m}{r_a}}{\ln \lambda},$$

где R_m — полное сопротивление якорной цепи в расчете числа ступеней асинхронного двигателя, оно же — полное добавочное сопротивление в цепи фазы ротора.

Компьютерный метод расчета пусковых сопротивлений асинхронных двигателей. Применение компьютеров значительно облегчает процесс расчета сопротивлений. Расчет осуществляется в два этапа. Вначале рассчитывается пусковая диаграмма, позволяющая определить скольжения, при которых происходит отключение ступеней сопротивлений и их число. После этого рассчитываются полное пусковое сопротивление и сопротивления каждой ступени. Для расчета пусковой диаграммы необходимо задаться максимальным пусковым моментом с учетом возможного падения напряжения, $M_1 = k_u^2 M_{ке}$ и моментом переключения $M_2 = (1,1 \dots 1,3) M_c$. Здесь k_u — коэффициент падения напряжения и M_c — момент сопротивления на валу двигателя. Пусковая диаграмма рассчитывается из условия, что пуск двигателя происходит при полном пусковом сопротивлении, максимальном пусковом моменте и критическом скольжении равном 1. Выход на безреостатную характеристику происходит путем последовательного отключения ступеней пусковых сопротивлений при скольжении $s_{ке}$. Отключение ступеней сопротивлений происходит при моменте M_2 .

Для вычисления скольжений, при которых происходит отключение ступеней сопротивлений при моменте M_2 , в память ПК необходимо ввести соответствующие уравнения, полученные из упрощенной формулы Клосса:

$$s_i = s_{ki-1} \left(\frac{M_1}{M_2} - \sqrt{\left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 - 1} \right).$$

При расчете пусковой диаграммы принято, что критическим скольжением каждой последующей искусственной механической характеристики является скольжение на предыдущей характеристике при моменте M_2 , то есть $s_i = s_{ki-1}$ (рис. 50). Последним вычисляется скольжение, равное или меньше критического на естественной характеристике. Если это последнее скольжение не равно крити-

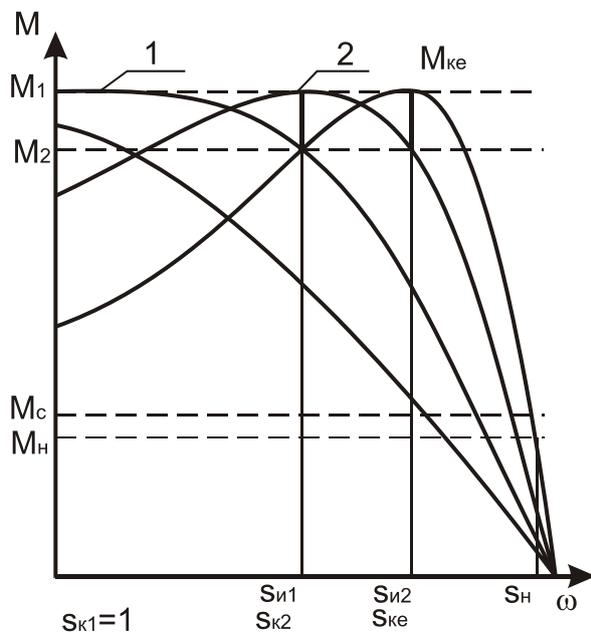


Рис. 50. К расчету пусковых сопротивлений компьютерным методом

Следовательно, для первой искусственной характеристики пусковое сопротивление равно:

$$R_0 = r_2 \left(\frac{1}{s_{ке}} - 1 \right).$$

После отключения сопротивления

– первой ступени: $R_{0-1} = r_2 \left(\frac{s_{k2}}{s_{ке}} - 1 \right),$

– второй $R_{0-2} = r_2 \left(\frac{s_{k3}}{s_{ке}} - 1 \right).$

И так для всех искусственных характеристик.

Сопротивление первой ступени определится как $r_{1cm} = R_0 - R_{0-1}$, второй $r_{2cm} = R_{0-1} - R_{0-2}$ и т.д. для всех ступеней.

Литература: [3, с. 191-197; 6. с. 120-122; 7. с. 56-60].

2.6.7. Механические характеристики асинхронных двигателей при асимметрии напряжений

Асимметрия напряжений в низковольтных трехфазных сетях довольно распространенное явление, хотя на практике принимаются меры по ее устранению или уменьшению. Асимметрия возникает в тех случаях, когда от трехфазной линии одновременно питаются трехфазные электродвигатели и неравномерно распределенные однофазные потребители. Асимметрия увеличивается, если линии имеют значительную протяженность и малое сечение проводов. Она может возникнуть из-за обрыва или большого со-

четскому $s_{ке}$, необходимо изменять в приведенной формуле значение момента переключения M_2 до совпадения вычисленного скольжения с $s_{ке}$. При этом следует иметь в виду, что момент переключения не должен приниматься меньше $1,1 M_c$.

Для расчета сопротивления отдельных ступеней воспользуемся известными соотношениями:

$$s_{ке} = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \quad \text{и} \quad s_{ki} = \frac{r_2 + R_i}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}.$$

В результате совместного их решения относительно R_i , получим:

$$R_i = r_2 \left(\frac{s_{ki}}{s_{ке}} - 1 \right).$$

противления нулевого провода. Ее можно получить искусственно, включив в одну из фаз однофазный автотрансформатор. Асимметрия напряжений оказывает отрицательное влияние на работу трехфазных двигателей, т.к. приводит к уменьшению вращающего момента и потере мощности. Как известно, несимметричное напряжение можно разложить на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности. Поскольку нулевой провод к обмоткам двигателей не подводится, напряжение нулевой последовательности можно не учитывать.

Напряжения прямой и обратной последовательности обуславливают протекание в обмотках статора симметричных составляющих токов прямой и обратной последовательностей. Эти токи создают магнитные поля, вращающиеся во взаимно противоположных направлениях. Величина каждого из этих полей зависит от степени асимметрии. Для каждого вращающегося магнитного поля можно записать уравнение механической характеристики двигателя:

$$M_{np} = \frac{2M_{к.пр}(1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon}, \quad (2.80)$$

$$M_{обр} = -\frac{2M_{к.обр}(1 + \varepsilon)}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s} + 2\varepsilon}. \quad (2.81)$$

Здесь $M_{к.пр}$ и $M_{к.обр}$ — соответственно критические моменты, обусловленные напряжениями прямой и обратной последовательностей. Для ротора, вращающегося в сторону поля прямой последовательности, скольжение выражается как s , а относительно поля обратной последовательности — как $(2 - s)$. Численные значения критических моментов определяются из выражений:

$$M_{к.пр} = M_{к.сим} \left(\frac{U_{np}}{U_{сим}} \right)^2$$

и

$$M_{к.обр} = M_{к.сим} \left(\frac{U_{обр}}{U_{сим}} \right)^2,$$

где U_{np} и $U_{обр}$ — напряжения прямой и обратной последовательностей.

Механические характеристики асинхронного двигателя при симметричном напряжении $M_{сим}$, для напряжений прямой и обратной последовательностей M_{np} и $M_{обр}$, а также суммарная характеристика $M = M_{np} + M_{обр}$ представлены на рисунке 51, из которых видно, что в двигательном режиме прямого вращения результирующая характеристика M проходит ниже характеристики, полученной при симметричном напряжении. Из этого следует, что даже незначительный перекос напряжений сети может суще-

ственно уменьшить пусковой, максимальный и номинальный моменты и при нагрузках, не превышающих номинальную, двигатель может перегреваться.

Предельной асимметрией напряжений является однофазное включение двигателя, когда коэффициент асимметрии, определяемый как отношение напряжения обратной последовательности к напряжению прямой последовательности, равен единице. В этом случае величина магнитного поля прямого вращения равна величине поля обратного вращения.

Механические характеристики $M_{пр}$ и $M_{обр}$ одинаковы и действуют во взаимно противоположных направлениях. При скорости вала, равной нулю, моменты прямого и обратного вращения одинаковы, а результирующий момент равен нулю. Следовательно, при питании трехфазного двигателя от однофазной сети он не развивает пускового момента. При скоростях, отличных от нуля, направление суммарного вращающего момента двигателя совпадает с направлением вращения.

Литература [2, с. 81-84].

2.6.8. Механические характеристики однофазных асинхронных двигателей

Тот факт, что при полной асимметрии напряжений, то есть при однофазном токе, асинхронный двигатель способен развивать вращающие моменты, свидетельствует о возможности использования однофазных двигателей. Однофазный двигатель — это двигатель, на статоре которого уложена только одна обмотка, по которой протекает однофазный ток. Этот ток создает в двигателе переменный, изменяющийся по закону синуса и неподвижный в пространстве магнитный поток. Этот магнитный поток может быть представлен суммой двух одинаковых по величине, вращающихся во взаимно противоположных направлениях, с одинаковой скоростью магнитных потоков, каждый из которых равен половине амплитуды переменного магнитного потока. Такой двигатель, как следует из формул (2.80), (2.81) и рис. 51, не развивает момента при скорости равной нулю. Для создания пускового момента необходимо присутствие признаков многофазного тока: на статоре должно быть уложено не менее двух обмоток,

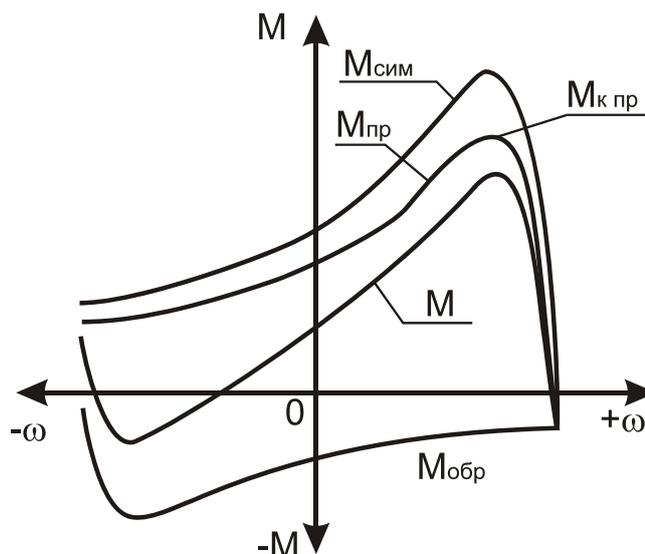


Рис. 51. Механические характеристики асинхронных двигателей при асимметрии напряжения сети

сдвинутых между собою в пространстве, и протекание по этим обмоткам токов, сдвинутых между собою по фазе. Одна из этих обмоток называется основной или рабочей, вторая — вспомогательной или пусковой. В цепь пусковой обмотки вводятся элементы, обеспечивающие сдвиг по фазе тока этой обмотки относительно тока рабочей обмотки. В качестве фазосдвигающих элементов используются омические сопротивления или конденсаторы. Рабочая обмотка и цепь пусковой обмотки с фазосдвигающими элементами включаются между собою параллельно.

На рис. 52 показаны схема включения *a* и упрощенная векторная диаграмма *б* однофазного двигателя при омическом сопротивлении в цепи пусковой обмотки (резисторный пуск). Ток рабочей $I_{раб}$ и ток пусковой обмотки $I_{пуск}$ сдвинуты между собою по фазе на угол θ . Эти токи создают магнитодвижущие силы (на рисунке 52 обозначены теми же символами, что и токи), совпадающие по фазе со своими токами, и сдвинутые между собою на тот же угол θ .

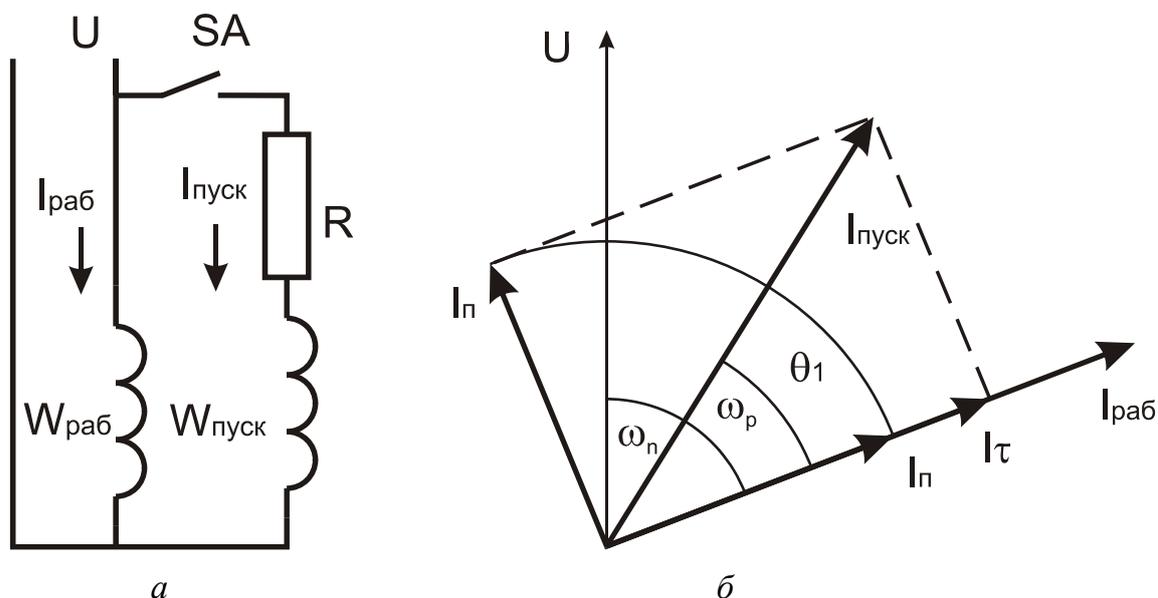


Рис. 52. Схема включения (а) и векторная диаграмма (б) однофазного двигателя с резисторным пуском

М.д.с. пусковой обмотки можно разложить на составляющие: тангенциальную I_τ , совпадающую по фазе с м.д.с. рабочей обмотки, и нормальную I_n , опережающую на 90 градусов м.д.с. рабочей обмотки. Нормальная составляющая м.д.с. пусковой обмотки и равная ей по величине часть м.д.с. рабочей обмотки создают круговое вращающееся магнитное поле.

Тангенциальная составляющая м.д.с. пусковой обмотки и оставшаяся часть м.д.с. рабочей обмотки совпадают между собою по фазе, но сдвинуты в пространстве на угол, равный углу сдвига рабочей и пусковой обмоток. Они образуют суммарную пульсирующую м.д.с. Эти м.д.с. — вращающаяся и пульсирующая — складываясь, создают эллиптическое магнитное поле. Бла-

годаря круговой составляющей магнитного поля, двигатель способен развивать пусковой момент. Как видно из схемы и векторной диаграммы (рис. 52), вращающаяся составляющая магнитного поля, а следовательно и пусковой момент будут тем больше, чем ближе угол сдвига по фазе между м.д.с. пусковой и рабочей обмоток к 90 градусам, а магнитное поле ближе к круговому вращающему полю. Добиться этого за счет увеличения омического сопротивления в цепи пусковой обмотки не удастся, т.к. с увеличением сопротивления угол сдвига между токами не может быть больше чем φ_1 , при этом ток в пусковой обмотке уменьшается до нуля. Кроме того, повышенное омическое сопротивление приводит к значительным потерям мощности и перегреву пусковой обмотки. Поэтому ее включают лишь на время пуска двигателя. После разбега и отключения пусковой обмотки двигатель переходит на механическую характеристику от пульсирующего магнитного поля, образованного током рабочей обмотки.

При включении в цепь пусковой обмотки емкости (конденсаторный пуск) можно получить в ней довольно большой по величине ток, сдвинутый по фазе относительно тока рабочей обмотки на угол, близкий к 90° и более. Благодаря этому нормальная составляющая м.д.с. пусковой обмотки может быть увеличена, а пусковые моменты будут значительно превосходить по величине моменты двигателей с резисторным пуском. Следует иметь в виду, что ток в пусковой обмотке при этом достигает больших значений, поэтому после разбега двигателя пусковую обмотку отключают, либо оставляют ее включенной с небольшой частью емкости.

2.6.9. Использование трехфазных асинхронных двигателей в однофазных режимах

Для работы в однофазном режиме трехфазного асинхронного двигателя одна часть фазных обмоток статора используется в качестве рабочей обмотки, другая часть — пусковой. При выборе схемы соединения обмоток двигателя для однофазного режима напряжение, приходящееся на каждую фазную обмотку, по возможности должно быть близким к номинальному, но не превышать его. Формирование рабочих и пусковых обмоток осуществляется путем встречно-параллельного (рис.53, *a* и *b*) или встречно-последовательного соединения фазных обмоток (рис. 53, *c* и *d*). В этом случае м.д.с., образованные рабочей и пусковой обмотками сдвинуты между собою в пространстве на угол 90°. Последовательно с пусковой обмоткой включается фазосдвигающий элемент: омическое сопротивление или емкость.

Величина пускового момента трехфазных двигателей в однофазных режимах определяется типом и величиной параметров фазосдвигающих элементов в цепи пусковой обмотки. В схемах резисторного пуска при пусковом сопротивлении, равном нулю, ток в пусковой обмотке протекает максимальный, но отсутствует сдвиг по фазе токов в обмотках. С увеличением сопротивления

ток пусковой обмотки уменьшается, а сдвиг увеличивается. При определенном соотношении тока и сдвига между токами возникает максимальный пусковой момент. Дальнейшее увеличение сопротивления ведет к уменьшению тока пусковой обмотки и пускового момента до нуля.

В тех случаях, когда подводимое к двигателю напряжение равно его номинальному фазному напряжению, для резисторного пуска целесообразно использовать схемы, приведенные на рис. 53, *a* или 53, *b*. Кратность пускового момента при этом находится в пределах 0,35...0,4. При схеме, изображенной на рисунках 53, *c* и *d*, кратность пускового момента достигает 0,2. Под кратностью пускового момента здесь следует понимать отношение пускового момента в однофазном режиме к номинальному моменту трехфазного режима.

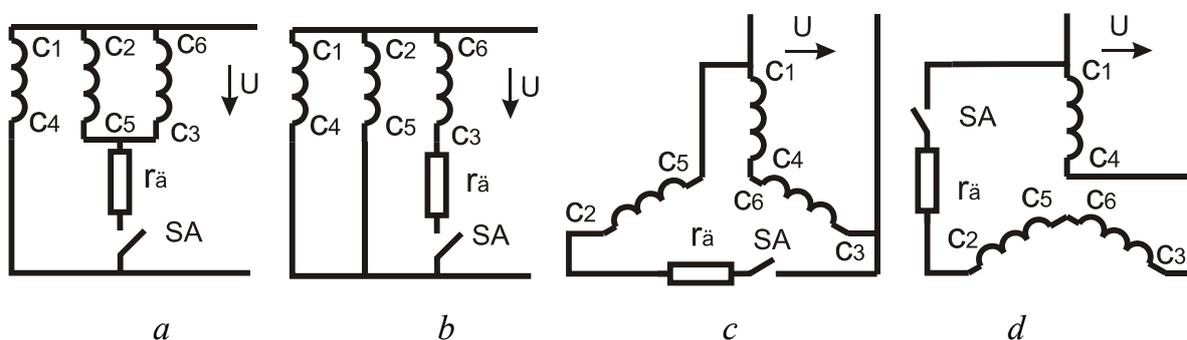


Рис. 53. Схемы включения трехфазного двигателя в однофазную сеть

В схемах с конденсаторным пуском (рис. 54) при малой емкости сдвиг между токами значительно больше 90 градусов и ток пусковой обмотки близок к нулю, поэтому пусковой момент практически отсутствует. С увеличением емкости ток в пусковой обмотке растет, сдвиг между токами уменьшается, и при угле сдвига, близком к 90° эллиптическое магнитное поле приближается к круговому, а пусковой момент достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение емкости ведет к уменьшению и тока, и сдвига, в результате чего происходит уменьшение пускового момента. На рисунке 54 приведены те же схемы включения трехфазных асинхронных электродвигателей в сеть однофазного тока, но с конденсаторным пуском. При напряжении питания, равном номинальному фазному напряжению трехфазного режима, пусковой момент при соединении обмоток двигателя по схемам рис. 54, *a* и *d* может достигать номинального. Схемы на рис. 54, *b* и *c* позволяют получить довольно значительные пусковые моменты. В схемах конденсаторного пуска при максимальных кратностях пусковых моментов возникают явления, близкие к резонансу напряжений, сопровождающиеся увеличением тока и напряжения на зажимах пусковых обмоток и конденсаторов. Поэтому включение двигателя с полной емкостью должно быть кратковременным, и после разбега

часть емкости, называемая пусковой, отключается. Пусковая обмотка с небольшой емкостью — рабочей, остается включенной. Это позволяет несколько увеличить мощность двигателя в однофазном режиме и коэффициент мощности. Величина рабочей емкости не должна превышать 1/3 от пусковой. Мощность двигателя в однофазном режиме составляет 0,55...0,6 номинальной паспортной мощности.

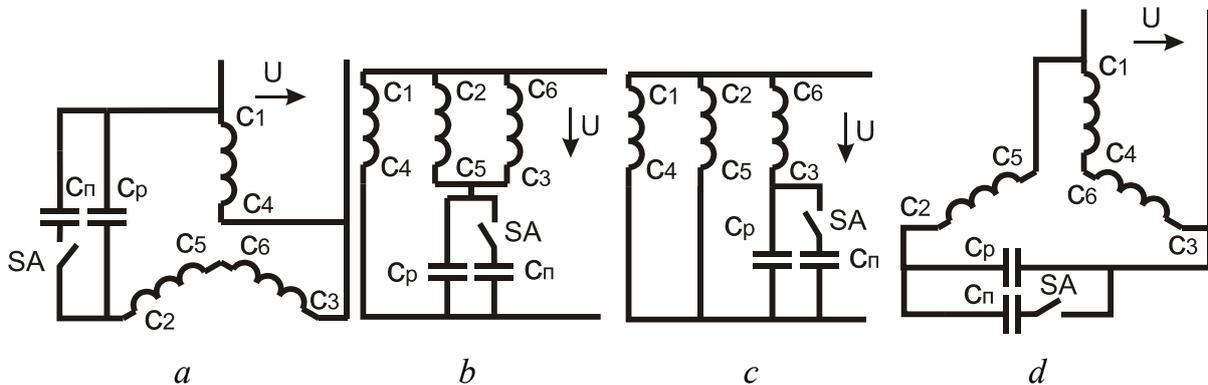


Рис. 54. Схемы включения трехфазных асинхронных двигателей в однофазную сеть при конденсаторном пуске

На рисунке 55 показана зависимость изменения кратности пускового момента μ_n от омического сопротивления при резисторном, или от емкости конденсаторов при конденсаторном пуске. Примерно такую зависимость пускового момента от величины параметров фазосдвигающих элементов имеют все схемы однофазного включения трехфазных двигателей. Для получения максимальной кратности пускового момента $\mu_{\text{макс}}$ необходимо в цепь пусковой обмотки при резисторном пуске включить омическое сопротивление из расчета $R_n = z_n$ и при конденсаторном пуске емкостное сопротивление $x_c = z_n$.

Отсюда пусковая емкость конденсаторов

$$C = \frac{10^6}{\omega x_c}, \text{ мкФ.}$$

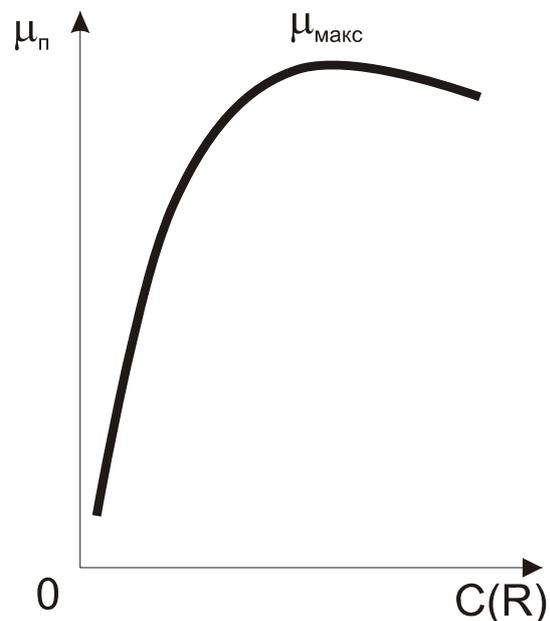


Рис. 55. Зависимость пускового момента от параметров фазосдвигающего элемента

В этих выражениях z_n — модуль полного сопротивления короткого замыкания пусковой обмотки определяется по формулам:

- в схемах (рис. 53, *a* и рис. 54, *b*) — $z_n = z_{\phi\kappa} / 2$;
- в схемах (рис. 53, *b, c* и рис. 54, *c*) — $z_n = z_{\phi\kappa}$;
- в схемах (рис. 53, *d* и рис. 54, *a, d*) — $z_n = 2 z_{\phi\kappa}$.

Сопротивление фазы двигателя при коротком замыкании, определяемое как

$$z_{\phi\kappa} = \frac{U_{\phi n}}{k_i I_{\phi n}},$$

где $U_{\phi n}$ — номинальное фазное напряжение двигателя;
 $I_{\phi n}$ — номинальный фазный ток двигателя;
 k_i — кратность пускового тока.

Литература: [2, с. 84-85; 5, с. 104-110; 6, с. 162-163].

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. Уравнение движения электропривода

Механические характеристики рабочих машин и электродвигателей дают представление о работе электропривода в установившемся (стационарном) режиме, когда силы движущие равны силам сопротивления, а скорость постоянна. Однако в реальных условиях под действием различных причин равновесие сил постоянно нарушается, в результате чего изменяется скорость и возникают инерционные силы, которые могут значительно превосходить силы, создаваемые двигателем или рабочей машиной. Эти силы, возникающие вследствие изменения скорости инерционных масс, называются динамическими, а уравнения, которые учитывают все силы и моменты, действующие в электроприводе при различных режимах работы, называются уравнениями движения. Эти уравнения вытекают непосредственно из закона сохранения энергии, согласно которому разность между количеством энергии, поступающей от двигателя и затрачиваемой на преодоление сопротивлений, равняется кинетической энергии, запасаемой в подвижных массах агрегата, т.е.

$$A_{\partial} - A_c = A_{\text{дин}}, \quad (3.1)$$

где $A_{\text{дин}}$ — запас кинетической энергии при вращательном движении:

$$A_{\text{дин}} = J \frac{\omega^2}{2} \quad (3.2)$$

и $A_{\text{дин}} = m \frac{v^2}{2}$ при поступательном движении,

где J — момент инерции вращающихся;

m — масса поступательно движущихся частей агрегата.

С учетом формулы (3.2) выражение (3.1) при вращательном движении можно записать как:

$$A_{\partial} - A_c = J \frac{\omega^2}{2}.$$

Дифференцируя это выражение по времени, получим уравнение баланса мощностей:

$$P_{\partial} - P_c = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt}.$$

В этом выражении предполагается, что момент инерции J не постоянен и является функцией угла поворота вала α .

Учитывая, что $d\alpha/dt = \omega$, запишем

$$P_{\partial} - P_c = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^3}{2} \frac{dJ}{d\alpha}. \quad (3.3)$$

Разделив правую и левую части выражения (3.3) на угловую скорость ω , получим уравнение движения электропривода

$$M_{\delta} - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \quad (3.4)$$

или

$$M_{\delta} - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (3.5)$$

Правые части этих уравнений, представляющие собою динамический момент, состоят из двух слагаемых: первое из них $J \frac{d\omega}{dt}$ — динамический мо-

мент, обусловленный изменением угловой скорости, второе $\frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}$ или

$\frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}$ — изменением момента инерции в зависимости от угла поворота вала

или от времени. Электроприводы с переменным моментом инерции встречаются довольно редко, поэтому второе слагаемое в выражениях (3.4) и (3.5) обращается в нуль, и уравнение движения приобретает более простой вид:

$$M_{\delta} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.6)$$

В полученном уравнении разность моментов $M_{\delta} - M_c$ принято называть избыточным моментом. Уравнение (3.6) показывает, что развиваемый двигателем вращающий момент M_{δ} уравнивается моментом сопротивления M_c на его валу и инерционным или динамическим моментом

$$J \frac{d\omega}{dt}, \text{ т.е. } M_{\delta} = M_c + J \frac{d\omega}{dt}.$$

Произведя аналогичные преобразования в уравнении закона сохранения энергии (3.1), получим уравнение движения при поступательном движении:

$$F_{\delta} - F_c = m \frac{dv}{dt}. \quad (3.7)$$

При пользовании уравнениями движения электропривода необходимо учитывать знаки моментов и сил. Условно одно из направлений движения какого-либо органа агрегата принимается за положительное, а обратное — за отрицательное. В большинстве случаев момент сопротивлений препятствует движению, т.е. направлен противоположно моменту двигателя, однако при определенных условиях он может и совпадать с направлением движущего момента. В выражениях (3.6) и (3.7) момент и сила двигателя считаются положительными, если они совпадают с направлением скорости, а момент и сила сопротивлений в этом случае принимаются со знаком минус.

В зависимости от направления действия моментов или сил сопротивлений при изменении направления движения они могут быть разделены на две категории: реактивные и активные, или потенциальные.

Под *реактивными моментами сопротивлений* понимают моменты, всегда препятствующие движению и меняющие свой знак при изменении направления движения. К этой категории относят моменты и силы, связанные с трением, резанием, мятьем, размалыванием, сжатием, растяжением и скручиванием неупругих тел.

Активными, или потенциальными, моментами и силами сопротивлений называют такие, направление действия которых не изменяется с изменением направления движения. К ним причисляют моменты и силы, обусловленные весом, сжатием, растяжением и скручиванием упругих тел. Действие этих моментов или усилий связано с изменением потенциальной энергии системы. Поскольку направление таких моментов (усилий) не изменяется с изменением направления движения, то в одном случае они могут препятствовать движению, а в другом способствовать ему, т.е. активно действовать на характер движения агрегата. Так, например, момент от силы веса груза в подъемной лебедке относится к активным, а момент от трения в подшипниках лебедки — к реактивным.

Учитывая возможные знаки моментов двигателя M_d и сопротивления M_c , придадим уравнению движения электропривода (3.6) следующий вид:

$$[\pm M_d] - [\pm M_c] = M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.8)$$

Величина и закон изменения момента M_d определяются механической характеристикой двигателя, а момент M_c — механической характеристикой производственного механизма. Эти два момента являются определяющими в уравнении движения электропривода.

Характер изменения, величина и знак динамического момента $M_{дин}$ зависят от соотношения, величин и знаков M_d и M_c . В том случае, если двигатель работает в двигательном режиме и момент его больше момента сопротивлений, скорость привода увеличивается, т.е. ускорение и динамический момент положительны (при $M_d > M_c$, $d\omega/dt > 0$ и $M_{дин} > 0$; когда же $M_d < M_c$, $d\omega/dt < 0$ и $M_{дин} < 0$).

Если момент двигателя равен моменту сопротивлений, то динамический момент отсутствует, а скорость привода остается постоянной или равной нулю.

Таким образом, величина и знак динамического момента зависят от направления действия и величины момента двигателя и момента сопротивлений, и затрачивается этот момент на изменение запаса кинетической энергии в системе двигатель – рабочая машина.

3.2. Приведение моментов и сил к скорости одного вала

Уравнение движения электропривода справедливо лишь в том случае, если входящие в него моменты, усилия и инерционные массы рассматриваются относительно элементов (валов, рычагов, направляющих и т.п.), движущихся с одинаковой скоростью. Операция пересчета этих величин на скорости данного элемента называется приведением. Обычно при вращательном движении моменты или усилия приводят к скорости вала двигателя, но можно приводить их и к скорости любого вала производственного агрегата. Приведение моментов и усилий производится на основании энергетического баланса, т.е. мощность, затрачиваемая на вращение вала рабочего органа, должна быть равна мощности, развиваемой на валу двигателем. При этом потери мощности в передаточных устройствах учитываются введением соответствующих коэффициентов полезного действия:

$$\frac{M_{с.м} \omega_{м}}{\eta_{пер}} = M_{\delta} \omega_{\delta}. \quad (3.9)$$

Так как двигатель всегда развивает момент равный моменту сопротивления, создаваемому машиной на его валу, то выражение (3.9) можно переписать как

$$\frac{M_{с.м} \omega_{м}}{\eta_{пер}} = M'_{с} \omega_{\delta},$$

откуда

$$M'_{с} = M_{с.м} \frac{\omega_{м}}{\omega_{\delta}} \frac{1}{\eta_{пер}} = \frac{M_{с.м}}{i \eta_{пер}}, \quad (3.10)$$

где $M_{с.м}$ — момент сопротивления на валу производственного механизма;

$M'_{с}$ — момент сопротивления, приведенный к скорости вала двигателя;

ω_{δ} — угловая скорость вала двигателя, 1/с;

$\omega_{м}$ — угловая скорость вала производственного механизма, 1/с;

$\eta_{пер}$ — к.п.д. передачи;

$i = \omega_{\delta} / \omega_{м}$ — передаточное число.

По аналогии из равенства мощностей (3.9), приведенный к валу рабочей машины момент двигателя

$$M'_{\delta} = \frac{M_{\delta} i}{\eta_{пер}}.$$

Физически приведенным к валу двигателя моментом сопротивления является момент сопротивления, создаваемый производственным механизмом на валу электродвигателя, а приведенным моментом двигателя к приводному валу механизма является вращающий момент, создаваемый двигателем на валу механизма.

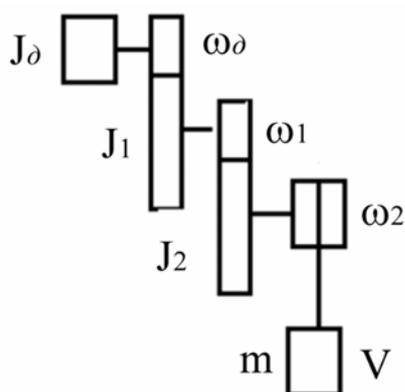
При наличии нескольких передач между двигателем и механизмом (рис. 56) с передаточными числами i_1, i_2, \dots, i_n и соответствующими к.п.д. $\eta_{п1}, \eta_{п2}, \dots, \eta_{пn}$ приведенный к скорости вала двигателя момент сопротивления, определится как

$$M_c = M_{c.m} \frac{1}{i_1 i_2 \cdots i_n} \frac{1}{\eta_1 \eta_2 \cdots \eta_n}. \quad (3.11)$$

Приведение сил поступательного движения к вращательному движению также основано на равенстве мощностей: мощность на рабочем органе при поступательном движении с учетом потерь равна мощности, развиваемой на валу двигателя. Если скорость поступательного движения рабочего органа v , м/с, сила сопротивления $F_{c.m}, H$, а угловая скорость вала двигателя $\omega_\partial, 1/c$, то

$$F_{c.m} v \frac{1}{\eta_{пер}} = M_c \omega_\partial. \quad (3.12)$$

Отсюда приведенный к скорости вала двигателя момент от силы сопротивления равен:



$$M'_c = \frac{F_{c.m} v}{\omega_\partial \eta_{пер}}. \quad (3.13)$$

В случае приведения вращающего момента двигателя к силе поступательного движения приведенную силу находим как

$$F'_\partial = \frac{M_\partial \omega_\partial \eta_{пер}}{v}. \quad (3.14)$$

Рис. 56. Кинематическая схема системы двигатель-машина

Полученные выражения справедливы для работы электрической машины в двигательном режиме. В случае работы двигателя в тормозном режиме, т.е. когда энергия передается от рабочей машины к двигателю, в выражениях (3.11), (3.12) и (3.13) к.п.д. следует перенести в знаменатель, а в формуле (3.14) — в числитель.

3.3. Приведение моментов инерции и масс к скорости одного вала

Момент инерции, входящий в уравнение движения электропривода (3.6), определяет инерционность вращающихся и поступательно движущихся частей производственного агрегата. Реально, как показано на рисунке 56, подвижная система агрегата может содержать различное число деталей, участвующих в накоплении кинетической энергии и создании динамического момента при возникновении ускорений. Каждая из них движется со своей скоростью и об-

ладает своим моментом инерции или массой. При расчетах в уравнении движения эти моменты инерции и массы условно заменяются некоторым одним маховиком с таким моментом инерции, который, вращаясь со скоростью вала привода, способен запасать такое же количество кинетической энергии.

Приведенный к валу двигателя момент инерции — это момент инерции такого условного маховика, который, вращаясь со скоростью вала двигателя, способен запасать кинетическую энергию, равную количеству кинетической энергии, запасаемой всеми подвижными массами данного агрегата.

При наличии вращающихся частей, обладающих моментами инерции $J_0, J_1, J_2, \dots, J_n$ с угловыми скоростями $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, и поступательно движущихся масс m_1, m_2 и т.д. со своими скоростями v_1, v_2 , соответственно (см. рис. 56), можно заменить их динамическим действием одного тела, вращающегося например со скоростью вала двигателя:

$$J_{np} \frac{\omega_0^2}{2} = J_0 \frac{\omega_0^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2} + m_1 \frac{v_1^2}{2} + \dots \quad (3.15)$$

Разделив обе части равенства (3.15) на $\omega_0^2/2$, находим приведенный к валу двигателя момент инерции:

$$J_{np} = J_0 + J_1 \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2} + m_1 \frac{v_1^2}{\omega_0^2} + \dots \quad (3.16)$$

Обозначив в формуле (3.16) отношения угловых скоростей соответствующими передаточными числами, запишем выражение для приведенного момента инерции как:

$$J_{np} = J_0 + J_1 \frac{1}{i_1^2} + \dots + J_n \frac{1}{i_n^2} + m_1 \frac{v_1^2}{\omega_0^2} + \dots \quad (3.17)$$

Все величины, входящие в уравнения движения (3.6) и (3.7), должны быть приведены к скорости одного вала (рычага, направляющих) и какие-либо знаки о приведении этих величин в уравнениях не применяются.

3.4. Методы определения моментов инерции

Момент инерции при вращательном движении — это то же, что масса при движении поступательном, это тот элемент, который при своем вращении способен накапливать кинетическую энергию.

Моментом инерции тела относительно оси, проходящей через центр тяжести, называется сумма произведений масс отдельных частиц тела на квадрат расстояния от центра тяжести соответствующей частицы до оси вращения, взятая для всего тела:

$$J = \sum_{i=1}^{i=k} m_i \rho_i^2 \quad (3.18)$$

В практических расчетах момент инерции тела часто выражают как произведение массы тела на квадрат радиуса инерции, т.е.

$$J = m\rho^2, \quad (3.19)$$

где m — масса всего тела;
 ρ — радиус инерции.

Под радиусом инерции понимают расстояние от оси вращения, проходящей через центр тяжести, до точки, в которую надо поместить сосредоточенную массу рассматриваемого тела, чтобы момент инерции остался неизменным.

Радиусы инерции простых тел относительно их осей вращения, проходящих через центр тяжести, могут быть вычислены аналитически, и, при известной массе тела, по выражению (3.19) вычисляется соответствующий момент инерции. Для нахождения моментов инерции сложных или неоднородных по своему составу тел используются различные экспериментальные методы.

Радиусы инерции простейших тел, показанных на рисунке 57, рассчитываются по следующим формулам:

а) для сплошного цилиндра (рис. 57, а) — $\rho^2 = \frac{R^2}{2}$; (3.20)

б) для полого цилиндра (рис. 57, б) — $\rho^2 = \frac{R^2 + r^2}{2}$; (3.21)

в) для прямоугольной призмы (рис. 57, в) — $\rho^2 = \frac{b^2 + c^2}{12}$; (3.22)

г) для цилиндра относительно оси вращения, проходящей через центр тяжести перпендикулярно оси цилиндра (рис. 57, г) — $\rho^2 = \frac{l^2 + 3R^2}{12}$; (3.23)

д) для тела произвольной формы относительно оси, не проходящей через центр тяжести (рис. 57, д) — $\rho^2 = \rho_o^2 + a^2$, (3.24)

где ρ_o^2 — квадрат радиуса инерции тела относительно оси, проходящей через центр тяжести и параллельной заданной оси вращения;
 a — расстояние от центра тяжести тела до оси вращения.

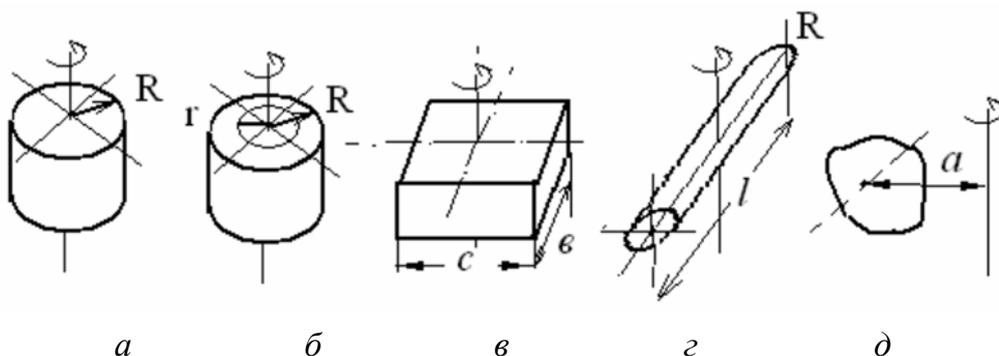


Рис. 57. К определению радиусов инерции простейших фигур

В тех случаях, когда детали имеют сложную геометрическую форму или неоднородны по своему составу, для определения моментов инерции применяются экспериментальные методы. К ним относятся методы крутильных или маятниковых колебаний, падающего груза, а также метод свободного выбега или самоторможения.

Метод крутильных колебаний. Для определения момента инерции тела относительно его оси вращения тело подвешивают к неподвижной опоре на двух параллельных нитях (рис. 58). Затем его закручивают вокруг оси на 90 градусов, отпускают и измеряют время одного полного периода крутильных колебаний. Для большей достоверности целесообразно определить время одного периода при 8...10 колебаниях. Момент инерции определяется по формуле:

$$J = \frac{ga^2}{l\pi} [(m_d + m_n)T_d^2 - m_n T_n^2], \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (3.25)$$

где a — расстояние между нитями, м;

l — длина нитей подвески, м;

m_d — масса измеряемой детали с подвеской, кг;

T_d — время одного периода колебаний детали с подвеской, с;

m_n — масса подвески, кг;

T_n — время одного периода колебаний подвески, с.

В большинстве случаев параметры подвески во много раз меньше параметров детали и ими в выражении (3.25) без большой погрешности можно пренебречь.

Метод свободного выбега. Наиболее простым и удобным для нахождения моментов инерции крупных деталей и моментов инерции машин относительно приводного вала, содержащих ряд вращающихся и поступательно движущихся масс, является метод свободного выбега. В этом случае опытным путем определяют две зависимости: зависимость механических потерь от скорости — потери от трения в подшипниках, вентиляционные потери $P_{мех}(\omega)$ и зависимость скорости от времени при свободном выбега или самоторможении $\omega(t)$ (рис. 59). Для получения первой зависимости двигателю задают ряд скоростей при холостом ходе и с помощью вольтметра и

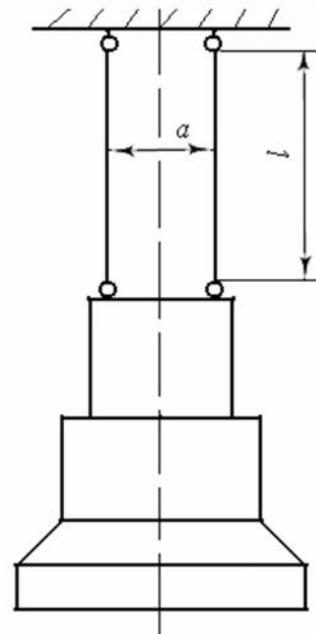


Рис. 58. Определение момента инерции методом крутильных колебаний

амперметра определяют потери мощности. Механические потери определяют путем вычитания из потерь холостого хода джоулевых потерь:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{хх}} - I^2 R_{\text{я}}.$$

Для получения второй зависимости систему разгоняют до скорости несколько больше номинальной и, отключив двигатель от сети, фиксируют значения скорости через определенные промежутки времени до полной остановки.

Задавшись масштабами мощности m_p , скорости m_ω и времени m_t , строят графики этих зависимостей (рис. 59).

К кривой $\omega(t)$ проводят касательную AD в произвольной точке A и нормаль AC . Путем переноса точки A на зависимость $P_{\text{мех}}(\omega)$ в точке E находят потери на трение $P_{\text{мех}}$, соответствующие времени самоторможения в точке B . Эта мощность равна изменению запаса кинетической энергии системы и определяется как

$$P_{\text{мех}} = \frac{dA}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt},$$

откуда

$$J = \frac{P_{\text{мех}}}{\omega \frac{d\omega}{dt}}. \quad (3.26)$$

Для определения знаменателя в выражении (3.26) рассмотрим прямоугольные треугольники BDA и BAC (рис. 59). Для углов γ_1 и γ_2 можно записать $\text{tg}(\gamma_1) = \frac{CB}{AB}$ и $\text{tg}(\gamma_2) = \frac{AB}{BD}$.

Рассматриваемые треугольники подобны, следовательно, углы γ_1 и γ_2 между собою равны.

$$\text{Поэтому } \frac{CB}{AB} = \frac{AB}{BD}.$$

$$\text{Отсюда } CB = \frac{AB^2}{BD}.$$

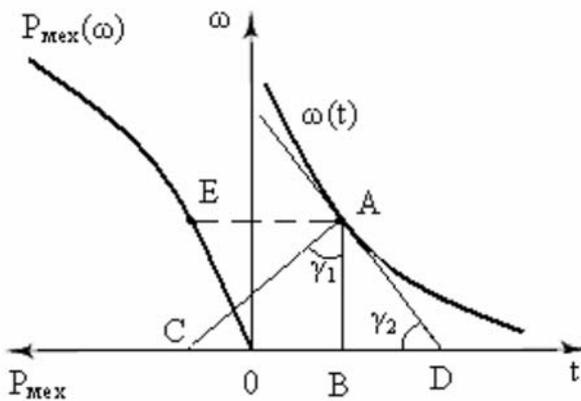


Рис. 59. К определению момента инерции методом свободного выбега

Выразив отрезки через соответствующие физические величины и их масштабы, определим величину CB , называемую поднормалью:

$$CB = \frac{\omega^2}{m_\omega^2} \frac{m_t}{t} = \omega \frac{\omega}{t} \frac{m_t}{m_\omega^2}.$$

В треугольнике ABD отношение ω/t равноценно $|d\omega/dt|$, следовательно,

$$CB = \omega \frac{d\omega}{dt} \frac{m_t}{m_\omega^2}.$$

Отсюда получаем значение знаменателя в выражении (3.26)

$$\omega \frac{d\omega}{dt} = (CB) \frac{m_{\omega}^2}{m_t},$$

а момент инерции определится как $J = \frac{P_{\text{мех}}}{CB \frac{m_{\omega}^2}{m_t}}$.

Искомый момент инерции детали или рабочей машины находится как разность момента инерции, полученного из опыта, и момента инерции двигателя опытной установки.

3.5. Переходные процессы в электроприводе. Определение времени переходных процессов

Под переходными процессами в электроприводе понимают процессы, протекающие во времени при переходе от одного установившегося состояния к другому установившемуся состоянию, когда изменяются скорость, момент, электромагнитное поле, ток, температура и др.

Переходные процессы могут возникать при пуске, торможении, реверсировании, регулировании скорости, в результате изменения нагрузки, параметров питающего тока и т.д.

Характер переходного процесса электропривода зависит от свойств рабочей машины, типа двигателя и механической передачи, принципа действия и свойств аппаратуры управления, а также от режима работы двигателя (пуск, торможение, прием и сброс нагрузки и т.п.).

Необходимость изучения, а затем и формирования переходных процессов определяется тем, что с ними связано появление физических, динамических, электромагнитных тепловых явлений, оказывающих весьма существенное влияние на работу электропривода. Многие электроприводы работают в интенсивных динамических режимах, в которых при резком приложении нагрузки необходимо быстрое изменение скорости (металло-режущие станки, прессы, прокатные станы и пр.). Для этих машин возникает задача сокращения длительности переходных процессов, т.е. повышение быстродействия электропривода. Большое значение имеет анализ переходных процессов для следящих электроприводов, которые работают, как правило, в переходных режимах, обрабатывая изменяющееся задание скорости и положения. Характер, глубина и время протекания переходных процессов определяются в первую очередь инерционностью системы.

Всего в электроприводе различают три типа переходных процессов, определяемых различными видами инерции:

- *механическая инерция* вращающихся и поступательно движущихся частей рабочей машины, промежуточных передач, двигателей, аппаратуры управления; скорость протекания механических переход-

- ных процессов определяется электромеханической постоянной времени B , которая, в свою очередь, зависит как от механических параметров системы двигатель – рабочая машина, так и от электромеханических свойств двигателя, включая сопротивление его цепей;
- *электромагнитная инерция*, обусловленная индуктивностью обмоток электрических машин и аппаратов управления; характеризуется электромагнитной постоянной времени $T_{эм}$, величина которой зависит от соотношения индуктивности электрической цепи L и ее активного сопротивления r :
$$T_{эм} = \frac{L}{r};$$
 - *тепловая инерция* электрических машин и некоторых элементов аппаратуры определяется постоянной времени, представляющей собою отношение теплоемкости C к теплоотдаче A машины или аппарата:
$$T = \frac{C}{A}.$$

Теоретическое рассмотрение переходных процессов электропривода с учетом влияния всех видов инерции представляет большие трудности. Поведение в нестационарных режимах сложных приводов с учетом всех влияющих факторов во многих случаях затрудняется тем, что требует решения системы нелинейных дифференциальных уравнений весьма высоких порядков. Эти обстоятельства часто вынуждают пользоваться материалами, полученными опытным путем, и методами приближенного графического интегрирования. Однако далеко не во всех случаях практики требуется детальный учет всех явлений. Тепловые процессы в электрических машинах и аппаратах протекают значительно медленнее, чем процессы, обусловленные механической и электромагнитной инерцией. Поэтому при рассмотрении механических и электромагнитных переходных процессов электропривода влияние тепловой инерции обычно не учитывают. Электромагнитные переходные процессы играют важную роль в электроприводах, которые обладают большой индуктивностью и при значительных скоростях изменения нагрузки. Такими особенностями обладают лишь немногие механизмы рабочих машин сельскохозяйственного назначения.

При пуске, торможении, реверсировании, регулировании скорости и т.п. рассматриваются механические переходные процессы. Тепловые переходные процессы анализируются и используются главным образом при расчетах и выборе мощности электродвигателей.

3.5.1. Анализ механических переходных процессов в электроприводе с линейной механической характеристикой электродвигателя при постоянном моменте сопротивления

В задачу анализа механических переходных процессов входит получение уравнений, описывающих зависимость изменения тока, момента, скорости, скольжения от времени при возникновении возмущающих воздействий. Характер механических переходных процессов в значительной степени определяется видом механических характеристик двигателя и рабочей машины. Поэтому переходные процессы приводов с двигателями постоянного тока независимого и параллельного возбуждения, имеющие линейные механические характеристики, и приводы с асинхронными электродвигателями, если считать, что в пределах колебания моментов от 0 до (1,2...1,5) M_n их механические характеристики близки к линейным, можно объединить в одну группу. Для получения зависимостей, характеризующих механические переходные процессы, необходимо решение уравнения движения

$$M_\delta - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.27)$$

для чего входящие в него величины необходимо выразить через одну независимую переменную.

Учитывая линейность механических характеристик этих двигателей и постоянную величину момента сопротивления, в качестве такой независимой переменной может быть принято скольжение.

Из подобия прямоугольных треугольников, образованных катетами моментов и скольжений, на механической характеристике (рис. 60) находим:

$$M_c = \frac{M_n}{s_{нх}} s_c, \quad M_\delta = \frac{M_n}{s_{нх}} s, \quad (3.28)$$

где $s_{нх}$ — скольжение при номинальном моменте M_n на одной из механических характеристик двигателя;

s_c — скольжение, соответствующее моменту сопротивления M_c ;

s — скольжение, соответствующее моменту двигателя M_δ .

Производную угловой скорости по времени в формуле (3.27) выражаем через скольжение путем дифференцирования зависимости $\omega = \omega_o(1-s)$:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_o \frac{ds}{dt}.$$

Подставляя эти значения в выражение (3.27), и, вынося в левой части общий множитель за скобки, получим $\frac{M_n}{s_{нх}}(s - s_c) = -J\omega_o \frac{ds}{dt}$,

откуда
$$s - s_c = -J \frac{\omega_o s_{нх}}{M_n} \frac{ds}{dt}. \quad (3.29)$$

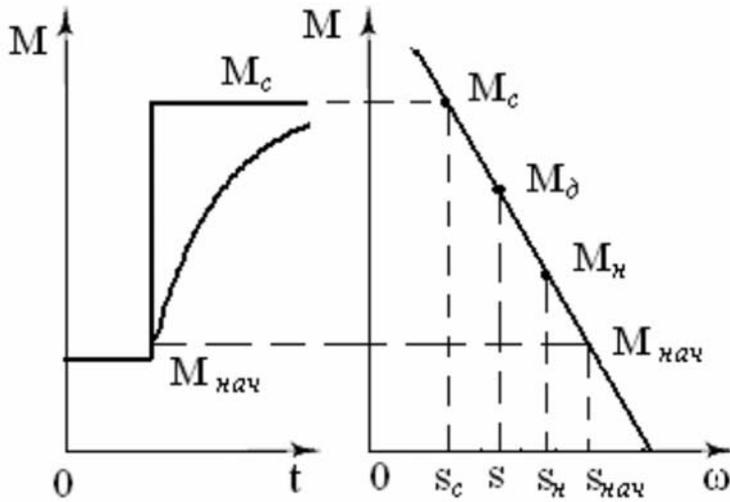


Рис. 60. К анализу механических переходных процессов при $M_c = \text{const}$

В выражении (3.29) введем обозначение

$$B_x = J \frac{\omega_o s_{нх}}{M_n} \quad (3.30)$$

Введем выражение (3.30) в (3.29), произведем разделение переменных:

$$-\frac{dt}{B_x} = \frac{ds}{s - s_c} \quad (3.31)$$

Решением уравнения (3.31) является:

$$-\frac{t}{B_x} = \ln(s - s_c) - \ln \kappa$$

После потенцирования

$$e^{-\frac{t}{B_x}} = \frac{s - s_c}{k} \quad (3.32)$$

Для нахождения постоянной интегрирования k необходимо воспользоваться начальными условиями: $t = 0, s = s_{нач}$.

Тогда $k = s_{нач} - s_c$.

Подставляя значение k в выражение (3.32), получим:

$$e^{-\frac{t}{B_x}} = \frac{s - s_c}{s_{нач} - s_c},$$

отсюда

$$s = s_c (1 - e^{-\frac{t}{B_x}}) + s_{нач} e^{-\frac{t}{B_x}}, \quad (3.33)$$

где $s_{нач}$ — скольжение в момент скачка нагрузки M_c .

Если в выражении (3.33) вместо скольжений подставить их значения, найденные из формулы (3.28), получим уравнение изменения момента двигателя в переходном режиме:

$$M = M_c (1 - e^{-\frac{t}{B_x}}) + M_{нач} e^{-\frac{t}{B_x}} \quad (3.34)$$

Для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением и на рабочей ветви асинхронных двигателей магнитный поток практически постоянный, не зависящий от нагрузки, поэтому после деления обеих частей выражения (3.34) на $s\Phi$ получаем уравнение тока в переходном режиме:

$$I = I_c (1 - e^{-\frac{t}{B_x}}) + I_{нач} e^{-\frac{t}{B_x}} \quad (3.35)$$

Уравнение изменения угловой скорости в переходном режиме получим, выразив в (3.32) скольжения через соответствующие скорости:

$$\omega = \omega_c (1 - e^{-\frac{t}{B_x}}) + \omega_{нач} e^{-\frac{t}{B_x}}. \quad (3.36)$$

Разделив выражения (3.34), (3.35) и (3.36) на номинальные значения соответствующих величин, получим уравнения переходных режимов в относительных единицах:

$$\begin{aligned} s &= s_c (1 - e^{-\frac{t}{B_x}}) + s_{нач} e^{-\frac{t}{B_x}}, \\ \mu &= \mu_c (1 - e^{-\frac{t}{B_x}}) + \mu_{нач} e^{-\frac{t}{B_x}}, \\ i &= i_c (1 - e^{-\frac{t}{B_x}}) + i_{нач} e^{-\frac{t}{B_x}}, \\ \nu &= \nu_c (1 - e^{-\frac{t}{B_x}}) + \nu_{нач} e^{-\frac{t}{B_x}}. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Во всех полученных уравнениях переходных процессов одной из определяющих является величина B_x , которая имеет размерность времени (с) и называется электромеханической постоянной времени электропривода.

Физический смысл электромеханической постоянной времени можно выявить, используя уравнение движения:

$$M_\delta - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Если в этом уравнении принять избыточный момент постоянным, то время разбега от некоторой одной скорости ω_1 до другой ω_2 определится как

$$t = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_\delta - M_c}. \quad (3.38)$$

Сопоставляя выражение (3.38) с (3.30), в котором $t = B_x$, $\omega_2 - \omega_1 = \omega_o s_{нх}$, а избыточный момент $M_\delta - M_c = M_n$, можно сделать вывод, что электромеханическая постоянная времени электропривода — есть время, за которое электропривод разгоняется на величину скорости $\omega_o s_{нх}$ при постоянном избыточном моменте, равном номинальному.

Электромеханическую постоянную времени можно представить как

$$B_x = B_n s_{нх},$$

где $B_n = J \frac{\omega_o}{M_n}$ — время пуска электропривода вхолостую при моменте

двигателя равном номинальному (называется постоянной времени пуска).

Полученные уравнения (3.33)...(3.36) позволяют решать многие задачи, связанные с переходными режимами двигателей при пуске, торможении, регулировании скорости, реверсировании, изменении нагрузки и т.п.

*3.5.2. Определение времени переходных процессов
при разбеге двигателей постоянного тока
независимого возбуждения с постоянной нагрузкой*

Пуск двигателя осуществляется в соответствии с пусковой диаграммой (рис. 13) путем поэтапного отключения ступеней резистора при заданных значениях пусковых токов I_1 и I_2 . Изменение тока на отдельных ступенях пускового резистора происходит по экспоненциальному закону, согласно (3.35):

$$I = I_c \left(1 - e^{-\frac{t}{B_x}}\right) + I_{нач} e^{-\frac{t}{B_x}}. \quad (3.39)$$

где I_c — установившийся ток, в данном случае это ток нагрузки;
 $I_{нач}$ — начальный ток, равный пусковому току I_1 ;
 B_x — электромеханическая постоянная времени на искусственных и естественной скоростных характеристиках при номинальном токе.

По истечении некоторого времени t_x ток двигателя достигает значения I_2 , при котором происходит отключение первой ступени сопротивления, в результате чего ток возрастает и достигает значения I_1 , процесс повторяется до выхода на естественную характеристику.

Время разбега на любой из искусственных скоростных характеристик определяется из выражения (3.39) как

$$t_x = B_x \ln \frac{I_1 - I_c}{I_2 - I_c}. \quad (3.40)$$

После выхода двигателя на естественную характеристику ток якоря стремится к установившемуся значению I_c , а время, согласно формулы (3.40), — к бесконечности (см. последний участок на рис. 61). Поэтому принимается, что разбег закончен при токе двигателя равном $1,05 I_c$, а время разбега на естественной характеристике

$$t_{кон} = B_x \ln \frac{I_1 - I_c}{1,05 I_c - I_c}. \quad (3.41)$$

При номинальном токе якоря скольжение на данной скоростной характеристике, согласно формулы (2.16), равно относительному сопротивлению якорной цепи, т.е. $s_{нх} = \rho_x$. Тогда при вычислении электромеханической постоянной времени в выражениях (3.40) и (3.41) можно использовать ранее найденные сопротивления ступеней пускового резистора:

$$B_x = J \frac{\omega_o s_{нх}}{M_n} = J \frac{\omega_o \rho_x}{M_n}.$$

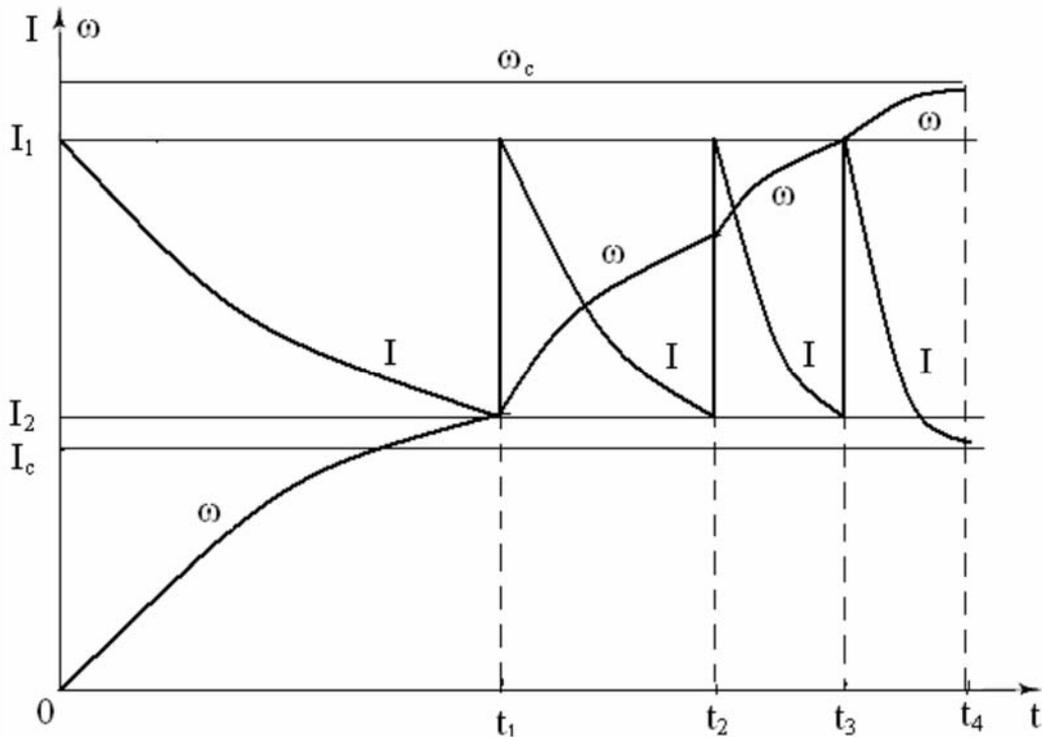


Рис. 61. Изменение тока и угловой скорости в переходных режимах при пуске ДПТ НВ

Полное время разбега определится суммой интервалов времени на отдельных участках. В формуле (3.40) при переходе от одного участка к другому изменяется только величина B_x . Поэтому полное время разбега определяется как

$$t_n = \sum B_x \ln \frac{I_1 - I_c}{I_2 - I_c} + B_e \ln \frac{I_1 - I_c}{0,05 I_c},$$

где B_e — электромеханическая постоянная времени электропривода на естественной скоростной характеристике.

Угловая скорость на отдельных ступенях пускового резистора, согласно формулы (3.36), изменяется по уравнению

$$\omega_x = \omega_{cx} (1 - e^{-\frac{t}{B_x}}) + \omega_{начx} e^{-\frac{t}{B_x}},$$

где ω_{cx} — установившаяся угловая скорость на соответствующих ступенях, определяемая сопротивлением якорной цепи как:

$$\omega_{cx} = \frac{U_n - I_c R_x}{c\Phi},$$

где R_x — сопротивления якорной цепи: $R_x = r_{я} + r_{добx}$.

3.5.3. *Определение времени переходных процессов при динамическом торможении ДПТ независимого возбуждения с постоянной нагрузкой*

Торможение может осуществляться при отсутствии нагрузки на валу двигателя, т.е. при $M_c = 0$ (рис. 62), и с нагрузкой. В тормозных режимах момент, развиваемый двигателем, направлен против скорости, поэтому в уравнении движения он приобретает отрицательный знак:

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.42)$$

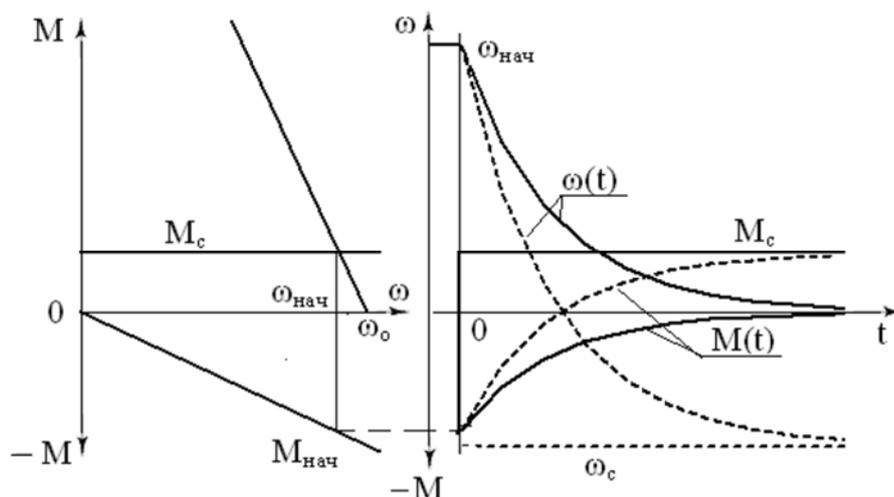


Рис. 62. Переходные процессы при динамическом торможении

Поскольку графики механических и скоростных характеристик в этом режиме проходят через начало координат, моменты двигателя и статических сопротивлений в уравнении (3.42) целесообразно выражать через угловые скорости

$$M = \frac{M_n}{\omega_{нх}} \omega \quad \text{и} \quad M_c = \frac{M_n}{\omega_{нх}} \omega_c, \quad (3.43)$$

где $\omega_{нх}$ — угловая скорость на данной механической характеристике при номинальном моменте;

ω_c — угловая скорость, при статическом реактивном моменте сопротивления.

Введем значения моментов из формулы (3.43) в (3.42) и умножим обе части равенства (3.42) на $-\omega_{нх} / M_n$. Тогда

$$\omega + \omega_c = -B_{\text{ох}} \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.44)$$

где

$$B_{\text{ох}} = J \frac{\omega_{нх}}{M_n}, \quad (3.45)$$

где $B_{\text{ох}}$ — электромеханическая постоянная времени на механической характеристике динамического тормозного режима.

Решением уравнения (3.44) является

$$\omega = (\omega_{нач} + \omega_c) e^{-\frac{t}{B_{\partial x}}} - \omega_c, \quad (3.46)$$

где $\omega_{нач}$ — угловая скорость в момент переключения якоря на схему динамического тормозного режима.

Уравнение (3.46) выражает характер изменения скорости в переходном режиме при динамическом торможении со статической нагрузкой.

В этом случае скорость ω_c — величина фиктивная, т.к. при $\omega = 0$ движение прекращается.

Произведя подстановки скорости из формулы (3.43) в выражение (3.46), получим уравнение момента в переходном режиме:

$$M = (M_{нач} + M_c) e^{-\frac{t}{B_{\partial x}}} - M_c. \quad (3.47)$$

Учитывая, что по окончании торможения при $t = t_m$ момент двигателя равен нулю, из выражения (3.47) определяется время торможения:

$$t_m = B_{\partial x} \ln \frac{M_{нач} + M_c}{M_c}.$$

При торможении без нагрузки в выражениях (3.46) и (3.47) следует принять $M_c = 0$ и соответственно $\omega_c = 0$. В этом случае уравнения переходных процессов запишутся как:

$$\omega = \omega_{нач} e^{-\frac{t}{B_{\partial x}}} \quad \text{и} \quad M = M_{нач} e^{-\frac{t}{B_{\partial x}}}. \quad (3.48)$$

Обычно принимают, что процесс торможения заканчивается при тормозном моменте равном $0,05 M_{нач}$. Тогда, пользуясь уравнением (3.48), находим время торможения:

$$t_m = B_{\partial x} \ln \frac{M_{нач}}{0,05 M_{нач}}.$$

Графики изменения момента $M(t)$ и скорости $\omega(t)$ при торможении с нагрузкой показаны на рисунке 62 штриховыми, а при холостом ходе сплошными линиями.

В выражение (3.45) электромеханической постоянной времени при динамическом торможении $B_{\partial x}$ входит угловая скорость при номинальном моменте на данной механической характеристике, которая определяется сопротивлением якорной цепи. Жесткость механических характеристик или их наклон при динамическом торможении определяется теми же величинами, что и в генераторном режиме. Поэтому характеристики динамического торможения с независимым возбуждением при одних и тех же значениях сопротивления в цепи якоря и тока возбуждения проходят параллельно соответствующим ха-

рактик характеристикам генераторного тормозного режима, но через начало координат. Следовательно, скорость на любой из характеристик динамического тормозного режима при номинальном моменте определится как:

$$\omega_{нх} = \omega_o s_{нх}.$$

Учитывая, что на линии номинального тока $s_{нх} = \rho_{нх}$, можно записать:

$$\omega_{нх} = \omega_o \rho_{нх},$$

где

$$\rho_{нх} = \frac{r_{я} + r_{вн.х}}{R_n},$$

где $r_{я}$ — сопротивление якоря;

$r_{вн.х}$ — внешнее сопротивление;

R_n — номинальное сопротивление якоря.

Следовательно, электромеханическая постоянная времени при динамическом торможении определится как

$$B_{\partialх} = J \omega_o \frac{\rho_{нх}}{M_n}.$$

3.6. Графические и графоаналитические методы решения задач динамики

Аналитические методы решения задач, связанные с переходными процессами, позволяют получать результаты с высокой степенью точности и анализировать влияние отдельных факторов на протекающие процессы. Однако их применение возможно лишь в тех случаях, когда характеристики электродвигателей и рабочих машин являются линейными функциями или постоянными величинами. Применение графических и графоаналитических методов практически неизбежно во всех случаях, когда характеристики привода или рабочей машины нелинейны или зависят не от скорости, а от пути или времени.

Совершенно естественно, что все графические и графоаналитические методы дают лишь приближенные результаты. Однако их точность при тщательном выполнении расчетов вполне достаточна для решения практических задач.

Основной недостаток этих методов — это невозможность получения общих выводов. Решение может быть найдено лишь для отдельных частных случаев, когда значения всех параметров известны. Выявить влияние параметров на поведение системы, пользуясь приближенными методами, очень трудно; для этого понадобилось бы многократно проделать весьма трудоемкие расчеты. Одним из наиболее распространенных приближенных методов является метод конечных разностей. При пользовании этим методом весь процесс разгона двигателя разбивается на отдельные участки. Действитель-

ные кривые $M_\delta = f(\omega)$, $M_c = f(\omega)$ и $M_{дин} = f(\omega)$ заменяются ступенчатыми. На каждом участке значения моментов принимаются постоянными, равными их средним значениям. В связи с этим производная заменяется отношением приращения скорости к соответствующему приращению времени. Уравнение движения используется многократно, применительно к каждому участку:

$$M_{\delta i} - M_{ci} = J \frac{\Delta \omega_i}{\Delta t_i}, \quad (3.49)$$

где $M_{\delta i}$ — среднее значение момента двигателя на i -ом участке;
 M_{ci} — среднее значение статического момента;
 $\Delta \omega_i$ — приращение угловой скорости на рассматриваемом участке;
 Δt_i — приращение времени.

Решение уравнения (3.49) при известных значениях моментов позволяет определить время разбега Δt_i на величину приращения скорости $\Delta \omega_i$.

Существует два варианта применения метода конечных разностей: метод пропорций и метод последовательных интервалов.

3.6.1. Определение времени разбега методом пропорций (графический метод)

При решении задач этим методом в левой части чертежа (рис. 63) в произвольно выбранных масштабах моментов m_m и скорости m_ω строятся приведенные механические характеристики двигателя и рабочей машины $M_\delta = f(\omega)$ и $M_c = f(\omega)$. Вычитая графически из механической характеристики двигателя $M_\delta(\omega)$ кривую статического момента $M_c(\omega)$, получаем кривую динамического момента $M_{дин}(\omega)$. Эту кривую необходимо заменить ступенчатой линией, для чего скорость в диапазоне разбега делим на участки (не обязательно равные), на каждом из которых принимаем $M_{дин} = const$. При замене кривой избыточного момента ступенчатой линией необходимо пользоваться принципом равенства площадей, т.е. на каждом участке скорости площадка под прямой $M_{дин}$ должна быть равна площадке над прямой, или площадка, отбрасываемая при проведении прямой линией, должна равняться площадке приписываемой.

На оси абсцисс влево от точки 0 откладываем величину момента инерции J в виде отрезка $a\theta$. Для этого задаемся масштабом момента инерции m_J . Точка a называется полюсом.

Графические расчеты проводятся в следующем порядке.

Величину динамического момента $e\theta$ на первом участке скорости $\Delta \omega_1$ переносим на ось ординат. Через полученную точку b и точку a проводим луч ab . Из начала осей координат проводим прямую, параллельную линии ab до ее пересечения с горизонталью — границей скорости $\Delta \omega_1$ в точке d .

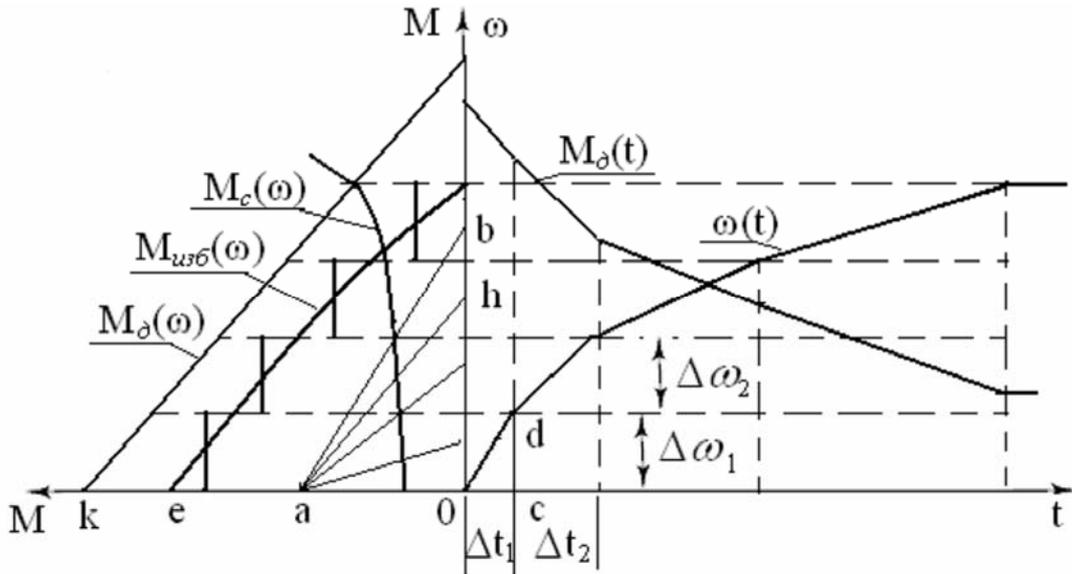


Рис. 63. Расчет времени разбега электропривода методом пропорций

Нетрудно показать, что отрезок прямой Oc на оси абсцисс в определенном масштабе выражает собою время разбега привода Δt_1 на величину угловой скорости $\Delta \omega_1$. Для этого рассмотрим треугольники aOb и Ocd , из подобия которых следует:

$$Oc = \frac{Oa \cdot dc}{Ob}. \quad (3.50)$$

В свою очередь, $Oa = \frac{J}{\mu_j}$, $dc = \frac{\Delta \omega_1}{\mu_\omega}$ и $Ob = \frac{M_{дин}}{\mu_M}$.

Подставляя эти значения отрезков в формулу (3.50), получим:

$$Oc = \frac{J \Delta \omega_1}{M_{дин}} \frac{\mu_j \mu_\omega}{\mu_m}. \quad (3.51)$$

Первый множитель правой части выражения (3.51) в соответствии с формулой (3.49) представляет собою время разбега на участке скорости Δt_1 , тогда второй множитель есть величина, обратная масштабу времени.

Следовательно, $\mu_t = \frac{\mu_j \mu_\omega}{\mu_M}$, а $\Delta t_1 = Oc \mu_t$.

Таким образом, масштаб времени вычисляется на основе ранее принятых масштабов, а отрезок Oc в этом масштабе выражает собою время разбега на первом участке скорости.

Аналогично рассчитываются отрезки времени на всех остальных участках скорости. Так величину динамического момента на втором участке скорости откладываем от начала оси ординат, получаем точку h и проводим луч ah . Через точку d проводим параллельную этому лучу линию до границы второго участка скорости $\Delta \omega_2$. Проецируя точку пе-

ресекающей этой прямой с границей второго участка скорости $\Delta\omega_2$ на ось абсцисс, получим отрезок прямой, равный в том же масштабе времени разбега на втором участке скорости Δt_2 . Такие построения необходимо выполнить для всего диапазона разбега двигателя от 0 до установившейся скорости. Общее время определяется как сумма отрезков времени на отдельных участках оси абсцисс $t_p = \sum t_i$.

Полученная в результате построений ломаная линия показывает характер изменения скорости в переходном режиме пуска двигателя $\omega(t)$. Линия $M(t)$ на рисунке 63 показывает изменение момента двигателя в переходном режиме. Строится эта линия путем переноса значений моментов двигателя в начале каждого интервала скорости на начало соответствующего интервала времени разбега. Так при скорости, равной нулю, отрезок Ok — пусковой момент, переносится на ось ординат. Момент двигателя в начале второго интервала скорости $\Delta\omega_2$ переносится на начало второго интервала времени Δt_2 и т.д.

Для того, чтобы полученные кривые отражали действительное протекание процесса, их следует разбивать на достаточное число участков. При сравнительно плавном протекании процессов можно ограничиться 10...12 участками. Чем сложнее процесс, тем большее число участков следует использовать при построении. Однако чрезмерное увеличение числа участков может привести к значительным погрешностям из-за суммирования ошибок при графических построениях.

3.6.2. Определение времени разбега методом последовательных интервалов (графоаналитический метод)

Пользуясь им так же как и в предыдущем методе, строим механические характеристики двигателя и рабочей машины и кривую динамического момента. Далее, задаваясь последовательными приращениями скорости $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_n$, находим усредненные значения динамического момента для каждого участка — $M_{дин 1}, M_{дин 2}, \dots, M_{дин n}$. Эти значения моментов подставляем в равенство (3.49) и вычисляем отрезки времени:

$$\Delta t_i = J \frac{\Delta\omega_i}{M_{дин i}} .$$

Общее время разбега определяется суммированием времени на участках.

При расчете времени разбега асинхронного двигателя графическими и графоаналитическими методами следует учитывать, что реальный пусковой момент двигателя не соответствует пусковому моменту, получаемому из уравнения Клосса. Поэтому целесообразно строить эти характеристики, используя характерные точки на механических характеристиках, координаты которых вычисляются по паспортным и каталожным данным двигателя $M_n, M_{мин}, M_k, M_n$ и $M = 0$ и, соответственно, $\omega = 0, \omega_{мин}, \omega_k, \omega_n$ и ω_0 .

3.6.3. Метод компьютерного расчета времени переходных процессов

Графические и графоаналитические методы расчетов времени разбега двигателей требуют выполнения довольно сложных и трудоемких работ по построению графиков. В ряде случаев применение ПК позволяет решать многие задачи аналитическими методами. Для этого переменные в уравнении (3.27) выражаем через одну независимую, позволяющую находить наиболее простые решения. Так для двигателей независимого возбуждения и рабочих машин механические характеристики задаются как функции от угловой скорости $M_\delta = f(\omega)$ и $M_c = f(\omega)$, поэтому решением задачи для определения времени переходного процесса является:

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_\delta(\omega) - M_c(\omega)}. \quad (3.52)$$

Для определения времени переходных процессов привода с асинхронными двигателями, уравнение механической характеристики которого обычно задается как $M_\delta = f(s)$, т.е. формула Клосса, остальные члены уравнения движения необходимо выразить через ту же переменную s : уравнение механической характеристики рабочей машины и скорость. Для этого в уравнении механической характеристики рабочей машины (2.1) угловые скорости выражаем через скольжения. Тогда:

$$M_c(s) = M_{co} + (M_{cn} - M_{co}) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x.$$

Дифференциал скорости:

$$\frac{d(\omega_o(1-s))}{dt} = -\omega_o \frac{ds}{dt},$$

откуда

$$d\omega = -\omega_o ds.$$

Вводя эти функции в формулу (3.52), получаем выражение для определения времени переходного процесса:

$$t(s) = J\omega_o \int_{s_2}^{s_1} \frac{ds}{M_\delta(s) - M_c(s)}. \quad (3.53)$$

Пределы при интегрировании изменены с учетом знака у дифференциала скольжения.

Для решения задач рассматриваемым методом уравнение механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в выражении (3.53) необходимо скорректировать по пусковому моменту согласно формулам (2.57) или (2.59).

Литература: [2, с. 90-100; 6, с.14-21; 7, с.30-41; 9, с. 16-35; 10, с. 40-42].

ГЛАВА 4. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При всяком преобразовании одного вида энергии в другой часть потребляемой энергии теряется и преобразуется в тепловую. Разность между потребляемой мощностью и отдаваемой называют потерями и для удобства при сравнении с мощностью машины оценивают в единицах мощности Вт или кВт. Потери в электродвигателях в зависимости от вызывающих их физических процессов подразделяют на электрические, магнитные, механические, вентиляционные и добавочные. Электрические потери обусловлены протеканием тока по сопротивлениям обмоток, соединительных проводов, скользящих контактов; магнитные потери связаны с наличием вихревых токов и гистерезиса на участках магнитопроводов с переменным магнитным потоком. Механические потери, возникают в результате трения в подшипниках, щеток о коллектор, вращающихся частей двигателя о воздух. Потери энергии в двигателе вызывает нагрев отдельных его частей. Особенностью электрических машин является тесное конструктивное сочетание металлов и изоляции, т.е. материалов, имеющих резко различные тепловые характеристики. В то время как металлы сохраняют свои рабочие свойства при температурах до 400-500 °С и выше, верхний предел допустимого нагрева изоляционных материалов, применяемых в электромашиностроении, в зависимости от класса их нагревостойкости составляет 90-180 °С. Чем больше нагревостойкость изоляционных материалов, тем меньше размеры двигателя при одинаковой мощности, или больше мощность при тех же его размерах. Лучшему использованию двигателя способствует так же более совершенная система его охлаждения.

Изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, согласно ГОСТ 8865—70, делятся на следующие основные классы нагревостойкости.

Изоляция класса А. Допустимая предельная температура 105 °С. К этому классу относятся пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов.

Изоляция класса Е. Допустимая предельная температура 120 °С. Этот класс включает синтетические эмали на основе полиэфирных эпоксидных и подобных им смол, синтетические органические пленки и т.п. синтетические материалы.

Изоляция класса В. Допустимая предельная температура 130 °С.

К этому классу относятся материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов.

Изоляция класса F. Допустимая предельная температура 155 °С.

Этот класс включает материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов.

Изоляция класса H. Допустимая предельная температура 180 °С.

Это те же материалы, что и материалы класса B, но в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами.

Изоляция класса C. Допустимая предельная температура более 180 °С. Этот класс включает слюду, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые с неорганическими связующими составами или без связующих составов. Нагровостойкость этих материалов не используется полностью в современном электромашиностроении, поэтому предельная температура нагрева для этого класса не установлена.

Диэлектрические свойства изоляционных материалов с течением времени ухудшаются. При длительной эксплуатации изоляция усыхает, снижается ее диэлектрическая и механическая прочность, уменьшается пробивное напряжение. Этот процесс называют старением изоляции. Интенсивность старения во многом зависит от температуры. Чем выше рабочая температура двигателя, тем быстрее происходит старение изоляции и уменьшается срок службы двигателя. Соблюдение установленных ограничений по температуре нагрева обеспечивает срок службы изоляции для новых серий двигателей 15-20 лет. Нагрев выше допустимых температур ведет к разрушению изоляции и сокращению срока службы двигателя. Так, для изоляции класса A превышение допустимой температуры нагрева на каждые 8-10 °С сокращает срок службы изоляции вдвое.

Электродвигатели конструируются так, что предельные температуры обмоток с изоляцией различных классов достигаются при номинальной нагрузке на высоте до 1000 м над уровнем моря и температуре окружающей среды +40 °С, принимаемой за расчетную. Когда температура окружающей среды превышает +40 °С или высота над уровнем моря более 1000 м, нагрузка двигателя должна снижаться. Для учета влияния условий, в которых работают двигатели, ГОСТ устанавливает неабсолютную допустимую температуру его частей, а допустимое превышение их температуры над температурой окружающей среды. За номинальное принимается превышение температуры двигателя, равное разности между допустимой температурой нагрева для данного класса изоляции и расчетной температурой окружающей среды равной +40 °С.

Условия нагрева и охлаждения отдельных частей двигателя определяются законами тепловыделения, теплового излучения, теплопроводности и конвекции. Метод расчета реального теплового процесса такого неоднородного тела, каким является двигатель, весьма затруднителен. Поэтому для упрощения тепловых расчетов электродвигателей принимается ряд допущений, не оказывающих существенного влияния на конечные результаты: двигатель рассматривает-

ся как однородное тело, обладающее бесконечно большой проводимостью, обуславливающей одинаковую температуру во всех точках внутри тела и на поверхности, теплоотдача в окружающую среду пропорциональна первой степени превышения температуры двигателя, температура окружающей среды постоянна, удельные теплоемкость и теплоотдача не зависят от температуры двигателя.

4.1. Уравнения нагрева и охлаждения электродвигателей

При работе двигателя с неизменной во времени нагрузкой P процесс нагрева описывается уравнением теплового баланса

$$\Delta P dt = C d\tau + A \tau dt, \quad (4.1)$$

где ΔP — потери мощности при данной нагрузке, Дж/с;

$\Delta P dt$ — потери тепла за бесконечно малый отрезок времени, Дж;

C — теплоемкость двигателя, т.е. количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на 1°C , Дж/ $^\circ\text{C}$;

A — теплоотдача двигателя, т.е. количество тепла, рассеиваемого теплоотдающей поверхностью двигателя в 1 с при разности температур двигателя и окружающей среды в 1°C , Дж/с $^\circ\text{C}$.

τ — превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды, $^\circ\text{C}$:

$$\tau = \theta_d - \theta_o,$$

где θ_d, θ_o — соответственно температура двигателя и окружающей среды.

Теплоемкость двигателя определяется как

$$C = c_o m, \quad (4.2)$$

где c_o — удельная теплоемкость, обычно принимаемая по стали, Дж/кг $^\circ\text{C}$;
 m — масса двигателя, кг.

Теплоотдача двигателя — это количество тепла, отдаваемое с поверхности двигателя в единицу времени при разности температур в 1°C :

$$A = a F, \quad (4.3)$$

где a — удельная теплоотдача, Дж/м² с $^\circ\text{C}$;

F — поверхность теплоотдачи, м².

Для решения уравнения (4.1) разделяем переменные

$$dt = \frac{C d\tau}{\Delta P - A\tau}.$$

Интегралом левой и правой части этого уравнения является:

$$t = -\frac{C}{A} \ln(\Delta P - A\tau) + k.$$

Отношение теплоемкости к теплоотдаче в этом выражении есть величина постоянная для данного электродвигателя, имеет размерность времени и называется постоянной времени нагрева, с:

$$T = \frac{C}{A}. \quad (4.4)$$

Произвольная постоянная интегрирования k определяется из начальных условий: при $t = 0$, $\tau = \tau_{нач}$. Тогда, с учетом формулы (4.4),

$$k = T \ln(\Delta P - A\tau_{нач}).$$

Подставим выражение k в выражение (4.2):

$$t = -T [\ln(\Delta P - A\tau) - \ln(\Delta P - A\tau_{нач})]. \quad (4.5)$$

Разделим обе части выражения (4.5) на T и, учитывая, что разность логарифмов есть логарифм дроби, получим:

$$-\frac{t}{T} = \ln \frac{\Delta P - A\tau}{\Delta P - A\tau_{нач}}$$

и после потенцирования

$$e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\Delta P - A\tau}{\Delta P - A\tau_{нач}}.$$

Отсюда находим зависимость изменения превышения температуры двигателя от времени при работе с постоянной нагрузкой:

$$\tau = \frac{\Delta P}{A} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Из полученного выражения следует, что при работе двигателя с постоянной нагрузкой в течение большого промежутка времени ($t \rightarrow \infty$) превышение стремится к некоторому пределу, которое называется установившимся превышением

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A}. \quad (4.6)$$

Окончательно уравнение нагрева двигателя в переходном режиме при работе с постоянной нагрузкой запишется как

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (4.7)$$

Из уравнения (4.7) следует, что изменение превышения температуры двигателя происходит по закону экспоненты, т.е. по тому же закону, что и изменение $M(t)$, $I(t)$, $\omega(t)$ и $s(t)$ при механических переходных процессах.

При включении двигателя, температура которого равна температуре окружающей среды ($\tau_{нач} = 0$), уравнение (4.7) принимает вид:

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (4.8)$$

Если отключить нагретый двигатель, то его температура начнет снижаться. Зависимость превышения температуры двигателя от времени охлаждения называется уравнением охлаждения. Это уравнение вытекает из формулы (4.1), если принять в нем $\Delta P = 0$:

$$\tau = \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T_o}}, \quad (4.9)$$

где T_o — постоянная времени охлаждения двигателя.

Теоретически, согласно уравнениям (4.7) и (4.9), превышение температуры достигает установившегося значения при работе двигателя в течение времени $t = \infty$. Практически можно считать, что температура достигает установившегося значения при нагреве за время $t = (4...5) T$, а при охлаждении за время $t = (4...5) T_o$.

Постоянная времени нагрева и постоянная времени охлаждения равны между собою лишь в том случае, когда теплоотдача A при нагреве работающего двигателя с нагрузкой равна теплоотдаче A_o при охлаждении. Это возможно в том случае, когда двигатели имеют независимую вентиляцию или когда ротор или якорь вращаются с постоянной скоростью во время работы и охлаждения. При отключении и остановке самовентилируемого двигателя его теплоотдача уменьшается, постоянная времени охлаждения T_o оказывается значительно больше, чем постоянная времени нагрева T . Коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе (якоре):

$$\beta_o = \frac{A_o}{A}, \quad (4.10)$$

где A_o — теплоотдача при неподвижном роторе;
 A — то же при номинальной угловой скорости.

Примерные значения коэффициента ухудшения охлаждения для двигателей: закрытых с независимой вентиляцией $\beta_o = 1,0$; закрытых без принудительного охлаждения $\beta_o = 0,95...0,98$; закрытых самовентилируемых $\beta_o = 0,45...0,55$; самовентилируемых защищенных $\beta_o = 0,25...0,35$.

На рисунке 64 показаны графические зависимости превышения температуры от времени при нагреве и охлаждении двигателя. Кривая 1 соответствует уравнению (4.7), когда при включении двигателя в работу его температура была выше температуры окружающей среды на величину $\tau_{нач 1}$. Кривая 2 построена для случая, когда $\tau_{нач} = 0$. Изменение превышения температуры происходит по кривой 3, при начальном превышении $\tau_{нач 2}$ выше установившегося. Кривая 4 характеризует процесс охлаждения двигателя, согласно (4.9) при начальном превышении, равном в данном случае $\tau_{уст}$.

4.2. Физический смысл и способы определения постоянной времени нагрева

Постоянная времени нагрева характеризует тепловую инерцию двигателя; она показывает, с какой скоростью происходит изменение температуры при постоянной нагрузке. Ее физический смысл можно выявить, воспользовавшись уравнением (4.1), если принять в нем теплоотдачу равной нулю. Тогда уравнение теплового баланса приобретает вид:

$$\Delta P dt = C d\tau .$$

После интегрирования при постоянных потерях получим:

$$t = \frac{C}{\Delta P} \tau . \quad (4.11)$$

Отсюда следует, что при отсутствии обмена теплом с окружающей средой нагрев двигателя происходит не по экспоненте, а по закону прямой линии (прямые 5 и 6 на рисунке 64).

Если в выражении (4.11) превышение температуры принять равным установившемуся ($\tau_{уст} = \Delta P/A$), то:

$$t = \frac{C}{\Delta P} \frac{\Delta P}{A} = \frac{C}{A} = T .$$

Следовательно, постоянная времени нагрева есть время, за которое двигатель, работающий с постоянной нагрузкой, нагреется до установившегося превышения температуры при отсутствии отдачи тепла в окружающее пространство.

Из выражения (4.4) следует, что постоянная времени нагрева не зависит от нагрузки, а зависит только от геометрических размеров и конструктивных особенностей двигателя. Теплоемкость двигателя C возрастает пропорционально его объему или кубу линейных размеров, а охлаждающая поверхность увеличивается пропорционально квадрату линейных размеров. Таким образом, в первом приближении можно считать, что постоянная времени нагрева растет пропорционально линейным размерам двигателя. Известно, что расчетная мощность двигателя может быть выражена через его геометрические размеры:

$$P = kD^2 l \omega ,$$

где k — коэффициент пропорциональности;

D — диаметр якоря или ротора, м ;

l — длина активной части железа, м;

ω — угловая скорость ротора, 1/с.

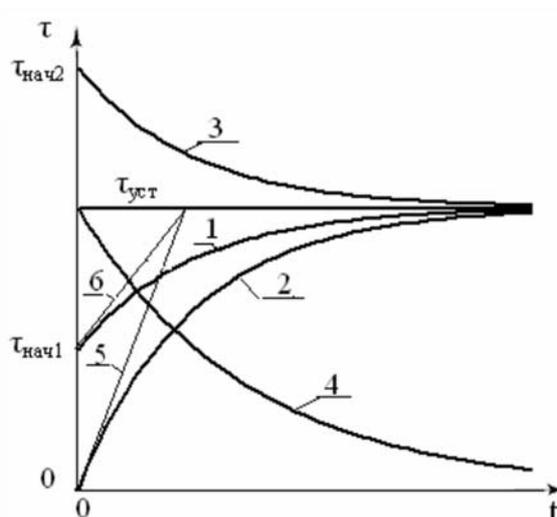


Рис. 64. Кривые нагрева и охлаждения двигателя

Таким образом постоянная времени нагрева пропорциональна линейным размерам машины $A = C/A \equiv l^3/l^2 = l$.

Двигатели одинаковой мощности открытого и защищенного типа имеют большую теплоотдачу, чем двигатели закрытого исполнения, поэтому их постоянная времени нагрева меньше. Теплоотдача двигателя в большой степени зависит от системы охлаждения. У двигателей с самовентиляцией при регулировании скорости постоянная времени нагрева изменяется в широких пределах и при остановке двигателя постоянная времени может достигать 4-4,5 кратного значения постоянной при вращении. У электродвигателей независимого возбуждения постоянная времени нагрева и охлаждения одинаковы и не зависят от скорости.

Изменение температуры двигателя во времени по закону экспоненты справедливо при принятых ранее допущениях. В реальных условиях процесс проходит значительно сложнее. Медная обмотка с относительно малой массой и большой теплопроводностью нагревается скорее, чем железо сердечников, которое, имея меньшие потери и большую массу и поверхность теплоотдачи, вначале нагревается медленнее. В дальнейшем по мере возрастания разности температур между железом и обмоткой количество передаваемого тепла от обмотки к стали увеличивается, и при $\tau \geq (0,5 \dots 0,6) \tau_{уст}$ процесс нагрева приобретает экспоненциальный характер.

В связи с тем, что постоянная времени нагрева зависит от линейных размеров двигателей, у закрытых двигателей, имеющих большую массу, она будет больше, чем у двигателей открытого или защищенного исполнения. Высокоскоростные двигатели при одной и той же мощности имеют меньшую массу и теплоемкость, и, следовательно, меньшую постоянную времени нагрева по сравнению с тихоходными.

Числовые значения постоянной времени нагрева не приводятся в паспорте или каталогах на электродвигатели, поэтому при необходимости их определяют расчетными или экспериментальными методами.

Расчетный метод. Для определения ориентировочного значения постоянной времени нагрева можно воспользоваться паспортными данными двигателя.

Как следует из выражения (4.4), постоянная времени нагрева

$$T = \frac{C}{A}.$$

Из паспорта двигателя и каталогов известны: $P_{нв}$, $\eta_{нв}$, $\tau_{нв}$ и m . По этим данным и выражению (4.2) определяется теплоемкость двигателя C .

Теплоотдача двигателя определяется из формулы (4.6) для номинальных потерь и номинальному превышению температуры как

$$A = \frac{\Delta P_{н}}{\tau_{н}}.$$

Здесь номинальные потери мощности

$$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}.$$

Более точно постоянную времени нагрева определяют одним из экспериментальных методов. При их использовании проводится опыт нагрева двигателя при постоянной нагрузке и определяется установившееся превышение температуры.

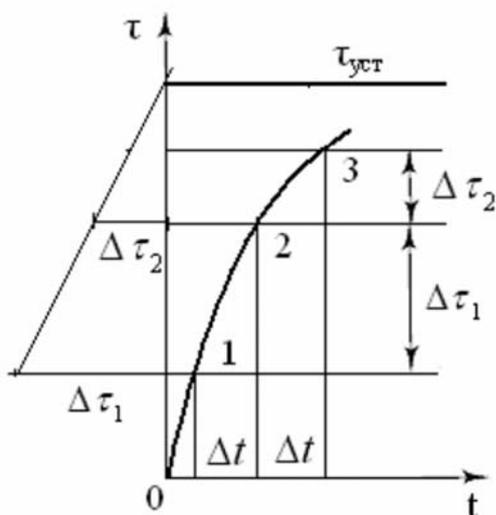


Рис. 65. Определение установившегося превышения температуры двигателя

Для этого по данным опыта нагрева строится график $\tau(t)$, на оси абсцисс которого откладываются два одинаковых отрезка времени Δt (рис. 65). На границах этих отрезков проводятся вертикали до пересечения с кривой нагрева. Через полученные точки 1, 2 и 3 проводятся горизонтальные линии, между которыми заключены приращения температуры $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$, соответствующие приращениям времени. На нижней и средней горизонтальных линиях влево (или вправо) от оси ординат откладывается произвольное, но одинаковое число этих отрезков и через концы полученных горизонталей проводится наклонная прямая до пересечения с осью ординат.

Точка пересечения этой прямой с осью ординат определяет величину установившегося превышения температуры $\tau_{уст}$. Достоверность определения $\tau_{уст}$ будет тем выше, чем большими на опытной кривой $\tau(t)$ будут приняты отрезки времени Δt .

Метод начального нагрева. Нагрев двигателя при $\tau_{нач} = 0$ происходит в соответствии с уравнением (4.8) и по истечении времени $t = T$ превышение температуры достигает $0,638 \tau_{уст}$. Следовательно, если это значение превышения отложить на оси ординат опытного графика нагрева, провести горизонтальную линию до пересечения с кривой нагрева и точку пересечения спроецировать на ось абсцисс (рис. 66), то отрезок на этой оси определит постоянную времени T . Аналогично по графику кривой охлаждения можно определить постоянную времени охлаждения. Для этого на оси ординат следует отложить величину $0,368 \tau_{уст}$, провести горизонтальную линию до пересечения с кривой охлаждения и точку пересечения спроецировать на ось абсцисс. Отрезок на оси времени от нуля до проекции точки пересечения дает искомую величину постоянной времени охлаждения T_o .

Метод касательных. Метод касательных основан на том свойстве экспоненты, что в любой точке кривой величина отрезка на оси абсцисс, заключенная между проекцией точки касания и проекцией точки пересечения касательной с линией $\tau_{уст}$ на эту ось, есть постоянная времени нагрева.

Для доказательства проведем касательную к кривой нагрева в произвольной точке A с координатами t_1 и τ_1 и на этой касательной примем точку B с текущими координатами t и τ . Как следует из рисунка 66,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\tau - \tau_1}{t - t_1}. \quad (4.12)$$

С другой стороны, $\operatorname{tg} \alpha$ есть производная от уравнения нагрева (4.8) по времени, т.е.

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\tau_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right] = \frac{\tau_{уст}}{T} e^{-\frac{t}{T}},$$

следовательно,

$$\frac{\tau - \tau_1}{t - t_1} = \frac{\tau_{уст}}{T} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Если точка B будет иметь координатами $\tau = \tau_{уст}$ и $t = t_2$, то, после подстановки этих значений в выражение (4.12) и решения его относительно разности $t_2 - t_1$, получим:

$$t_2 - t_1 = \frac{\tau_{уст} - \tau_1}{\frac{\tau_{уст}}{T} e^{-\frac{t_1}{T}}} = T \frac{\tau_{уст} - \tau_1}{\tau_{уст} e^{-\frac{t_1}{T}}}. \quad (4.13)$$

Но из уравнения нагрева следует, что

$$\tau_{уст} - \tau_1 = \tau_{уст} e^{-\frac{t_1}{T}}.$$

Подставляя это значение разности температур в числитель выражения (4.13), получим: $t_2 - t_1 = T$.

Метод трех точек. Определение постоянной времени нагрева этим методом не требует проведения вспомогательных построений для нахождения установившегося превышения температуры.

Имея часть опытной кривой нагрева (см. рис. 65), запишем значения превышения температур в точках 2 и 3:

$$\tau_2 = \tau_{уст} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}} \right) + \tau_1 e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad \text{и} \quad \tau_3 = \tau_{уст} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}} \right) + \tau_2 e^{-\frac{\Delta t}{T}}.$$

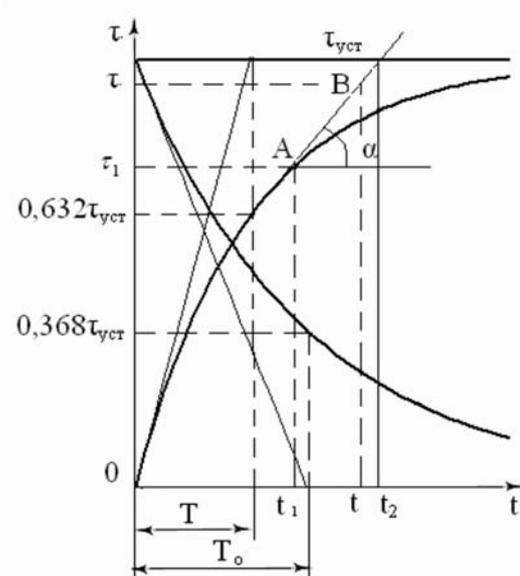


Рис. 66. Определение постоянной T методом начального генератора

Из этих выражений находим $\tau_{уст}$ и сравниваем между собою:

$$\tau_{уст} = \frac{\tau_2 - \tau_1 e^{-\frac{\Delta t}{T}}}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}} = \frac{\tau_3 - \tau_2 e^{-\frac{\Delta t}{T}}}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}}.$$

Отсюда

$$\tau_2 - \tau_1 e^{-\frac{\Delta t}{T}} = \tau_3 - \tau_2 e^{-\frac{\Delta t}{T}}$$

или

$$(\tau_2 - \tau_1) e^{-\frac{\Delta t}{T}} = \tau_3 - \tau_2.$$

Решая полученное выражение относительно постоянной времени, получим

$$T = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}} = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\Delta \tau_1}{\Delta \tau_2}}.$$

Для определения постоянной времени охлаждения достаточно по кривой охлаждения определить температуру в двух точках, тогда:

$$T_o = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_1}{\tau_2}},$$

где Δt — приращение времени между точками на опытной кривой охлаждения с температурами τ_1 и τ_2 .

4.3. Зависимость потерь мощности и установившегося превышения температуры от нагрузки

Как известно, потери мощности в двигателях, определяющие его нагрев, складываются из потерь в обмотках, сердечниках, подшипниках и дополнительных. Потери в обмотках двигателей обуславливаются протеканием токов по их омическим сопротивлениям. При постоянном напряжении токи в обмотках изменяются пропорционально мощности, определяемой нагрузкой на его валу, следовательно, изменяются и потери в них. Эти потери принято называть переменными. Потери в сердечниках определяются магнитной индукцией, которая при постоянном напряжении остается практически неизменной, не зависящей от нагрузки. Независящими от нагрузки можно считать также потери на трение в подшипниках двигателей с жесткой механической характеристикой и добавочные потери. Эти потери называются постоянными. Таким образом, суммарные потери в двигателях складываются из переменных, зависящих от нагрузки, и постоянных, не зависящих от нагрузки потерь, т.е.

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_c + \Delta P_v, \quad (4.14)$$

где ΔP_{Σ} , ΔP_c и ΔP_v — суммарные, постоянные и переменные потери соответственно.

При номинальной нагрузке по обмоткам двигателя протекают номинальные токи и потери в двигателе, в том числе и переменные, будут номинальными:

$$\Delta P_n = \Delta P_c + \Delta P_{\text{сн}}. \quad (4.15)$$

Вынесем номинальные переменные потери в выражении (4.15) за скобки:

$$\Delta P_n = \Delta P_{\text{сн}} \left(\frac{\Delta P_c}{\Delta P_{\text{сн}}} + 1 \right).$$

Отношение постоянных потерь к номинальным переменным потерям называется коэффициентом потерь

$$\alpha = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{\text{сн}}}. \quad (4.16)$$

С учетом выражения (4.16), потери в двигателе можно записать как:

$$\Delta P_n = \Delta P_{\text{сн}} (\alpha + 1). \quad (4.17)$$

Переменные потери мощности в выражении (4.14) выразим через токи и сопротивления

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_c + mI^2r,$$

где m — число обмоток в двигателе;
 I — ток, протекающий по обмоткам;
 r — активное сопротивление обмоток.

Умножим переменные потери выражения (4.17) на квадрат отношения номинальных тока и напряжения:

$$\Delta P_x = \Delta P_c + mI_x^2r \left(\frac{I_n U_n}{I_x U_n} \right)^2,$$

где ΔP_x и I_x — суммарные потери и ток при данной нагрузке.

Поменяв местами токи в числителе, получим:

$$\Delta P_x = \Delta P_c + mI_n^2rx^2, \quad (4.18)$$

где mI_n^2r — номинальные переменные потери, $\Delta P_{\text{сн}}$;
 x — коэффициент загрузки:

$$x = \frac{I_x U_n}{I_n U_n} = \frac{P_x}{P_n} = \frac{I_x}{I_n}.$$

Вынесем за скобки в выражении (4.18) номинальные переменные потери:

$$\Delta P_x = \Delta P_{\text{сн}} (\alpha + x^2). \quad (4.19)$$

Разделим выражение (4.17) на (4.19) и решим его относительно суммарных потерь:

$$\Delta P_x = \Delta P_n \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}. \quad (4.20)$$

Полученное выражение показывает, что потери мощности в большой степени определяются коэффициентом загрузки двигателя и даже небольшие перегрузки могут привести к значительному увеличению потерь. Если пренебречь постоянными потерями, то из (4.20) следует, что потери в двигателе прямо пропорциональны квадрату мощности или квадрату тока

$$\Delta P \approx kP^2 = k_1 I^2$$

Как следует из формулы (4.6), установившееся превышение температуры двигателя находится в прямой зависимости от потерь мощности. Если в это выражение подставить значение потерь из формулы (4.20), получим:

$$\tau_{уст.x} = \frac{\Delta P_n}{A} \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}. \quad (4.21)$$

При номинальных потерях имеет место номинальное установившееся превышение:

$$\tau_{уст.n} = \frac{\Delta P_n}{A}. \quad (4.22)$$

Подставляя это значение установившегося превышения в (4.21), можно записать:

$$\tau_{уст.x} = \tau_{уст.n} \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}. \quad (4.23)$$

Из выражения (4.23) видно, что установившееся превышение температуры находится в той же зависимости от нагрузки, что и потери мощности. Характер нагрева двигателя при различных нагрузках a и графическая зависимость установившегося превышения от нагрузки b в относительных единицах показаны на рисунке 67.

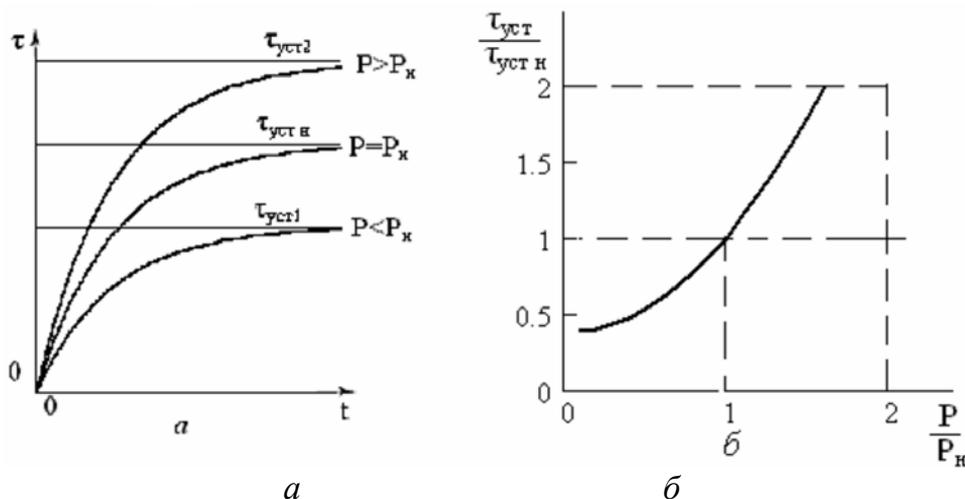


Рис. 67. Кривые нагрева (а) и зависимость установившегося превышения температуры (б) от нагрузки

Из приведенного анализа следует, что электродвигатели весьма чувствительны к перегрузкам и даже незначительное увеличение нагрузки сверх номинальной может привести к опасным перегревам.

4.4. Коэффициент полезного действия электродвигателей

Номинальный к.п.д. электродвигателей достаточно высок, он приводится в паспорте двигателя. При нагрузках, отличных от номинальных, к.п.д. изменяется в довольно широких пределах от максимального значения при нагрузках близких к номинальной до нуля при холостом ходе. Зависимость к.п.д. от нагрузки в виде графиков или таблиц в обобщенной форме приводится в некоторых справочниках, для конкретного двигателя она может быть вычислена по формулам.

Потери мощности при номинальной нагрузке двигателя определяются по данным паспорта как:

$$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}, \quad (4.24)$$

при нагрузках, отличных от номинальных

$$\Delta P_x = P_x \frac{1 - \eta_x}{\eta_x}. \quad (4.25)$$

Разделив выражение (4.24) на (4.23), получим:

$$\frac{\Delta P_x}{\Delta P_n} = \frac{P_x}{P_n} \frac{\frac{1}{\eta_x} - 1}{\frac{1}{\eta_n} - 1},$$

или, с учетом (4.20),

$$\frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1} \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) = x \left(\frac{1}{\eta_x} - 1 \right),$$

где x — коэффициент загрузки.

Отсюда

$$\eta_x = \frac{\eta_n (\alpha + 1)}{\eta_n (\alpha + 1) + (1 - \eta_n) \left(\frac{\alpha}{x} + x \right)}. \quad (4.26)$$

Полученное выражение показывает, что к.п.д. двигателя зависит от коэффициента загрузки и коэффициента потерь. Характер этой зависимости от степени загрузки двигателя можно выявить, приравняв к нулю первую

производную функции (4.26), т.е. $\frac{d\eta_x}{dx} = 0$.

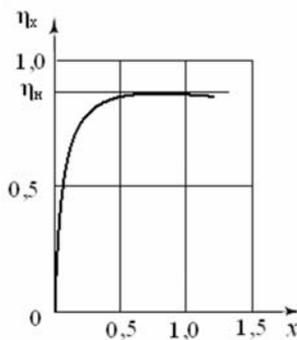


Рис. 68. Зависимость к.п.д. от загрузки

Отсюда находим, что к.п.д. достигает своего максимума при $x = \sqrt{\alpha}$. На рисунке 68 показана зависимость к.п.д. от коэффициента загрузки. Из графика этой зависимости видно, что коэффициент полезного действия достигает максимального значения при нагрузке несколько меньше номинальной мощности. Благодаря этому, двигатели, выбираемые в реальных условиях с некоторым запасом, работают при максимальном к.п.д.

4.5. Влияние температуры окружающей среды на мощность электродвигателя

В процессе работы двигатель получает тепло от окружающей среды и внутренних потерь мощности. Суммарный нагрев ограничивается допустимой температурой изоляции. Расчетная температура окружающей среды принимается равной +40 °С. Номинальная мощность электродвигателя — это мощность нагрузки, при работе с которой двигатель, работающий в установленном для него режиме при расчетной температуре окружающей среды и высоте над уровнем моря до 1000 м, нагревается до допустимой для данного класса изоляции температуры. Превышение температуры при работе с номинальной нагрузкой называется номинальным. Номинальное превышение не зависит от температуры окружающей среды. При отклонении температуры окружающей среды от расчетной допустимое установившееся превышение определяется как разность между допустимой температурой нагрева изоляции и температурой окружающей среды:

$$\tau_{уст} = \theta_{дон} - \theta_o.$$

При температуре окружающей среды меньше 40 °С двигатель может быть нагружен несколько выше номинальной мощности. При температуре окружающей среды выше расчетной нагрузка должна быть снижена относительно номинальной.

Для достижения предельно допустимой температуры нагрева изоляции при отклонении температуры окружающей среды от расчетной на $\Delta\tau$ допустимое превышение должно быть уменьшено на эту величину (при $\theta_o > +40$ °С) или может быть увеличено (при $\theta_o < +40$ °С).

Допустимое установившееся превышение при отклонении температуры окружающей среды от расчетной можно выразить как:

$$\tau_{уст} = \tau_n + \Delta\tau.$$

С другой стороны, учитывая зависимость установившегося превышения от потерь,

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P_x}{A}.$$

Следовательно,

$$\tau_n + \Delta\tau = \frac{\Delta P_x}{A}, \quad (4.27)$$

где $\Delta\tau$ — отклонение температуры окружающей среды от расчетной,
 $\Delta\tau = 40 - \theta_o$;

ΔP_x — допустимые потери мощности.

При расчетной температуре окружающей среды установившееся превышение равно номинальному:

$$\tau_n = \frac{\Delta P_n}{A}. \quad (4.28)$$

Поделив выражение (4.27) на (4.28), получим

$$\frac{\tau_n + \Delta\tau}{\tau_n} = \frac{\Delta P_x}{\Delta P_n}.$$

В этом выражении значение ΔP_x введем из (4.20), тогда

$$\frac{\tau_n + \Delta\tau}{\tau_n} = \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}.$$

Отсюда

$$x = \sqrt{1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_n}(\alpha + 1)},$$

где x — коэффициент загрузки двигателя, $x = P_x/P_n$.

Подставляя значение x в полученное выражение, находим значение допустимой мощности нагрузки при данном отклонении температуры окружающей среды от расчетной:

$$P_x = P_n \sqrt{1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_n}(\alpha + 1)}.$$

Специально увеличивать нагрузку сверх номинальной при температуре среды ниже 40 °С не рекомендуется, так как разность между температурой обмотки в наиболее нагретой части (в пазу статора) и средней температурой двигателя возрастает примерно пропорционально квадрату коэффициента загрузки, что может привести к появлению опасных пиковых температур.

Литература: [2, с. 194-204; 5, с. 22-29; 6, с. 211-220; 10, с. 348-353].

ГЛАВА 5. РАСЧЕТ И ВЫБОР НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

От правильного выбора мощности электродвигателя зависят его надежность, экономичность и энергетические показатели в процессе эксплуатации. В тех случаях, когда нагрузка двигателя существенно меньше номинальной, он недоиспользуется по мощности, что ведет к росту капитальных вложений, а к.п.д. и коэффициент мощности двигателя заметно снижаются.

При нагрузках, превышающих номинальную мощность двигателя, увеличиваются токи и потери мощности сверх соответствующих номинальных значений. Вследствие этого, температура двигателя в процессе работы может превысить допустимое значение. В свою очередь, рост температуры выше допустимой приводит к быстрому старению изоляции, уменьшению срока службы и снижению надежности привода в целом. Поэтому нагрев является одним из основных параметров, с учетом которого следует выбирать двигатели. Задача выбора мощности электродвигателя осложняется тем обстоятельством, что нагрузка на его валу в процессе работы, как правило, изменяется по величине, в результате чего изменяются токи в обмотках, потери мощности и соответственно температура нагрева. Для обоснованного выбора мощности электродвигателя необходимо знать величину нагрузки на его валу, характер ее изменения во времени, продолжительность работы, то есть график нагрузки. График нагрузки позволяет определять потери мощности в электродвигателе, что, в свою очередь, дает возможность рассчитывать его температуру нагрева. Нагрев зависит от нагрузки, режима работы двигателя, т.е. от соотношения длительности периодов работы и пауз между ними, от периодов работы с полной или частичной нагрузкой, от частоты включения машины, характера протекания переходных процессов и т.д.

Таким образом, в основе расчета и выбора номинальной мощности электродвигателя лежит его нагрев: правильно выбранный по мощности двигатель в процессе работы в заданном режиме должен нагреваться до температуры близкой к допустимой, не превышая ее.

Различные условия работы производственных механизмов обуславливают собою режимы работы электродвигателей.

Номинальным режимом работы электрической машины, согласно ГОСТ 17154—71, называют режим работы, для которого машина предназначена заводом-изготовителем и который указан на ее щитке. Для этого режима в каталогах и паспорте двигателя указываются: номинальная полезная механическая мощность на валу, номинальное напряжение, номинальный ток, номинальная частота вращения, номинальный к.п.д., номинальный коэффициент мощности. В соответствии с ГОСТ 183—74, установлено восемь номинальных режимов с условными обозначениями от S1 до S8.

5.1. Классификация режимов работы электродвигателей

1. *Продолжительный номинальный режим (S1)*. Это режим, при котором время работы двигателя при практически неизменных нагрузке и температуре окружающей среды достаточно для нагрева всех его частей до практически установившейся температуры. Графики нагрузки, потерь мощности и превышения температуры приведены на рисунке 69.

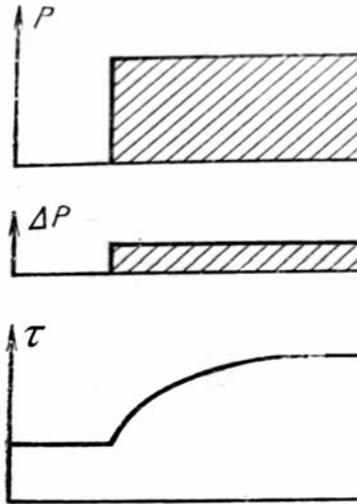


Рис. 69. Зависимость $P(t)$ и $\tau(t)$ при продолжительном режиме

2. *Кратковременный номинальный режим работы (S2)*. Это режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя, причем за время работы температура его частей не успевает достигнуть установившегося значения, а за время пауз (отключения) успевает снизиться до температуры окружающей среды (рис. 70). Установленная ГОСТ длительность периодов работы в данном режиме 10, 30, 60 и 90 мин. Она указывается в условном обозначении режима работы на щитке двигателя, например S2 — 30 мин, S2 — 60 мин.

3. *Повторно-кратковременным номинальным режимом работы (S3)* называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами отключения двигателя (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений (рис. 71). В этом режиме продолжительность цикла установлена не менее 10 мин. Режим характеризуется продолжительностью включения ПВ — отношением времени работы к времени цикла, %:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_o} 100\% = \frac{t_p}{t_u} 100\%,$$

или относительной продолжительностью:

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_o},$$

где t_p — время работы;
 t_o — время паузы;
 t_u — время цикла.

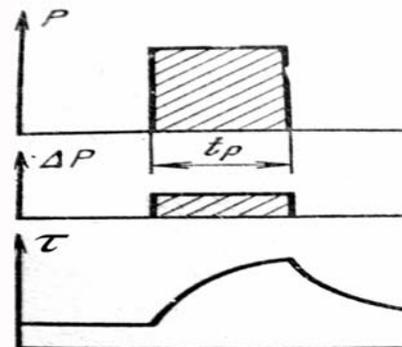


Рис. 70. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при кратковременном режиме

Продолжительность включения для повторно-кратковременных режимов принята 15, 25, 40 и 60%. В этом режиме потери при пуске практически не оказывают влияния на нагрев машины, так как продолжительность пускового периода много меньше периода работы.

4. *Повторно-кратковременным режимом работы с частыми пусками (S4)* называется режим, при котором периоды пуска и кратковременной неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя,

причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры его частей могли достигнуть установившихся значений (рис. 72). В этом режиме пусковые потери оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины. Здесь остановка двигателя после его отключения осуществляется путем выбега, либо посредством механического торможения, поэтому после отключения дополнительного нагрева не происходит. Данный режим характеризуется продолжительностью включения, числом пуска и коэффициентом инерции привода.

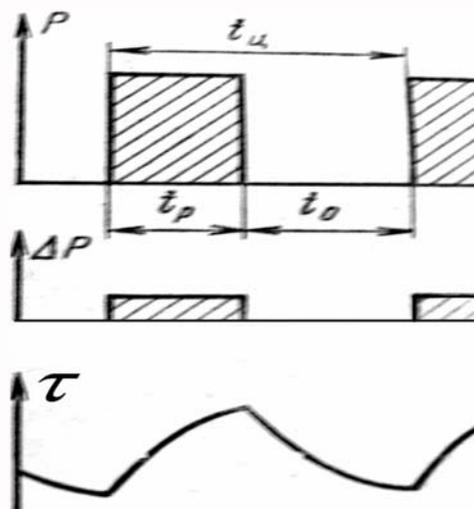


Рис. 71. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при повторно-кратковременном режиме

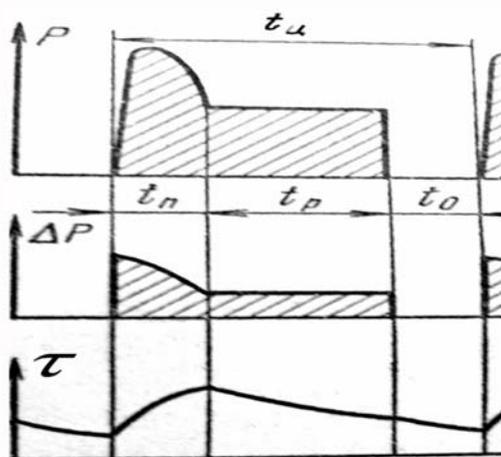


Рис. 72. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при повторно-кратковременном режиме с частыми пусками

60, 120 и 240. Коэффициент инерции — это отношение суммы приведенного к валу двигателя момента инерции привода и момента инерции ротора (якоря) к моменту инерции ротора (якоря):

$$FI = \frac{J_{\Sigma}}{J_p}$$

Нормированные значения коэффициента инерции: 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10.

отключения осуществляется путем выбега, либо посредством механического торможения, поэтому после отключения дополнительного нагрева не происходит. Данный режим характеризуется продолжительностью включения, числом пуска и коэффициентом инерции привода. Продолжительность включения определяется как:

$$ПВ = \frac{t_n + t_p}{t_n + t_p + t_o} 100, \%$$

Нормируемое значение ПВ: 15, 25, 40 и 60%. Нормируемое число пусков в час: 30,

В условном обозначении режима указывается продолжительность включения, число включений в час и коэффициент инерции, например: $S4 — 25\%$, включений в час — 120, $FI — 2$.

Это означает, что двигатель при коэффициенте инерции $FI = 2$ рассчитан на работу при 120 включений в час, длительность каждого цикла составляет $60 / 120 = 0,5$ мин, из которых время пуска и время работы составляют 25%, т.е. 7,5 мин, а время паузы 22,5 мин.

5. *Повторно-кратковременным номинальным режимом с частыми пусками и электрическим торможением (S5)* называется режим, при котором периоды пуска, кратковременной неизменной номинальной нагрузки и электрического торможения чередуются с периодами отключения двигателя, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений (рис. 73). В этом режиме потери в переходных режимах пуска и электрического торможения оказывают существенное влияние на нагрев двигателя.

Продолжительность включения определяется как:

$$ПВ = \frac{t_n + t_p + t_m}{t_n + t_p + t_m + t_o} 100\% .$$

Режим характеризуется теми же значениями продолжительности включения, числа пусков в час и коэффициента инерции, включая $FI = 1,2$, но исключая $FI = 6,3$ и 10.

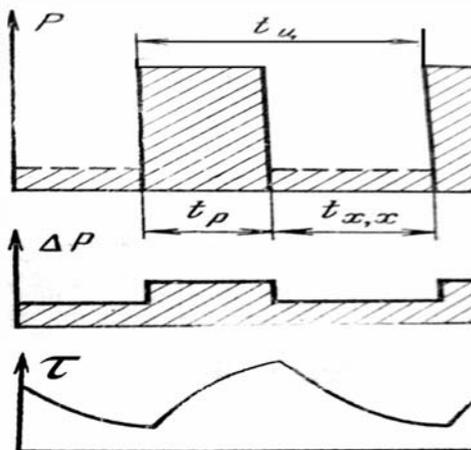


Рис. 74. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при перемежающемся режиме

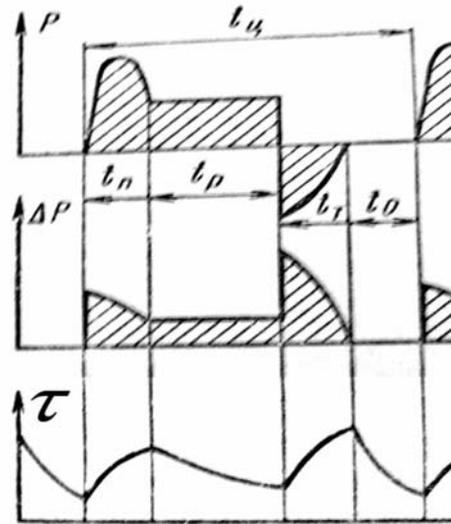


Рис. 73. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и электрическим торможением

6. *Перемежающимся номинальным режимом работы (S6)* называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами холостого хода, причем как рабочие периоды, так и периоды холостого хода не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений (рис. 74).

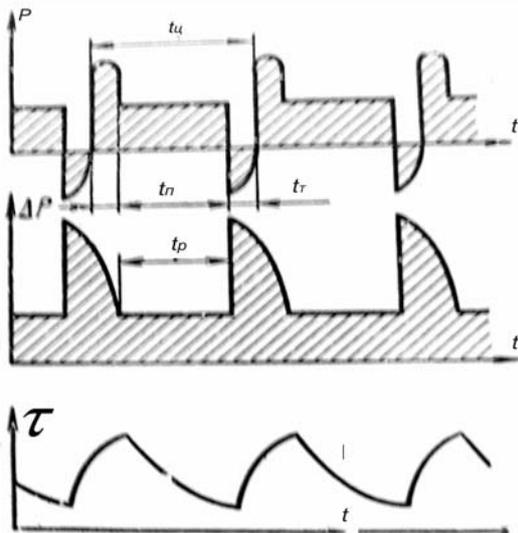


Рис. 75. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$, $\tau(t)$ при перемежающемся режиме с частыми реверсами

Продолжительность цикла в этом режиме не должна превышать 10 мин. Потери при пуске и торможении не учитываются. Продолжительность нагрузки определяется как

$$ПН = \frac{t_p}{t_p + t_{x.x}} 100\%.$$

Нормируемые значения продолжительности нагрузки 15, 25, 40 и 60%.

7. *Перемежающимся номинальным режимом работы с частыми реверсами (S7)* называется режим, при котором периоды реверса с электрическим торможением чередуются с периодами неизменной номинальной нагрузки, причем периоды нагрузки не настолько велики, чтобы превышения температуры частей машины могли достигать установившихся (рис. 75). Длительность цикла работы определяется числом включений в час: 30, 60, 120 или 240 при определенном коэффициенте инерции FI : 1,2; 1,6; 2,0; 2,5 или 4,0. Из-за малой длительности неизменной нагрузки потери в периоды пусков и реверсов оказывают существенное влияние на нагрев частей двигателя.

8. *Перемежающийся номинальный режим работы с двумя или более угловыми скоростями (S8)*. Это режим, при котором периоды работы с неизменной нагрузкой на одной угловой скорости чередуются с периодами работы на другой угловой скорости соответствующей этой скорости нагрузкой (рис. 76) Режим определяется числом циклов в час: 30, 60, 120 или 240, коэффициентом инерции FI : 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; и 4,0 и относительной продолжительностью нагрузки на каждой из угловых скоростей. В этом режиме по-

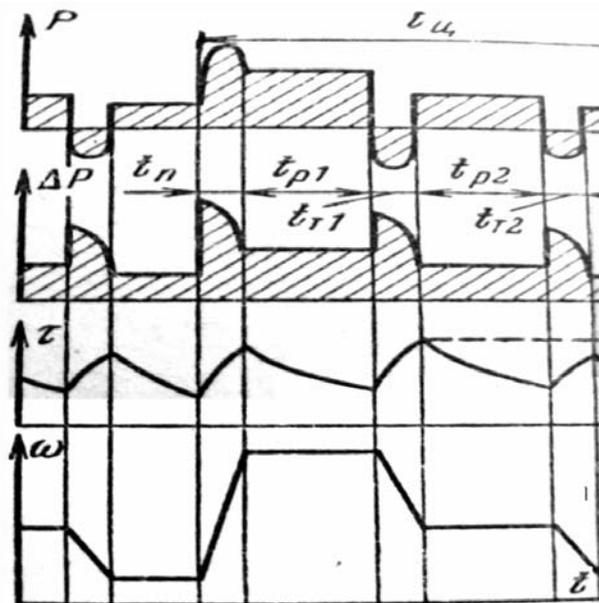


Рис. 76. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$, $\tau(t)$ и $\omega(t)$ при перемежающемся режиме с двумя и более скоростями

тери при переходе с одной угловой скорости на другую оказывают существенное влияние на превышения температуры частей машины. Продолжительность нагрузки определяется по формулам:

$$ПН = \frac{t_n + t_{p1}}{t_n + t_{p1} + t_{m1} + t_{p2} + t_{m2} + t_{p3}} 100\%,$$

$$ПН_2 = \frac{t_{m1} + t_{p2}}{t_n + t_{p1} + t_{m1} + t_{p2} + t_{m2} + t_{p3}} 100\%,$$

$$ПН_3 = \frac{t_{m2} + t_{p3}}{t_n + t_{p1} + t_{m1} + t_{p2} + t_{m2} + t_{p3}} 100\%,$$

где t_{p1}, t_{p2}, t_{p3} — время работы на каждой угловой скорости;
 t_{m1}, t_{m2} — время электрического торможения;
 t_n — время пуска.

Литература: [2, с. 204-209; 5, с. 46-49; 6, с. 234-239; 10, с. 354-359].

5.2. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при продолжительном режиме работы

При работе двигателей в продолжительном режиме нагрузка на валу двигателя может оставаться неизменной или изменяться иногда в довольно широких пределах. При постоянной нагрузке потери в двигателе также постоянные, и выбор номинальной мощности не представляет больших трудностей: номинальная мощность двигателя должна быть равна мощности нагрузки с учетом потерь в передаточном механизме.

При переменной нагрузке изменяется ток двигателя и потери мощности в его обмотках. Потери в сердечниках при этом остаются практически неизменными. При регулировании угловой скорости, изменении ее в процессе разбега и торможения, при остановках двигателя в период пауз изменяется его теплоотдача, что оказывает существенное влияние на нагрев электродвигателя. Учет всех этих факторов при переменной нагрузке приводит к несколько более сложным методам расчета и выбора номинальной мощности двигателя.

Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы с постоянной нагрузкой

В различных отраслях производства довольно много машин и механизмов, которые создают на валу двигателя продолжительную во времени постоянную или мало меняющуюся по величине нагрузку. К ним относятся вентиляторы, центробежные и вихревые насосы, сепараторы, гребные винты, центрифуги и т.п. Основанием к выбору номинальной мощности

двигателя для привода этих машин могут служить мощность, указанная в паспорте машины, нагрузочные диаграммы, снятые каким-либо регистрирующим прибором (ваттметром, амперметром, динамометром и т.п.), нормы потребления энергии на единицу перерабатываемой продукции, результаты расчетов по теоретическим или эмпирическим формулам. Разделив найденную мощность нагрузки на коэффициент полезного действия передачи, определяют требуемую мощность двигателя, по которой следует выбирать его номинальную мощность. При продолжительной работе двигатель запускается редко, поэтому потери в переходном режиме пуска не оказывают заметного влияния на его нагрев и могут не учитываться.

Если температура окружающей среды не равна расчетной, мощность двигателя следует пересчитать по формуле (4.26).

В соответствии с полученными результатами, по каталогу выбирается номинальная мощность двигателя из условия:

$$P_n \geq P_c, \quad (5.1)$$

где P_n — номинальная мощность двигателя;

P_c — мощность нагрузки (мощность сопротивления рабочей машины на валу двигателя).

Это условие означает, что номинальную мощность двигателя следует выбирать равной мощности нагрузки; при отсутствии двигателя такой мощности выбирается двигатель ближайшей большей номинальной мощности.

Выбранный электродвигатель необходимо проверить по условиям пуска:

$$k_u^2 M_n \mu_n \geq M_{c.mp} + 0,25 M_n, \quad (5.2)$$

где k_u — коэффициент понижения напряжения;

M_n — номинальный момент двигателя;

$M_{c.mp}$ — момент сопротивления при трогании рабочей машины;

μ_n — кратность пускового момента.

Выражение (5.2) говорит о том, что пусковой момент при пониженном напряжении в левой части уравнения должен равняться сумме момента сопротивления при трогании рабочей машины ($M_{c.mp}$) и момента, необходимого для преодоления инерционных масс при разбеге ($0,25 M_n$).

При этом следует учитывать, что у многих машин сопротивление трения в момент трогания с места может быть повышено из-за стекания масла в подшипниках (сухое трение) или застывания смазки при низких температурах.

Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы с переменной нагрузкой

Примерами машин, создающими переменные нагрузки на валу электродвигателей, могут служить молотильные барабаны, прессы для сена и соломы, кормоприготовительные и сортировальные машины, электропахотные агрегаты и т.д. Величина нагрузки этих машин может изменяться в широких пределах в зависимости от технологических особенностей машины, количества и характера поступления перерабатываемого материала, его физико-механических свойств и др. Выбор мощности двигателя для продолжительного режима работы с переменной нагрузкой представляет собою более сложную задачу, чем при постоянной нагрузке.

Производить выбор мощности двигателя по максимальной нагрузке было бы неправильно, так как при работе с меньшими нагрузками двигатель будет недогружен. Очевидно, что выбирать двигатель с номинальной мощностью равной минимальной мощности нагрузки также недопустимо, так как при работе с другими нагрузками он будет перегружаться, и его температура превысит допустимую. Выбор мощности двигателя по среднему значению нагрузки иногда может дать значительную ошибку. Это объясняется тем, что средняя мощность не учитывает квадратичной зависимости потерь в двигателе от тока, протекающего по обмоткам.

Электродвигатель должен выбираться так, чтобы при максимальной нагрузке температура изоляции не превышала допустимой. Этому требованию наиболее полно отвечает метод максимального нагрева, который позволяет определять превышение температуры двигателя при максимальном нагреве и сравнивать его с допустимым. Для расчета номинальной мощности электродвигателей могут применяться метод максимального нагрева, метод средних потерь, метод эквивалентных величин. Каждый из этих методов имеет свои положительные стороны и недостатки и выбирается тот из них, который наиболее полно отвечает требованиям поставленной задачи.

Метод максимального нагрева. Для решения задачи по расчету номинальной мощности двигателя любым из перечисленных методом необходимо с помощью приборов-самописцев получить нагрузочную диаграмму рабочей машины для нормального режима работы так, чтобы в нее вошли наиболее характерные для данного технологического процесса изменения нагрузки (рис. 77). Таким образом, в основе расчета номинальной мощности двигателя лежит нагрузочная диаграмма.

Расчет следует начинать с того, что график нагрузки разбивается на отдельные участки по времени, в пределах которых реальная нагрузка заменяется постоянной, а нагрузочная диаграмма представляется в виде ступенчатой линии с отрезками времени t_1, t_2, \dots, t_n и соответствующими мощностями P_1, P_2, \dots, P_n . При замене реальной нагрузки постоянной на участках следует руководствоваться правилом равенства площадей: площадка над линией постоянной нагрузки должна равняться-

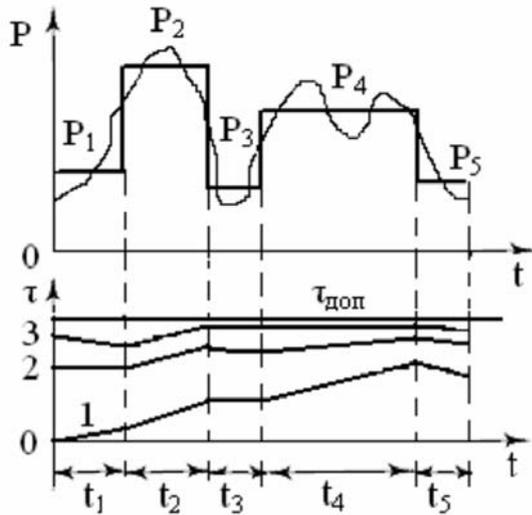


Рис. 77. график нагрузки и нагрева двигателя в продолжительном режиме с переменной нагрузкой

ся площади под прямой. По диаграмме со ступенчатой нагрузкой определяется средняя мощность двигателя:

$$P_{cp} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\sum_1^n t_i}.$$

При расчете средней мощности самовентилируемых двигателей необходимо учитывать изменение теплоотдачи, вызванное изменениями угловой скорости. В этом случае средняя мощность находится из выражения:

$$P_{cp} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j}. \quad (5.3)$$

- где β_j — коэффициент, учитывающий уменьшение теплоотдачи, вызванное снижением угловой скорости;
- n — число участков с постоянной скоростью;
- m — число участков с изменяющейся скоростью.

Теплоотдача двигателя находится в линейной зависимости от угловой скорости

$$\beta_j = \beta_o + (1 - \beta_o) \frac{\omega_j}{\omega_n},$$

где β_o — коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе.

При $\omega = \omega_n$ коэффициент ухудшения охлаждения $\beta_o = 1$, а среднее его значение при изменении скорости от 0 до номинальной определяется как:

$$\beta_{cp} = \frac{1 + \beta_o}{2}.$$

Учитывая квадратичную зависимость потерь в обмотках двигателя от протекающих по ним токов, определяем расчетную мощность

$$P_{рас} = (1,2 \dots 1,3) P_{cp}. \quad (5.4)$$

По каталогу выбираем номинальную мощность двигателя по условию:

$$P_n \geq P_{рас}.$$

Имея график нагрузки и номинальную мощность двигателя, определяем коэффициенты загрузки на каждом участке графика нагрузки

$$x_i = \frac{P_i}{P_n}, \quad (5.5)$$

а используя выражение (4.23), находим установившееся превышение температуры на участках

$$\tau_{уст.i} = \tau_n \frac{\alpha + x_i^2}{\alpha + 1}, \quad (5.6)$$

где τ_n — номинальное превышение температуры, определяемое из выражения (4.22).

Номинальные потери мощности в формуле (4.22) для выбранного двигателя определяются как:

$$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}. \quad (5.7)$$

Превышение температуры в конце каждого участка определяется по уравнению нагрева

$$\tau_i = \tau_{уст.i} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{i-1} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (5.8)$$

где T — постоянная времени нагрева выбранного электродвигателя.

Расчеты, выполненные по уравнению (5.8) на всех участках за достаточно большой отрезок времени, позволяют выявить максимальное превышение температуры. Если это превышение окажется выше допустимого или значительно ниже его, следует взять двигатель соответственно большей или меньшей номинальной мощности и расчеты повторить. На рисунке 77 показаны превышение температуры в начале работы двигателя, кривая 1 по истечении времени работы $t = 3T$, кривая 2 и кривая 3 по истечении времени работы $t = 5T$, когда двигатель практически достигает установившегося теплового режима.

Учитывая большой объем работы по вычислению превышения температуры в конце каждого участка графика нагрузки за довольно продолжительный отрезок времени, расчеты по выявлению максимального нагрева производятся в электронной таблице MS EXCEL. Для этого в данную таблицу вводятся параметры нагрузочной диаграммы за расчетный период работы двигателя, выражения, позволяющие рассчитать среднюю и расчетную мощности (5.3) и (5.4), номинальные параметры выбранного по расчетной мощности двигателя: P_n , η_n , τ_n , и m , выражения для определения теплоемкости (4.2), теплоотдачи (4.3), постоянной времени нагрева (4.4), коэффициентов загрузки на отдельных участках нагрузочной диаграммы (5.5), установившегося превышения температуры на участках (5.6) и превышения температуры в конце каждого участка (5.8). Путем многократного копирования параметров нагрузочной диаграммы можно увели-

чить расчетное время до необходимой продолжительности, чтобы получить значения превышений температуры двигателя близкими к установившемуся. Если в результате расчетов возникнет необходимость выбора двигателя с другой номинальной мощностью, достаточно вместо прежних ввести номинальные параметры вновь выбранного двигателя.

После выбора номинальной мощности двигателя по условиям нагрева его необходимо проверить по условиям пуска в соответствии с выражением (5.2).

Метод средних потерь. Метод максимального нагрева позволяет непосредственно рассчитывать превышение температуры двигателя в период его наибольшего нагрева и поэтому является наиболее точным. Однако без применения вычислительной техники вычисления многих параметров за продолжительный отрезок времени сопряжены с большими трудностями и затратами времени.

Учитывая, что постоянная времени нагрева даже у двигателей малой мощности исчисляется десятками минут, а периоды изменения переменной нагрузки колеблются в пределах от нескольких секунд до десятых долей секунды, можно сделать заключение, что электродвигатели обладают большой тепловой инерцией, поэтому изменения температуры двигателя не успевают следовать за быстрыми изменениями нагрузки (кривая 3 на рис. 77), и при продолжительной работе двигателя превышение температуры можно считать установившимся, пропорциональным средним потерям мощности. Сущность метода заключается в том, что превышение температуры двигателя, определяемое средними потерями мощности за цикл, сравнивается с номинальным превышением. И, если выполняется условие $\Delta P_{cp} < \Delta P_n$, то среднее превышение температуры не превышает номинального, т.е. $\tau_{cp} \leq \tau_n$.

В том случае, если средние потери превышают номинальные, двигатель будет перегреваться и, наоборот, при $\Delta P_{cp} \ll P_n$ двигатель недоиспользуется по нагреву.

Порядок расчета мощности двигателя аналогичен предыдущему. Вначале производится замена реального графика нагрузки ступенчатой линией (рис. 78), затем рассчитываются по формулам (5.3) средняя и (5.4) расчетная мощность.

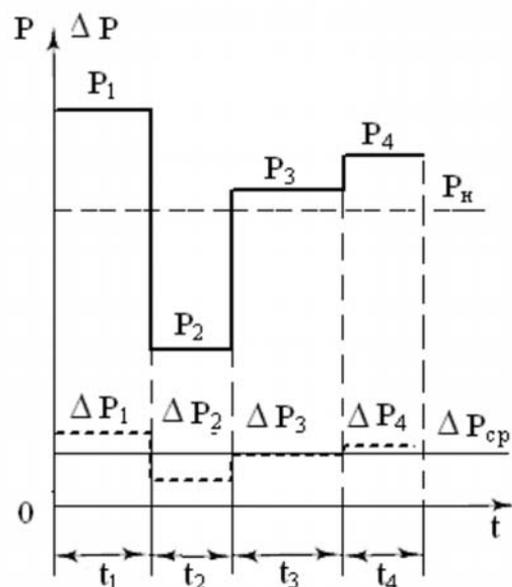


Рис. 78. График нагрузки на валу двигателя и потерь мощности

По расчетной мощности из каталога выбирается номинальная мощность двигателя и по формуле (5.5) рассчитываются коэффициенты загрузки на всех участках нагрузочной диаграммы. Согласно (4.3), потери мощности на участках графика нагрузки определяются из выражения:

$$\Delta P_i = \Delta P_n \frac{\alpha + x_i^2}{\alpha + 1},$$

а с учетом ухудшения охлаждения на участках работы с изменяющейся скоростью как:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j}, \quad (5.9)$$

где ΔP_i — потери мощности $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ при работе двигателя с нагрузками P_1, P_2, \dots, P_n в интервалах времени t_1, t_2, \dots, t_n ;
 $\beta_j t_j$ — интервалы времени с уменьшенной теплоотдачей.

Полученные по формуле (5.9) средние потери сравниваются с номинальными.

Ранее выбранный двигатель должен удовлетворять условию:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n. \quad (5.10)$$

Если средние потери превышают номинальные или окажутся на много меньше их, расчеты следует повторить для двигателей соответственно большей или меньшей мощности.

Выбранный двигатель проверяется по условиям пуска.

Метод эквивалентных величин. Метод средних потерь, основанный на сопоставлении потерь, позволяет достаточно точно рассчитывать мощность электродвигателей. Расчеты по вычислению коэффициентов загрузки, потерь мощности на участках, средних потерь являются довольно трудоемким. Метод эквивалентных величин позволяет непосредственно по данным нагрузочной диаграммы рассчитать требуемую мощность двигателя, не прибегая к вычислениям промежуточных величин.

Под эквивалентной мощностью понимают такую постоянную мощность нагрузки, при работе с которой потери в двигателе равны средним потерям при заданном графике нагрузки.

Этот метод может быть получен из метода средних потерь, если в формуле (5.9) общие потери на участках выразить через постоянные и переменные потери:

– потери мощности на участках графика нагрузки

$$\Delta P_i = \Delta P_c + \Delta P_{v,i} = \Delta P_c + I_i^2 R; \quad (5.11)$$

– потери средние

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_c + \Delta P_{v,cp} = \Delta P_c + I_s^2 R. \quad (5.12)$$

Здесь I_i — ток нагрузки на отдельных участках нагрузочной диаграммы;
 I_9 — постоянный по величине ток, при котором переменные потери в двигателе равны средним переменным потерям; этот ток принято называть эквивалентным током.

Для упрощения дальнейших выкладок выражения (5.11) и (5.12) преобразуем к виду:

$$\Delta P_i = \Delta P_c + I_i^2 R = \Delta P_c + I_i^2 R \frac{I_n^2}{I_n^2} = a + bx_i^2, \quad (5.13)$$

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_c + \Delta P_{v.cp} = \Delta P_c + I_9^2 R = a + bx_9^2, \quad (5.14)$$

где $a = \Delta P_c$, $b = \Delta P_{v.n}$, $x_i^2 = \frac{I_i^2}{I_n^2}$ и $x_9^2 = \frac{I_9^2}{I_n^2}$. (5.15)

Подставим в выражение (5.9) значения потерь из формул (5.13) и (5.14)

$$a + bx_9^2 = \frac{(a + bx_1^2)t_1 + (a + bx_2^2)t_2 + \dots + (a + bx_n^2)t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

После раскрытия скобок в числителе, группирования подобных членов и деления дробей, получим:

$$a + bx_9^2 = \frac{a(t_1 + t_2 + \dots + t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} + \frac{b(x_1^2 t_1 + x_2^2 t_2 + \dots + x_n^2 t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

Из этого выражения после соответствующих сокращений с учетом соотношений (5.15) находим величину эквивалентного тока:

$$I_9 = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (5.16)$$

При изменении скоростных режимов у самовентилируемых двигателей эквивалентный ток определится из выражения:

$$I_9 = \sqrt{\frac{\sum_1^n I_i^2 t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^j \beta_j t_j}}.$$

В общем случае при произвольной форме графика нагрузки, выраженного уравнением $i(t)$, эквивалентный ток определяется как:

$$I_9 = \sqrt{\left(\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} i^2(t) dt \right)}. \quad (5.17)$$

Чтобы добиться большей точности расчета эквивалентного тока, некоторые участки графика нагрузки целесообразно заменять не постоянными значениями токов, а трапецеидальными (участки t_1, t_3, t_5 на рис. 79).

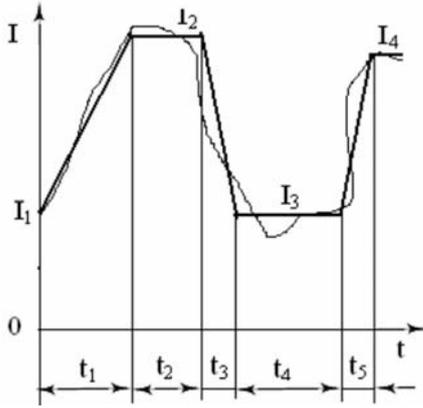


Рис. 79. Замена графика нагрузки ломаной линией

Для определения эквивалентного тока на 1-м участке воспользуемся выражением (5.17):

$$I_{\text{э1}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_1} i_1(t)^2 dt}{t_1}}. \quad (5.18)$$

Поскольку ток на первом участке находится в линейной зависимости от времени, можно записать:

$$I = I_1 + \frac{I_2 - I_1}{t_1} t. \quad (5.19)$$

Производная функции (5.19) по времени

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I_2 - I_1}{t_1},$$

откуда

$$dt = \frac{t_1}{I_2 - I_1} dI. \quad (5.20)$$

Подставляя значение дифференциала времени из (5.20) в выражение (5.18), получим

$$I_{\text{э1}} = \sqrt{\left(\frac{1}{t_1} \int_{I_1}^{I_2} I^2 \frac{t_1}{I_2 - I_1} dI \right)}. \quad (5.21)$$

Решением уравнения (5.21) является:

$$I_{\text{э1}} = \sqrt{\left(\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3} \right)}. \quad (5.22)$$

Если участок графика нагрузки выражен треугольником, например ток $I_1 = 0$, из формулы (5.22) следует, что

$$I_{\text{э1}} = \sqrt{\frac{I_2^2}{3}} = \frac{I_2}{\sqrt{3}}. \quad (5.23)$$

Выражения для определения эквивалентного тока (5.22) и (5.23) справедливы как для возрастающего во времени так и для убывающего тока.

Номинальная мощность электродвигателя выбирается по условию:

$$I_n \geq I_{\text{э1}}.$$

На практике часто нагрузочные диаграммы представляются зависимостями момента от времени. Учитывая, что при работе двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения, синхронных и

асинхронных двигателей магнитный поток практически не зависит от нагрузки, то, умножив левую и правую части выражения (5.16) на $c\Phi$, получим уравнение для определения эквивалентного момента:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (5.24)$$

При наличии участков в нагрузочной диаграмме с неполной теплоотдачей выражение для определения эквивалентного момента запишется как:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_i^2 t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^j t_j}}. \quad (5.25)$$

Выбор номинальной мощности двигателя в этом случае производится по условию: $M_n \geq M_{\text{э}}$.

Когда нагрузочная диаграмма электропривода и механизма задана графиком мощности, выбор двигателя по нагреву может быть произведен методом эквивалентной мощности. Однако этот метод применим лишь в тех случаях, когда существует прямая пропорциональность между моментом, развиваемым двигателем и его мощностью, т.е. при $\omega \approx \text{const}$. Следовательно, $P = cM$.

К двигателям с такими свойствами можно отнести двигатели с жесткими механическими характеристиками: асинхронные, синхронные и двигатели постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением, работающие с номинальным магнитным потоком.

Формулу для определения эквивалентной мощности при ступенчатом графике нагрузки получим, умножив обе части выражений (5.25) и (5.26) на номинальную угловую скорость, тогда

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (5.26)$$

Учитывая, что теплоотдача находится в линейной зависимости от угловой скорости, методом эквивалентной мощности можно воспользоваться и в случае переменной скорости, если привести мощность при угловой скорости ω_i к мощности при номинальной скорости через соотношение $P_{\text{пр.}i} = P_i \omega_n / \omega_i$.

В этом случае общее выражение для определения эквивалентной мощности запишется как:

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i^2 t_i + \sum_1^m P_j^2 \left(\frac{\omega_n}{\omega_j}\right)^2 t_j}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j}}. \quad (5.27)$$

Выражение (5.27) с учетом (5.21) наиболее полно отражает особенности графика нагрузки и скоростных режимов работы двигателя.

Номинальная мощность электродвигателя выбирается по условию:

$$P_n \geq P_\varepsilon.$$

Выбранный двигатель проверяется по условиям пуска.

Уравнения (5.16), (5.24) и (5.26) содержат параметры нагрузочных диаграмм механизма без учета влияния инерционных масс привода. При значительных инерционных массах и резких изменениях скоростных режимов следует учитывать изменения запаса кинетической энергии.

Рассмотренные методы позволяют производить расчет и проверку мощности двигателей продолжительного режима, работающих в режимах S7, S8 и подобных им, и в режимах S3, S4, S5 с учетом ограничений по скорости, магнитному потоку и моменту инерции.

Литература: [2, с. 209-223; 6, с. 230-234; 9, с. 214-221; 10, с. 370-376; 11, с. 64-72].

5.3. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при кратковременном режиме работы

В практике нередко возникают ситуации, когда двигатели продолжительного режима используются в кратковременном режиме.

Если при этом номинальную мощность двигателя принять равной мощности нагрузки, то в конце рабочего периода превышение его температуры будет ниже допустимого. Поэтому при выборе номинальной мощности двигателя продолжительного режима следует исходить из условия, чтобы за время его кратковременной работы превышение температуры достигало номинального (допустимого) значения. Для этого следует выбрать двигатель с номинальной мощностью меньше мощности нагрузки.

Если принять номинальную мощность двигателя равной мощности нагрузки, превышение его температуры будет изменяться по уравнению:

$$\tau = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (5.28)$$

где T — постоянная времени нагрева;

τ_n — номинальное превышение температуры двигателя, равное отношению номинальных потерь к теплоотдаче

$$\tau_n = \Delta P_n / A. \quad (5.29)$$

Как следует из графика (кривая 1 на рис. 80), в конце рабочего периода t_k превышение температуры двигателя ниже допустимого. Чтобы за это время превышение достигло допустимой величины, равной номинальной $\tau_{дон} = \tau_n$, двигатель следует перегружать, т.е. его номинальная мощность должна быть меньше мощности нагрузки. При работе двигателя с перегрузкой его нагрев будет происходить по кривой 2 (рис. 80), согласно уравнению

$$\tau = \tau_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

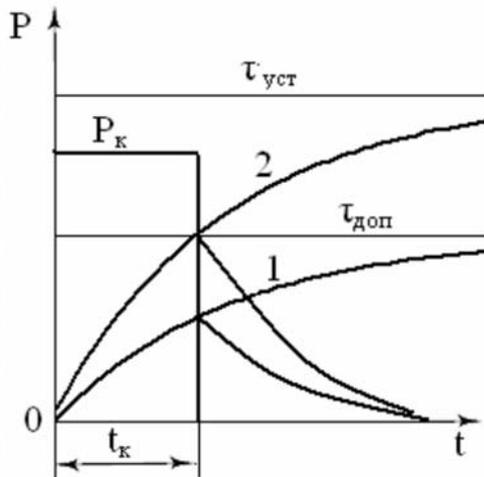


Рис. 80. График нагрева двигателя при кратковременном режиме работы

и к концу периода работы t_k превышение должно достигнуть номинального значения, т.е.

$$\tau_n = \tau_{уст} (1 - e^{-\frac{t_k}{T}}), \quad (5.30)$$

где $\tau_{уст}$ — установившееся превышение температуры, равное отношению потерь при работе двигателя с перегрузкой к теплоотдаче

$$\tau_{уст} = \Delta P_{к} / A. \quad (5.31)$$

Отношение потерь при работе с перегрузкой к номинальным потерям называется коэффициентом термической перегрузки

$$p_m = \frac{\Delta P_{к}}{\Delta P_{н}}, \quad (5.32)$$

который показывает во сколько раз потери в двигателе при перегрузке должны быть больше потерь номинальных, чтобы превышение температуры в конце рабочего периода достигло номинального значения.

Выразим из формулы (5.29) потери при номинальной нагрузке, а из формулы (5.31) при перегрузке, и подставим их в выражение (5.32). После сокращений найдем коэффициент термической перегрузки равным

$$p_m = \frac{\tau_{уст}}{\tau_n}.$$

Подставив сюда значение τ_n из выражения (5.30), окончательно получим

$$p_m = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T}}}.$$

По коэффициенту термической перегрузки можно найти коэффициент механической перегрузки, показывающий во сколько раз номинальная мощность двигателя должна быть меньше мощности нагрузки

$$p_m = \frac{\Delta P_{к}}{\Delta P_{н}} = \frac{\Delta P_{с} + \Delta P_{к}}{\Delta P_{с} + \Delta P_{вн}} = \frac{\Delta P_{с} + \Delta P_{вн} p_m^2}{\Delta P_{с} + \Delta P_{вн}} = \frac{\alpha + p_m^2}{\alpha + 1},$$

откуда

$$p_m = \sqrt{p_m (\alpha + 1) - \alpha}, \quad (5.33)$$

или

$$p_m = \sqrt{\frac{\alpha + 1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T}}} - \alpha},$$

где α — коэффициент потерь, $\alpha = \Delta P_{вн} / \Delta P_{с}$.

Пренебрегая постоянными потерями в выражении (5.33), можно записать:

$$P_m = \sqrt{P_m}.$$

Если в рабочий период нагрузка меняется, то вначале необходимо рассчитать эквивалентную мощность за время t_k .

Номинальная мощность двигателя по нагреву рассчитывается как:

$$P_n \geq P_k / p_m.$$

Выбранный двигатель проверяется по перегрузочной способности и по условиям пуска:

$$P_n \geq P_k / k_\partial \quad \text{и} \quad k_u^2 M_n \geq M_c + 0,25 M_n, \quad (5.34)$$

где k_∂ — перегрузочная способность двигателя;

M_n — пусковой момент двигателя при номинальном напряжении.

Перегрузочная способность принимается для двигателей постоянного тока, асинхронных с фазным ротором и синхронных $k_\partial = 2,0 \dots 2,5$, для асинхронных с короткозамкнутым ротором $k_\partial = 1,7 \dots 2,2$.

Для работы в кратковременном режиме рекомендуется применять короткозамкнутые двигатели с повышенным пусковым моментом.

Двигатели продолжительного режима в кратковременном режиме обычно работают с большими механическими перегрузками и редко достигают допустимого нагрева, так как их мощность в большинстве случаев определяется условиями пуска или перегрузочной способностью. Работа двигателей с механическими перегрузками сопровождается протеканием повышенных токов в обмотках, вследствие чего переменные потери превышают постоянные, в то время как коэффициент полезного действия имеет максимальное значение при $\Delta P_v = \Delta P_c$. Следовательно, двигатель будет работать при пониженном к.п.д. В связи с этим, для работы в кратковременном режиме предпочтительнее использовать специальные двигатели кратковременного номинального режима, у которых учтены недостатки двигателей продолжительного режима. Фактическая продолжительность кратковременной работы t_k реальных графиков нагрузки не всегда совпадает с расчетными, на которые выпускаются двигатели кратковременного режима. В этом случае для определения номинальной мощности двигателя кратковременного режима $P_{к.н}$ с расчетной продолжительностью работы $t_{к.н}$ мощность нагрузки P_k должна быть приведена (пересчитана) к мощности с расчетной продолжительностью. Обычно мощность нагрузки приводится к мощности с ближайшей большей продолжительностью работы. В основе приведения мощностей лежит равенство превышения температур в конце периода работы $\tau_{дон}$:

$$\tau_{дон} = \frac{\Delta P_k}{A} (1 - e^{-\frac{t_k}{T}}) = \frac{\Delta P_{к.н}}{A} (1 - e^{-\frac{t_{к.н}}{T}}), \quad (5.35)$$

где ΔP_{κ} — потери в двигателе при кратковременной нагрузке, отличной от номинальной;

$\Delta P_{\kappa.н}$ — потери при работе с номинальной нагрузкой;

T — постоянная времени нагрева;

$t_{\kappa.н}$ — расчетное время работы в кратковременном режиме;

t_{κ} — время работы по графику нагрузки.

Потери мощности при работе двигателя с нестандартной продолжительностью работы в формуле (5.35) выразим через потери при стандартной продолжительности и коэффициент механической загрузки

$$\Delta P_{\kappa} = \Delta P_{\kappa.н} \frac{\alpha + p_m^2}{\alpha + 1}. \quad (5.36)$$

Это значение ΔP_{κ} подставим в выражение (5.35) и после сокращения общих множителей получим:

$$\frac{\alpha + p_m^2}{\alpha + 1} = (1 - e^{-t_{\kappa}/T}) = 1 - e^{-t_{\kappa.н}/T}, \quad (5.37)$$

где p_m — коэффициент механической перегрузки, $p_m = P_{\kappa} / P_{\kappa.н}$.

Из (5.37) находим коэффициент механической перегрузки

$$p_m = \sqrt{(\alpha + 1) \frac{1 - e^{-t_{\kappa.н}/T}}{1 - e^{-t_{\kappa}/T}} - \alpha}.$$

Приведенную мощность нагрузки к стандартной продолжительности кратковременной работы находим как:

$$P_{\kappa.н} = \frac{P_{\kappa}}{p_m} = \frac{P_{\kappa}}{\sqrt{(\alpha + 1) \frac{1 - e^{-t_{\kappa.н}/T}}{1 - e^{-t_{\kappa}/T}} - \alpha}}. \quad (5.38)$$

Для упрощенных расчетов можно без большой погрешности применить более простые соотношения, основанные на равенстве потерь энергии при работе с заданными параметрами по графику нагрузки и при работе с номинальной мощностью и расчетной продолжительностью:

$$(\Delta P_c + \Delta P_{\text{вн}}) t_p = (\Delta P_c + \Delta P_{\text{вн}} p_m^2) t_{\kappa}. \quad (5.39)$$

Решением выражения (5.39) относительно p_m является:

$$p_m = \sqrt{(\alpha + 1) \frac{t_p}{t_{\kappa}} - \alpha},$$

откуда номинальная мощность двигателя с расчетной продолжительностью работы

$$P_{н} = \frac{P_{\kappa}}{\sqrt{(\alpha + 1) \frac{t_p}{t_{\kappa}} - \alpha}}. \quad (5.40)$$

Расхождение полученных результатов по выражениям (5.38) и (5.40) не превышает 10%.

Литература: [2, с. 223-230; 6, с. 235-236; 9, с. 221-223; 10, с. 377-380].

5.4. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при повторно-кратковременном режиме работы (S3)

Повторно-кратковременный режим работы двигателей характеризуется тем, что в нем периоды работы чередуются с периодами пауз, а отношение времени работы к времени цикла называется относительной продолжительностью включения. В реальных условиях не всегда удается получить такие графики с правильным чередованием рабочих периодов и остановок как показано на рисунке 81.

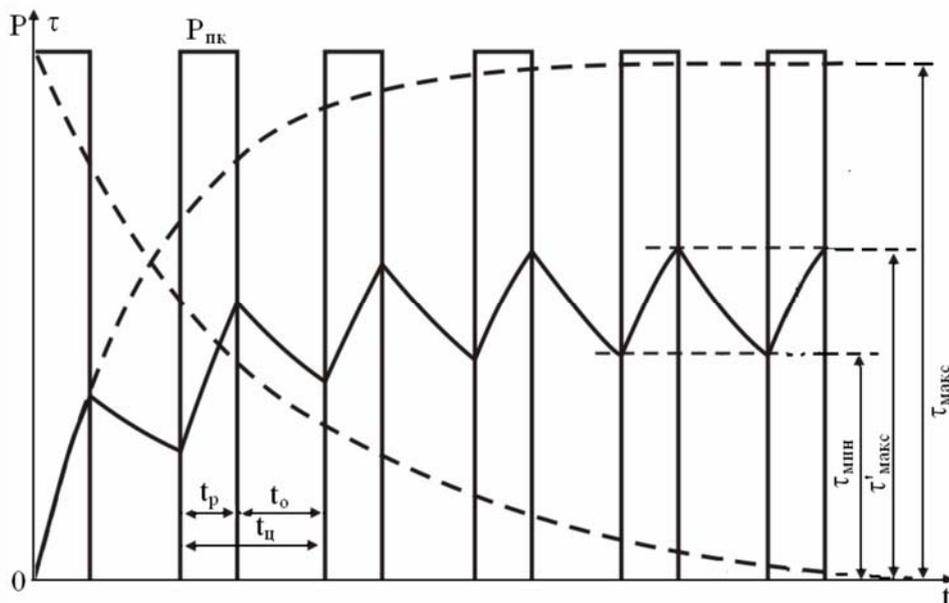


Рис. 81. График нагрузки и изменения температуры при повторно-кратковременном режиме работы

Поэтому в действительности относительную продолжительность ε приходится определять не из одного цикла, а за более продолжительный отрезок времени. Рабочие периоды графика нагрузки могут включать в себя участки работы различной продолжительности, с различными угловыми скоростями, паузы, участки пуска и электрического торможения. Такой график следует вначале привести к одноступенчатому, в котором мощность за рабочий период, время работы и время пауз определяются как эквивалентные:

— эквивалентная мощность:

$$P_3 = \sqrt{\frac{\sum_1^m (P_i \omega_n / \omega_i)^2 t_{pi}}{\sum_1^m \beta_i t_i}};$$

– эквивалентное время рабочего периода:

$$t_{p.э} = \frac{\sum_1^m t_{p.i}}{m};$$

– эквивалентное время пауз:

$$t_{o.э} = \frac{\sum_1^n t_{o.j}}{n};$$

– эквивалентная относительная продолжительность включения:

$$\varepsilon = \frac{t_{p.э}}{t_{p.э} + t_{o.э}},$$

где m — число рабочих участков;

n — число пауз в цикле.

В повторно-кратковременном режиме S3 могут использоваться двигатели продолжительного режима и специальные, рассчитанные для работы в этом режиме. Выбор мощности двигателя, как и ранее, основан на том, что в процессе работы его температура не должна превышать допустимой.

Если двигатель, рассчитанный для продолжительного режима, работает с постоянной нагрузкой $P_{нк}$ (рис. 81), потери мощности у него будут постоянными, и превышение температуры по истечении времени $t = \infty$ достигнет установившегося значения $\tau_{макс}$.

При работе этого двигателя в повторно-кратковременном режиме с той же нагрузкой превышение температуры, меняясь по отрезкам экспоненциальной кривой, не успевает достигнуть установившегося значения как в рабочий период, так и в течение паузы. Для достаточно удаленного от начала цикла наступает установившийся температурный режим, когда колебания превышения температуры происходят в пределах от $\tau'_{макс}$ до $\tau_{мин}$. При правильно выбранном двигателе продолжительного режима превышение температуры $\tau'_{макс}$ не должно превышать допустимого. Для того, чтобы двигатель достиг установившегося превышения температуры $\tau'_{макс}$, работая в продолжительном режиме, его нагрузка $P_{дл}$ должна быть меньше нагрузки $P_{нк}$. Это объясняется тем, что при повторно-кратковременном режиме в период пауз двигатель отдает часть тепла в охлаждающую среду.

Максимальное превышение температуры в конце рабочего отрезка времени можно записать как:

$$\tau'_{макс} = \tau_{макс} \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right) + \tau_{мин} e^{-\frac{t_p}{T}}. \quad (5.41)$$

Минимальное превышение в конце паузы:

$$\tau_{мин} = \tau'_{макс} e^{-\frac{t_o}{T_o}}. \quad (5.42)$$

После подстановки значения $\tau_{мин}$ из формулы (5.42) в выражение (5.41) находим максимальное превышение температуры в конце рабочего времени

$$\tau'_{макс} = \tau_{макс} \frac{1 - e^{-t_p/T}}{1 - e^{-\left(\frac{t_p}{T} + \frac{t_o}{T_o}\right)}}, \quad (5.43)$$

где T — постоянная времени нагрева в период работы двигателя;
 T_o — постоянная времени охлаждения в период паузы.

Выражение (5.43) показывает, что максимальное превышение температуры двигателя при повторно-кратковременном режиме $\tau'_{макс}$ меньше, чем превышение температуры $\tau_{макс}$ при работе с такой же по величине постоянной нагрузкой в продолжительном режиме. По аналогии с формулой (5.32), можно определить коэффициент термической перегрузки, который показывает во сколько раз потери мощности в рабочий период повторно-кратковременного режима должны превышать потери при продолжительной нагрузке, чтобы превышение достигло $\tau'_{макс}$:

$$p_m = \frac{\Delta P_{нк}}{\Delta P_{дл}} = \frac{\tau_{макс}}{\tau'_{макс}} = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_p}{T} + \frac{t_o}{T_o}\right)}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}, \quad (5.44)$$

где $\Delta P_{нк}$ — потери при работе двигателя с нагрузкой $P_{нк}$;
 $\Delta P_{дл}$ — потери при работе с постоянной нагрузкой $P_{дл}$.

Из выражения (5.44) следует, что если $t_o \rightarrow \infty$, то повторно-кратковременный режим переходит в кратковременный, и коэффициент термической перегрузки повторно-кратковременного режима будет равен коэффициенту термической перегрузки кратковременного режима.

Переменные потери при нагрузке повторно-кратковременного режима можно выразить через переменные потери продолжительного режима и коэффициент механической перегрузки как:

$$\Delta P_{нк} = \Delta P_c + \Delta P_v = \Delta P_c + \Delta P_{v,дл} p_m^2, \quad (5.45)$$

где p_m — коэффициент механической перегрузки, равный

$$p_m = \frac{P_{нк}}{P_{дл}}.$$

Подставляя выражения (5.45) в (5.44) получим

$$p_m = \frac{\Delta P_c + \Delta P_{v,дл} p_m^2}{\Delta P_c + \Delta P_{v,дл}} = \frac{\alpha + p_m^2}{\alpha + 1}. \quad (5.46)$$

Из выражений (5.44) и (5.46) можно записать

$$\frac{\alpha + p_m^2}{\alpha + 1} = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_p + t_o}{T + T_o}\right)}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}.$$

Отсюда коэффициент механической перегрузки:

$$p_m = \sqrt{\frac{1 - e^{-\left(\frac{t_p + t_o}{T + T_o}\right)}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} (\alpha + 1) - \alpha}. \quad (5.47)$$

Определив по данным графика нагрузки коэффициент механической перегрузки, находим расчетную мощность двигателя продолжительного режима

$$P_{дл} = \frac{P_{нк}}{p_m}$$

и затем номинальную мощность как $P_n \geq P_{дл}$.

Для повторно-кратковременного режима работы целесообразно применять специальные двигатели (двигатели с повышенным скольжением), обладающие значительной перегрузочной способностью и повышенным пусковым моментом, что позволяет максимально использовать их по нагреву. За счет увеличения постоянных потерь коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке у этих двигателей выше, чем у двигателей длительного режима, работающих с механическими перегрузками в повторно-кратковременном режиме. Такие двигатели выпускаются с нормированной мощностью при нормированной продолжительности включения 15; 25; 40 и 60% и длительностью цикла 10 мин. При длительности цикла, превышающей нормированную, расчет и выбор мощности двигателя ведется как для продолжительного режима с переменной нагрузкой. Двигатели, с меньшими относительными продолжительностями включения не рекомендуется использовать при больших значениях продолжительности и тем более в продолжительном режиме, так как из-за больших постоянных потерь они могут перегреваться даже на холостом ходу.

Выбор номинальной мощности специальных двигателей ведется, исходя из параметров графика нагрузки. Если реальная продолжительность включения совпадает с нормированной, то номинальная мощность двигателя берется равной мощности нагрузки или ближайшей большей при той же продолжительности включения. В противном случае мощность нагрузки необходимо привести к нормированной продолжительности включения и по ней выбрать номинальную мощность двигателя. За основу приведения мощности принимается равенство потерь энергии за один цикл при мощности нагрузки и фактической продолжительности включения и при нормированной продолжительности и номинальной мощности, то есть

$$\Delta P_x t_x = \Delta P_n t_n.$$

Найдем средние потери мощности за цикл, разделив обе части этого равенства на время цикла, и выразим потери через постоянные и переменные

$$(\Delta P_c + \Delta P_{v.n}) \frac{t_n}{t_{ц}} = (\Delta P_c + \Delta P_{v.n} x^2) \frac{t_x}{t_{ц}}$$

или
$$(\Delta P_c + \Delta P_{v.n}) \varepsilon_n = (\Delta P_c + \Delta P_{v.n} x^2) \varepsilon_x. \quad (5.48)$$

где ΔP_x — потери мощности при работе с нагрузкой по графику;

ΔP_n — потери мощности при номинальной нагрузке;

t_x и t_n — продолжительность рабочего периода по графику и нормированная соответственно;

ε_n — нормированная относительная продолжительность включения;

ε_x — продолжительность включения по графику нагрузки;

x — перегрузочная способность двигателя, определяемая как отношение мощности нагрузки при фактической продолжительности включения P_x к номинальной мощности P_n при нормированной продолжительности, т.е.

$$x = \frac{P_x}{P_n}.$$

Решая выражение (5.48) относительно x , получим:

$$x = \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_x} (\alpha + 1) - \alpha}, \quad (5.49)$$

где α — коэффициент потерь.

Подставляя в выражение (5.49) значение x , как отношение P_x/P_n , находим приведенную к нормированной продолжительности включения мощность нагрузки

$$P_n = \frac{P_x}{\sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_x} (\alpha + 1) - \alpha}}. \quad (5.50)$$

Из формулы (5.50) можно определить допустимую по нагреву мощность двигателя с номинальной мощностью P_n при заданной продолжительностью включения:

$$P_x = P_n \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_x} (\alpha + 1) - \alpha}. \quad (5.51)$$

Из уравнения (5.49) видно, что при $\varepsilon_n > \varepsilon_x$ с ростом коэффициента потерь α растет перегрузочная способность двигателя, и по условиям нагрева при данной мощности нагрузки P_x требуется меньшая номинальная мощность P_n . Однако при некотором соотношении ε_x и ε_n подкоренное выражение в формуле (5.51) обращается в нуль и даже приобретает отрицательный знак. В этих случаях электродвигатель может перегреваться только за счет постоянных потерь, работая вхолостую.

Если в формуле (5.50) пренебречь постоянными потерями, формула упрощается и тогда

$$P_n = P_x \sqrt{\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_n}}. \quad (5.52)$$

Выражение (5.52) позволяет определить допустимую нагрузку двигателя продолжительного режима при работе в повторно-кратковременном режиме с различными значениями *ПВ*:

– при работе с нормированными *ПВ*:

$$P_{15} = P_n \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{15}}} = P_n \sqrt{\frac{1}{0,15}} = 2,58P_n; \quad P_{25} = P_n \sqrt{\frac{1}{0,25}} = 2P_n;$$

$$P_{40} = P_n \sqrt{\frac{1}{0,4}} = 1,58P_n; \quad P_{60} = P_n \sqrt{\frac{1}{0,6}} = 1,29P_n;$$

– при ненормированных *ПВ*:

$$P_x = P_n \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_x}}.$$

Учитывая существенное влияние постоянных потерь на нагрев двигателей с повышенным скольжением, в некоторых случаях двигатели с меньшей нормированной продолжительностью могут работать при большей продолжительности, однако крановые двигатели ставить на работу в продолжительном режиме не рекомендуется.

5.5. Выбор мощности двигателей и расчет оптимальных размеров инерционных масс при ударных нагрузках

Ударными считаются такие нагрузки, при которых момент сопротивления рабочей машины периодически изменяется от минимального до максимального за короткий промежуток времени. Примерный график ударной нагрузки представлен на рисунке 82. Такими или подобными графиками нагрузки обладают поперечно-строгальные станки, машины для рубки металлов, дыропробивные машины, прессы для штамповки деталей, поршневые гидравлические насосы и т.п. Для агрегатов с ударной нагрузкой в большинстве случаев применяются электроприводы, в передаточном звене которых предусматривается установка маховиков, способных запасать кинетическую энергию, которая при изменении скорости создает положительный или отрицательный динамический момент, сглаживая удары нагрузки на валу электродвигателя. При резком возрастании нагрузки (начало участка t_l на рис. 82) момент сопротивления рабочей машины M_{cl} больше момента двигателя, поэтому происходит снижение угловой скорости. Преодоление нагрузки происходит как за счет развиваемого двигателем момента $M_{об}$, так и за счет

динамического момента $M_{дин}$. На участке t_2 момент, развиваемый двигателем, больше момента сопротивления рабочей машины, поэтому часть его идет на преодоление динамического момента, связанного с увеличением запаса кинетической энергии в инерционных массах.

Применение маховикового электропривода влечет за собой увеличение затрат, массы агрегата, времени и потерь электроэнергии при пуске и торможении. Однако отсутствие маховиков и недостаток инерционных масс в таких приводах, как правило, ведет к увеличению номинальной мощности электродвигателя, значительным колебаниям частоты вращения, может сказаться на режиме работы сети и источника электроэнергии, в результате чего возникают изменения напряжения, отрицательно сказывающиеся на работе других потребителей. Поэтому определение параметров маховиковых электроприводов должно выполняться в строгом соответствии с технико-экономическими расчетами.

За основу расчетов оптимальных размеров инерционных масс в таком электроприводе принимается график нагрузки рабочего органа и его параметры: M_{c1} , M_{c2} , t_1 и t_2 .

Вначале определяется расчетная мощность электродвигателя по условиям нагрева

$$P_{рас} = M_{эк} \omega_n, \quad (5.51)$$

где $M_{эк}$ — эквивалентный момент нагрузки;
 ω_n — номинальная угловая скорость электродвигателя.

Эквивалентный момент в выражении (5.51)

$$M_{эк} = \sqrt{\frac{M_{c1}^2 t_1 + M_{c2}^2 t_2}{t_1 + t_2}}, \quad (5.52)$$

где M_{c1} и M_{c2} — моменты сопротивления рабочей машины, приведенные к валу двигателя.

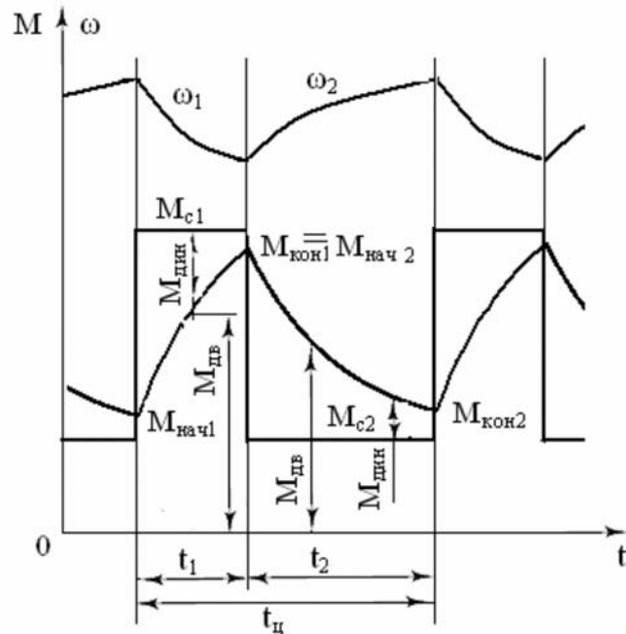


Рис. 82. Нагрузочные диаграммы рабочей машины и электродвигателя при ударной нагрузке

По расчетной мощности выбираем номинальную мощность электродвигателя

$$P_n \geq P_{рас} \quad (5.53)$$

и необходимые для дальнейших расчетов данные: номинальную мощность, частоту вращения, скольжение, к.п.д., кратности пускового и максимального моментов, момент инерции J .

При расчете приведенного момента инерции агрегата исходными являются параметры электродвигателя и требования технологического процесса: перегрузочная способность двигателя, пределы колебания момента, развиваемого двигателем, броски тока, влияющие на работу других потребителей, допустимые пределы изменения угловой скорости т.п.

Наиболее типичной задачей является расчет момента инерции агрегата, обеспечивающего преодоление электродвигателем пиков нагрузки. Для этого в конце пика нагрузки при $t = t_l$ момент двигателя не должен превышать допустимого значения:

$$M_{дон} = M_n \lambda, \quad (5.54)$$

где λ — коэффициент допустимой перегрузки двигателя.

С учетом возможных отклонений напряжения коэффициент допустимой перегрузки принимают

$$\lambda = (0,8 \dots 0,9) \mu_k.$$

Для определения момента инерции, обеспечивающего допустимую перегрузочную способность двигателя, воспользуемся уравнением переходного процесса (3.34) на первом участке графика нагрузки

$$M = M_{c1}(1 - e^{-t/B}) + M_{нач1}e^{-t/B}. \quad (5.55)$$

Тогда при $t = t_l$

$$M_{кон1} = M_{c1}(1 - e^{-t_l/B}) + M_{нач1}e^{-t_l/B} \quad (5.56)$$

и по условию задачи этот момент должен равняться допустимому т.е.

$$M_{кон1} = M_{дон}.$$

Для выполнения этого условия система должна обладать соответствующей инерционностью, которая в выражении (5.56) определяется электромеханической постоянной B . Решая это выражение относительно B , находим:

$$B = \frac{t_l}{\ln \frac{M_{c1} - M_{нач1}}{M_{c1} - M_{кон1}}}. \quad (5.57)$$

Здесь кроме B неизвестным является также момент электродвигателя в начале 1-го участка $M_{нач1}$. Поэтому для начала им следует задаться, приняв

$$M_{нач1} = 1,1 \dots 1,3 M_{c2}, \quad (5.58)$$

и из формулы (5.57) определить предварительное значение B . Однако это значение постоянной не окончательное, поскольку оно найдено при произвольно принятой величине $M_{нач1}$. Далее задача решается методом последовательных приближений.

Следует принять во внимание, что при достаточно продолжительной работе агрегата изменения моментов двигателя происходят в одних и тех же пределах (см. рис. 82). Поэтому момент, развиваемый двигателем в начале каждого цикла, равен моменту, развиваемому в конце цикла, т.е. $M_{кон1} = M_{нач2}$ и $M_{кон2} = M_{нач1}$.

На этом основании начальный момент $M_{нач1}$ можно найти из уравнения переходного процесса на втором участке графика нагрузки (3.34), как:

$$M_{кон2} = M_{c2}(1 - e^{-t_2/B}) + M_{нач2}e^{-t_2/B}. \quad (5.59)$$

Подставив $M_{кон2}$ в формулу (5.57) вместо $M_{нач1}$, вычисляем новое значение B :

$$B = \frac{t_1}{\ln \frac{M_{c1} - M_{кон2}}{M_{c1} - M_{кон1}}}. \quad (5.60)$$

При этой постоянной времени по формуле (5.59) вновь определяется момент двигателя в конце второго участка. Если этот момент отличается от ранее принятого по условию (5.58) не более, чем на 10%, расчет можно считать законченным, а найденное по формуле (5.60) значение постоянной времени принимается как окончательное. В противном случае необходимо расчетный цикл повторить.

В тех случаях, когда требуется ограничить броски тока, необходимый момент инерции агрегата для двигателей с прямолинейной механической характеристикой можно рассчитывать по той же методике. Воспользовавшись пропорциональной зависимостью между токами и моментами этих двигателей, входящие в выражение (5.60) моменты выражаются через соответствующие токи и постоянная времени определяется как:

$$B = \frac{t_1}{\ln \frac{I_{c1} - I_{нач1}}{I_{c1} - I_{дон}}}.$$

В ряде случаев технологический процесс может предъявлять довольно жесткие требования к скоростному режиму, при котором должна обеспечиваться определенная степень неравномерности угловой скорости. Выполнение этого требования при заданных параметрах графика нагрузки обеспечивается за счет соответствующих инерционных масс. При решении задачи по расчету этих масс обычно известны средняя скорость ω_{cp} и степень неравномерности угловой скорости δ . По этим данным определяются начальная и конечная угловые скорости на одном из участков графика нагрузки.

Как известно степень неравномерности изменения угловой скорости определяется выражением:

$$\delta = \frac{\omega_{нач} - \omega_{кон}}{\omega_{ср}}, \quad (5.61)$$

где $\omega_{нач}$ и $\omega_{кон}$ — соответственно начальная и конечная угловые скорости на первом участке графика нагрузки (см. рис. 82).

Средняя угловая скорость

$$\omega_{ср} = \frac{\omega_{нач} + \omega_{кон}}{2}. \quad (5.62)$$

Из выражений (5.61) и (5.62) находим

$$\omega_{кон} = \omega_{нач} - \delta\omega_{ср} \quad \text{и} \quad \omega_{нач} = \omega_{кон} + \delta\omega_{ср}.$$

Из совместного решения этих выражений после несложных преобразований находим начальную и конечную скорости

$$\omega_{нач} = \frac{2 + \delta}{2} \omega_{ср} \quad \text{и} \quad \omega_{кон} = \frac{2 - \delta}{2} \omega_{ср} \quad \text{и скольжения}$$

$$s_{нач} = \frac{\omega_o - \omega_{нач}}{\omega_o} \quad \text{и} \quad s_{кон} = \frac{\omega_o - \omega_{кон}}{\omega_o}.$$

Пользуясь пропорциональной зависимостью между моментами двигателей с линейными механическими характеристиками и скольжениями, находим соответствующие значения моментов

$$M_{нач} = \frac{M_n}{s_n} s_{нач} \quad \text{и} \quad M_{кон} = \frac{M_n}{s_n} s_{кон}.$$

Электромеханическая постоянная времени агрегата для этого случая определяется из выражения (5.60) после подстановки в него значений $M_{нач}$ и $M_{кон}$.

Определив электромеханическую постоянную времени агрегата, находим его момент инерции

$$J_{аг} = \frac{B M_n}{\omega_o s_n}.$$

Приведенный момент инерции маховика, устанавливаемого дополнительно к имеющимся инерционным массам двигателя и рабочей машины, определится простым вычитанием

$$J_{мах} = J_{аг} - (J_{дв} + J_{маш}).$$

Как видно из рисунка 82, нагрузочная диаграмма на валу двигателя маховикового привода, благодаря работе инерционных масс, значительно отличается от нагрузочной диаграммы рабочей машины. В этом случае выбранный ранее электродвигатель может оказаться недоиспользованным в тепловом отношении, поэтому его мощность необходимо проверить по нагрузочной диаграмме:

$$M_{э.д} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \left(\int_0^{t_1} M_{д1}^2(t) dt + \int_0^{t_2} M_{д2}^2(t) dt \right)}. \quad (5.63)$$

Здесь $M_{д1}(t)$ и $M_{д2}(t)$ — уравнения момента двигателя соответственно на первом и втором участках нагрузочной диаграммы типа уравнений (5.55), в которых значения элетромеханической постоянной времени определены по выражению (5.60).

По эквивалентному моменту (5.63) определяется новая расчетная мощность двигателя и, в случае ее значительного отличия от мощности ранее выбранного двигателя, весь расчет необходимо повторить.

Литература: [2, с. 230-239; 6, с. 236-240; 7, с. 294-295; 10, с. 380-385].

ГЛАВА 6. ЭНЕРГЕТИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Работа большинства электрифицированных машин происходит в условиях переменных нагрузок, регулирования скорости, пуска, торможения, реверсирования. Все эти нестационарные режимы приводят к изменению скорости, запаса кинетической энергии в подвижных частях агрегата, тока в обмотках двигателя и величины переменных потерь. Постоянные потери, связанные с изменением магнитного потока, и потери на трение в подшипниках в переходных процессах изменяются незначительно и в рассматриваемом анализе не учитываются. Переходные процессы, как правило, протекают при повышенных токах, что приводит к увеличению переменных потерь, влияющих на общий расход электрической энергии, и вызывающих повышенный нагрев электродвигателей. Поэтому анализ факторов, определяющий величину потерь энергии при переходных процессах, представляется весьма важным. Рассмотрим методы расчета потерь энергии в наиболее типичных переходных режимах двигателей постоянного и переменного тока.

6.1. Расчет потерь энергии в переходных режимах двигателей постоянного тока независимого возбуждения при работе без нагрузки

Если уравнение баланса напряжений якорной цепи умножить на ток якоря, получим уравнение баланса мощностей

$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 r_{\text{я}}, \quad (6.1)$$

где U и E — напряжение сети и э.д.с. якоря;

$I_{\text{я}}$ и $r_{\text{я}}$ — ток якоря и сопротивление якорной цепи. Предполагается, что сопротивление якорной цепи включает сопротивление обмотки якоря и добавочные сопротивления, если такие имеются;

$UI_{\text{я}}$ — мощность, подведенная к якорю из сети;

$EI_{\text{я}}$ — мощность, преобразуемая двигателем в механическую;

$I_{\text{я}}^2 r_{\text{я}}$ — потери мощности в сопротивлениях якорной цепи.

Энергия, подведенная к двигателю из сети за время переходного процесса, определится из выражения:

$$A_c = \int_{t_1}^{t_2} UI_{\text{я}} dt. \quad (6.2)$$

Энергия, преобразуемая в механическую

$$A_{\text{мех}} = \int_{t_1}^{t_2} EI_{\text{я}} dt. \quad (6.3)$$

Здесь t_1 и t_2 — время начала и окончания переходного процесса.

Потери энергии в двигателе (электрические потери) найдем как разность энергии, подведенной из сети и преобразованной в механическую

$$\Delta A_{эл} = A_c - A_{мех}.$$

Напряжение в формуле (6.2) выразим через магнитный поток и угловую скорость идеального холостого хода:

$$U = c\Phi\omega_o. \quad (6.4)$$

Ток якоря найдем из формулы электромагнитного момента:

$$M_o = c\Phi I_{я}. \quad (6.5)$$

С другой стороны, момент, развиваемый двигателем при $M_c = 0$, как следует из уравнения движения, равен динамическому

$$M_o = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (6.6)$$

Приравняв между собою правые части выражений (6.5) и (6.6), найдем ток якоря:

$$I_{я} = \frac{J}{c\Phi} \frac{d\omega}{dt}. \quad (6.7)$$

В уравнение (6.2) введем значения напряжения из (6.4) и тока из (6.7). После небольших преобразований получим:

$$A_c = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J\omega_o d\omega. \quad (6.8)$$

Поскольку после подстановки значений напряжения и тока в (6.2) интегрирование ведется по угловой скорости, пределы интегрирования по времени заменяются соответствующими пределами по скорости.

Решением интеграла (6.8) является

$$A_c = J\omega_o(\omega_2 - \omega_1).$$

Энергию, преобразуемую в механическую, определим путем решения интеграла (6.3), выразив э.д.с. якоря через угловую скорость $E = c\Phi\omega$ и ток якоря из формулы (6.7), тогда после преобразований получим:

$$A_{мех} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J\omega d\omega.$$

Решением этого интеграла является:

$$A_{мех} = J \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}.$$

Путем вычитания из энергии, подведенной к якорю, механической энергии определяем электрические потери

$$\Delta A_{эл} = A_c - A_{мех} = J[\omega_o(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}]. \quad (6.9)$$

В качестве иллюстрации рассмотрим расчет потерь энергии при некоторых переходных процессах.

Потери энергии при разбеге двигателя от начальной скорости $\omega_1 = 0$ до конечной $\omega_2 = \omega_o$. В виду большой жесткости механических характеристик рассматриваемых двигателей скорость холостого хода без большой погрешности можно принимать равной скорости идеального холостого хода, то есть $\omega_{хх} \approx \omega_o$:

- энергия, подведенная из сети: $A_c = J\omega_o^2$;
- механическая энергия: $A_{мех} = J\frac{\omega_o^2}{2}$;
- электрические потери энергии: $\Delta A_{эл} = J\frac{\omega_o^2}{2}$.

Из этих соотношений видно, что при пуске ДПТ без нагрузки половина подведенной из сети энергии преобразуется в кинетическую. Вторая половина составляет потери в якорной цепи.

Потери энергии при динамическом торможении от начальной скорости $\omega_1 = \omega_o$ до конечной $\omega_2 = 0$. Согласно выражению (6.9),

$$\Delta A_{эл} = A_c - A_{мех} = -J\frac{\omega_o^2}{2}.$$

Здесь знак минус означает, что двигатель работает в режиме генератора.

Потери энергии при торможении противовключением путем реверсирования вычисляются при начальной скорости $\omega_{нач} = -\omega_o$, и конечной, равной 0. Подставляя эти значения скорости в выражении (6.9), получим:

$$\Delta A_{эл} = 3J\frac{\omega_o^2}{2}.$$

Отсюда следует, что при торможении противовключением электрические потери в якорной цепи втрое превышают потери при динамическом торможении.

6.2. Расчет потерь энергии в переходных режимах двигателей постоянного тока независимого возбуждения при работе с постоянной нагрузкой

При работе двигателя с постоянной нагрузкой ($M_c = const$) баланс мощностей, выраженный уравнением (6.1), сохраняется. Потребляемая из сети энергия и энергия, преобразуемая в механическую, рассчитываются по тем же уравнениям (6.2) и (6.3) соответственно. Однако момент двигателя в этом случае определяется из уравнения движения как

$$M_o = J \frac{d\omega}{dt} + M_c.$$

Подставляя это значение момента двигателя в выражение (6.5), находим ток якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{1}{c\Phi} \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_c \right). \quad (6.10)$$

Подведенную к якорю двигателя энергию из сети за время переходного процесса с учетом (6.4) и (6.10) получим

$$A_c = \omega_o \int_{t_1}^{t_2} UI_{\text{я}} dt = \omega_o \int_{t_1}^{t_2} \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_c \right) dt$$

или

$$A_c = J \omega_o \int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega + M_c \omega_o \int_{t_1}^{t_2} dt.$$

Решением интеграла является

$$A_c = J \omega_o (\omega_2 - \omega_1) + M_c \omega_o (t_2 - t_1). \quad (6.11)$$

Энергия, преобразуемая в механическую, определяется путем решения уравнения (6.3) после подстановки в него значений тока из формулы (6.10) и э.д.с. $E = c\Phi\omega$:

$$A_{\text{мех}} = \int_{t_1}^{t_2} \omega \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_c \right) dt.$$

После раскрытия скобок получим

$$A_{\text{мех}} = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega d\omega + M_c \int_{t_1}^{t_2} \omega dt. \quad (6.12)$$

Для упрощения дальнейших выкладок примем движение электропривода в переходном режиме равноускоренным, то есть $\omega = \varepsilon t$, где ε — постоянное угловое ускорение. С учетом этого, решением (6.12) является

$$A_{\text{мех}} = J \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} + M_c \varepsilon \frac{t_2^2 - t_1^2}{2}.$$

Электрические потери в переходном режиме определяются как разность энергии подведенной и механической, т.е.

$$\begin{aligned} \Delta A_{эл} &= A_c - A_{мех} = \\ &= J[\omega_o(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}] + M_c[\omega_o(t_2 - t_1) - \varepsilon \frac{t_2^2 - t_1^2}{2}]. \end{aligned} \quad (6.13)$$

В полученном выражении первое слагаемое правой части, заключенное в квадратные скобки, представляет собою изменение запаса кинетической энергии в системе при изменении угловой скорости от ω_1 до ω_2 , второе — энергия, затрачиваемая двигателем на преодоление статических сопротивлений за время переходного процесса от t_1 до t_2 .

В качестве иллюстрации рассмотрим расчет электрических потерь при пуске электродвигателя с постоянной нагрузкой.

Ввиду высокой жесткости механических характеристик двигателей независимого возбуждения без большой погрешности можно считать, что угловая скорость при нагрузке мало отличается от скорости идеального холостого хода, то есть $\omega_c \approx \omega_o$. Тогда

$$\omega_1 = 0, \quad \omega_2 = \omega_o, \quad t_1 = 0, \quad t_2 - t_1 = t_n.$$

Подставив принятые значения величин в формулу (6.13), находим

$$\Delta A_{эл} = J \frac{\omega_o^2}{2} + M_c \varepsilon \frac{t_n^2}{2}.$$

С учетом того, что $\varepsilon t_n = \omega_c \approx \omega_o$ можно записать

$$\Delta A_{эл} \approx J \frac{\omega_o^2}{2} + M_c \frac{\omega_o t_n}{2}.$$

Аналогичным образом рассчитываются потери энергии в якоре при тормозных режимах электродвигателей.

Таким образом, потери энергии в якорной цепи двигателя равны сумме кинетической энергии, запасаемой в подвижных частях агрегата, и энергии, расходуемой на преодоление сопротивлений в процессе разбега от нуля до скорости ω_o .

Потери энергии в переходных режимах двигателей последовательного и смешанного возбуждения также обуславливаются изменением запаса кинетической энергии и работой, совершаемой на преодоление статических сопротивлений, но в связи с непостоянством магнитного потока методика их расчета несколько отличается от рассмотренной.

6.3. Расчет потерь энергии в переходных режимах асинхронных двигателей при работе без нагрузки

Электромагнитная мощность, развиваемая асинхронным двигателем в воздушном зазоре

$$P_{эм} = M_{\delta} \omega_o,$$

где M — электромагнитный момент;

ω_o — угловая скорость вращающегося магнитного поля.

Мощность, на валу двигателя

$$P_2 = M_{\delta} \omega.$$

Вычитанием мощности на валу двигателя из мощности в воздушном зазоре определяется потеря мощности в роторе

$$\Delta P_2 = M_{\delta} \omega_o - M_{\delta} \omega = M_{\delta} (\omega_o - \omega). \quad (6.14)$$

Потери энергии в роторе за время переходного процесса

$$\Delta A_2 = \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_2 dt = \int_{t_1}^{t_2} M_{\delta} (\omega_o - \omega) dt. \quad (6.15)$$

Подставим в это выражение значение момента двигателя, найденное из уравнения движения при $M_c = 0$:

$$\Delta A_2 = \int_{t_1}^{t_2} J \frac{d\omega}{dt} (\omega_o - \omega) dt = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J (\omega_o - \omega) d\omega.$$

После интегрирования получим:

$$\Delta A_2 = J \left[\omega_o (\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} \right].$$

Из полученного выражения следует, что потери энергии в роторе асинхронного двигателя в переходном режиме, как и потери в якоре двигателя постоянного тока при работе без нагрузки, равны изменению запаса кинетической энергии агрегата. Так, при пуске, когда $\omega_1 = 0$, а $\omega_2 = \omega_o$, потери энергии в роторе составляют

$$\Delta A_2 = J \frac{\omega_o^2}{2}. \quad (6.16)$$

В асинхронном двигателе электрическая энергия подводится к обмотке статора и далее посредством вращающегося магнитного поля передается в ротор. При протекании тока по обмоткам статора в них также образуются потери.

Полные потери в переходном режиме двигателя определяются как сумма потерь в обмотках статора и ротора, т.е.

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 = mI_2'^2 R_1 t_n + mI_2'^2 R_2' t_n, \quad (6.17)$$

где ΔA_1 — потери энергии в обмотках статора;

m — число фаз;

R_1 — активное сопротивление фазы обмотки статора;

R_2' — активное сопротивление фазы обмотки ротора, приведенное к статору;

I_2' — ток ротора, приведенный к обмотке статора;

t_n — время переходного процесса.

В выражении (6.17) вынесем за скобки потери в роторе

$$\Delta A = mI_2'^2 R_2' t_n \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right).$$

С учетом (6.16) формула для потерь в двигателе приобретает вид:

$$\Delta A = J \frac{\omega_o^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right),$$

где R_1/R_2' — отношение активного сопротивления фазы обмотки статора к приведенному активному сопротивлению фазы обмотки ротора — коэффициент сопротивлений. Этот коэффициент в расчетах часто принимают равным единице, тогда

$$\Delta A \approx 2\Delta A_2 = J\omega_o^2.$$

Отсюда следует, что потери энергии в переходных режимах асинхронных двигателей примерно в два раза превышают потери в якорной цепи двигателей постоянного тока. Соотношение потерь при пуске и при тормозных режимах асинхронных двигателей такое же, как и у двигателей постоянного тока.

6.4. Расчет потерь энергии в переходных режимах асинхронных двигателей при работе с нагрузкой

Расчет потерь энергии в асинхронных двигателях в переходных режимах при работе с нагрузкой затрудняется тем, что уравнения механических характеристик этих двигателей нелинейны. В этих случаях обычно прибегают к приближенным или графическим методам решения. Так, площадь под линией изменения скорости при определении времени разбега электропривода методом пропорций ($\omega(t)$ на рисунке 63) в определенном масштабе выражает собою потери энергии. Применение ПК позволяет с большей точностью и меньшими затратами времени решать эти задачи и в тех случаях, когда не только механические характеристики двигателей, но и характеристики рабочих машин описываются нелинейными уравнениями.

Для определения потерь энергии в роторе воспользуемся уравнением (6.15), умножив и разделив выражение под интегралом на синхронную угловую скорость

$$\Delta A_2 = \int_{t_1}^{t_2} M_\delta(\omega_o - \omega) \frac{\omega_o}{\omega} dt = \int_{t_1}^{t_2} M_\delta \omega_o s dt. \quad (6.18)$$

Из уравнения движения электропривода при $M_c \neq 0$ найдем дифференциал времени

$$dt = J \frac{d\omega}{M_\delta - M_c}.$$

После подстановки этого выражения в формулу (6.18) получим

$$\Delta A_2 = J \omega_o \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{M_\delta s}{M_\delta - M_c} d\omega. \quad (6.19)$$

Для решения интеграла (6.19) на ПК входящие в него моменты следует выразить в виде функций угловой скорости

$$\Delta A_2(\omega) = J \omega_o \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{M_\delta(\omega) s(\omega)}{M_\delta(\omega) - M_c(\omega)} d\omega,$$

где $M_\delta(\omega)$ — уравнение механической характеристики асинхронного двигателя;

$M_c(\omega)$ — уравнение механической характеристики рабочей машины;

$s(\omega)$ — зависимость скольжения от угловой скорости.

Механические характеристики, представленные функциями угловой скорости, требуют вычисления параметров обмоток двигателя и используются редко. Поэтому входящие в формулу (6.19) переменные целесообразно выражать с помощью известных зависимостей через скольжение. В этом случае уравнение для определения потерь энергии в роторе принимает вид:

$$\Delta A_2(s) = J \omega_o^2 \int_{s_2}^{s_1} \frac{M_\delta(s) s}{M_\delta(s) - M_c(s)} ds.$$

Полные потери энергии в двигателе и в этом случае рассчитываются как сумма потерь в роторе и статоре

$$\Delta A(s) = \Delta A_2(s) \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right).$$

При расчетах потерь энергии в переходных режимах рассматриваемым методом необходимо использовать уравнения механических характеристик асинхронных двигателей с поправочными коэффициентами (2.57) или (2.59), при которых вычисляемые пусковые моменты соответствуют каталожным.

6.5. Определение оптимального передаточного числа в электроприводе

В тех случаях, когда частота включений производственных механизмов достигает сотен, а иногда и тысяч включений в час, время разбега и торможения оказывает существенное влияние на их производительность и на потери энергии в переходных режимах. Передаточное число, при котором обеспечивается минимальное время протекания переходных процессов, называется наивыгоднейшим или оптимальным. Практически это сводится к выбору такого передаточного числа, которое обуславливает максимальные ускорения при пуске и максимальные замедления при торможении.

Для определения такого передаточного числа запишем уравнение движения электропривода с параметрами, приведенными к валу рабочего механизма (пренебрегая потерями в передачах):

$$iM_{\delta} - M_c = (J_m + kJ_{\delta}i^2) \frac{d\omega_m}{dt}. \quad (6.20)$$

- где M_{δ} — момент, развиваемый двигателем;
 M_c — момент сопротивления на валу рабочей машины;
 J_m и J_{δ} — моменты инерции рабочей машины и ротора двигателя;
 ω_m — угловая скорость вала рабочей машины;
 k — коэффициент, учитывающий момент инерции передач;
 i — передаточное число $i = \omega_{\delta}/\omega_m$.

В уравнение (6.20) введем обозначение для углового ускорения

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \varepsilon$$

и выразим из него зависимость ускорения от передаточного числа

$$\varepsilon = \frac{iM_{\delta} - M_c}{J_m + kJ_{\delta}i^2}.$$

Полученное выражение обычными методами исследуем на максимум. Для этого его первую производную приравняем к нулю, т.е.

$$\frac{d\varepsilon}{di} = 0.$$

Реально производная в выражении может равняться нулю лишь при условии, что нулю равняется числитель полученной производной, то есть:

$$M_{\delta}(J_m + kJ_{\delta}i^2) - 2kJ_{\delta}i(M_{\delta}i - M_c) = 0.$$

Так как величины, входящие в знаменатель, реально бесконечно большими быть не могут. Отсюда

$$i = \frac{M_c}{M_\delta} + \sqrt{\left(\frac{M_c}{M_\delta}\right)^2 + \frac{J_M}{kJ_\delta}}. \quad (6.21)$$

В тех случаях, когда переходные процессы протекают при моментах сопротивления значительно меньших моментов двигателя (пуск, торможение, реверсирование вхолостую), отношением моментов в формуле (6.21) можно пренебречь и тогда оптимальное передаточное число можно выразить как:

$$i = \sqrt{\frac{J_M}{kJ_\delta}}.$$

Если момент двигателя и момент сопротивления находятся в сложной зависимости от скорости, уравнение (6.21) решается с помощью ПК.

6.6. Способы уменьшения потерь энергии в переходных режимах

Для многих электроприводов, связанных с частыми пусками, реверсами, электрическим торможением, снижение потерь электроэнергии в переходных режимах в значительной степени предопределяет энергетические показатели электрифицированного агрегата в целом. Приведенный выше анализ потерь энергии показывает, что снижение их возможно тремя основными способами: уменьшением приведенного момента инерции, регулированием скорости идеального холостого хода и уменьшением времени переходных процессов.

Уменьшение момента инерции достигается за счет применения малоинерционных двигателей (двигатели с полым якорем, асинхронные двигатели с удлиненным ротором), тщательным расчетом и подбором требуемых маховиков. Для уменьшения приведенного момента инерции в приводах большой мощности оказывается целесообразным замена одного двигателя несколькими с суммарной мощностью, равной мощности заменяемого двигателя. Такая замена, кроме уменьшения суммарного момента инерции, во многих случаях позволяет достичь рациональной компоновки привода. Так, момент инерции ротора двигателя 4A250M4 мощностью 90 кВт равен 1,17 кг·м², суммарный момент инерции двух двигателей 4A200L4 мощностью 45 кВт каждый равен 0,89 кг·м², а при трех двигателях 4A180M4 мощностью по 30 кВт суммарный момент инерции равен 0,7 кг·м².

Под регулированием скорости идеального холостого хода подразумевается ступенчатый пуск двигателей постоянного тока путем регулирования напряжения и изменения числа пар полюсов или частоты питающего тока асинхронных двигателей.

В случае двигателя постоянного тока с двумя ступенями напряжения вначале включают на пониженное напряжение U_1 , которому соответствует скорость идеального холостого хода ω_{o1} , а затем переключают на полное напряжение U_2 , соответствующее скорости ω_{o2} . Учитывая, что скорость идеального холостого хода пропорциональна напряжению и, принимая $U_1 = 0,5U_2$ и $\omega_{o1} = 0,5\omega_{o2}$, определим из формулы (6.9) потери энергии при разбеге на первой ступени напряжения без нагрузки

$$\Delta A_1 = J \frac{\omega_{o1}^2}{2} = J \frac{(0,5\omega_{o2})^2}{2}.$$

При разбеге на второй ступени напряжения

$$\Delta A_2 = J[\omega_o(\omega_{o2} - \omega_{o1}) - \frac{\omega_{o2}^2 - \omega_{o1}^2}{2}] = 0,25J \frac{\omega_{o2}^2}{2}.$$

Сумма потерь на первой и второй ступенях разбега

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A_1 + \Delta A_2 = 0,5J \frac{\omega_{o2}^2}{2}.$$

Потери энергии при пуске на одной ступени полного напряжения

$$\Delta A = J \frac{\omega_{o2}^2}{2}.$$

Из полученных выражений следует, что потери электроэнергии при пуске с двумя ступенями скорости уменьшаются в 2 раза. Нетрудно показать, что при разделении каждой из двух ступеней напряжения пополам, т.е. при пуске в четыре ступени, потери энергии уменьшаются в 4 раза. Следовательно, потери в якоре снижаются во столько раз, сколько имеется пусковых ступеней, т.е. при количестве ступеней, равном k потери энергии

$$\Delta A = \frac{1}{k} J \frac{\omega_{o2}^2}{2}. \quad (6.22)$$

При плавном регулировании напряжения, подводимого к якору в процессе пуска (что равноценно $k \rightarrow \infty$) переходные процессы, как видно из формулы (6.22), протекают без потерь.

Ступенчатый пуск двухскоростного асинхронного двигателя аналогичен пуску двигателя постоянного тока с двумя ступенями подводимого к якору напряжения.

Многоскоростные асинхронные двигатели имеют значительно большие габариты и момент инерции в сравнении с односкоростными той же мощности и с номинальной скоростью, равной максимальной скорости многоскоростного двигателя. Поэтому в целях уменьшения потерь энергии целесообразно для этих двигателей применять ступенчатый пуск. В современных электроприводах получают широкое применение асинхронные

двигатели с частотным регулированием скорости. Пуск таких двигателей с плавным регулированием частоты тока позволяет значительно уменьшить потери энергии в переходных режимах

Третьим фактором снижения потерь при пуске двигателей согласно формулам (6.13) и (6.18), является сокращение времени переходных процессов, которое зависит от величины избыточного момента и передаточного числа в электроприводе.

6.7. Расчет допустимого числа включений в час

В переходных режимах пуска, электрического торможения, реверсирования и др. по обмоткам двигателей протекают повышенные токи и их работа сопровождается значительными потерями энергии, что может привести к их перегреву. Особенно это относится к асинхронным двигателям для повторно-кратковременного режима работы, которые нашли широкое применение в приводе различных механизмов, работающих в весьма напряженном режиме, частота включений которых измеряется многими сотнями час.

Условия работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором оказываются более тяжелыми, чем двигателей постоянного тока или асинхронных с фазным ротором, так как в двигателях с короткозамкнутым ротором тепло, выделяемое во время переходных процессов, должно рассеиваться самими обмотками. Во избежание перегрева двигателя число циклов в единицу времени должно быть таким, чтобы количество тепла, выделяемого в двигателе за время одного цикла, равнялось количеству тепла, отдаваемого двигателем в окружающее пространство за это же время при допустимом превышении температуры. Под допустимой частотой понимают такое число включений двигателя в час, при котором средняя его температура после большого количества рабочих циклов будет равна допустимой.

Потери энергии в двигателе за цикл работы составляют:

$$\Delta A_{y.n} = \Delta A_n + \Delta A_m + \Delta P_x t_y, \quad (6.23)$$

где ΔA_n и ΔA_m — потери в двигателе при пуске и торможении;

ΔP_x — потери мощности в двигателе при работе с некоторой нагрузкой P_x и установившейся угловой скоростью;

t_y — продолжительность установившейся работы в одном цикле.

Количество тепла, отдаваемого в пространство за цикл с учетом ухудшения условий охлаждения двигателя при разбеге, торможении и остановке:

$$\Delta A_{y.o} = \frac{1+\beta}{2} \Delta P_n t_n + \frac{1+\beta}{2} \Delta P_n t_m + \Delta P_n t_y + \beta \Delta P_n t_o. \quad (6.24)$$

Время цикла t_u складывается из времени пуска t_n , торможения t_m , работы в установившемся режиме t_y и паузы t_o :

$$t_u = t_n + t_m + t_y + t_o,$$

где β — коэффициент ухудшения теплоотдачи неработающего двигателя;

$(1 + \beta)/2$ — коэффициент ухудшения теплоотдачи при разбеге и торможении двигателя.

При допустимом числе включений должно соблюдаться равенство

$$\Delta A_{u.n} = \Delta A_{u.o}. \quad (6.25)$$

Если в течение 1 часа (3600 с) совершается z циклов, то продолжительность одного цикла определится как:

$$t_u = \frac{3600}{z}. \quad (6.26)$$

Определив из формулы (6.26) время одного цикла и из графика нагрузки относительную продолжительность включения, находим

$$t_p = \frac{3600}{z} \varepsilon; \quad t_o = \frac{3600}{z} (1 - \varepsilon); \quad \text{и} \quad t_y = \frac{3600}{z} \varepsilon - (t_n + t_m), \quad (6.27)$$

где ε — относительная продолжительность включения $\varepsilon = t_p/t_u$.

Подставим в формулу (6.25) значения:

- потерь — из выражения (6.23);
- отдачи тепла — из выражения (6.24);
- отрезков времени в цикле — из выражения (6.27):

$$\begin{aligned} \Delta A_n + \Delta A_m + \Delta P_x \left[\frac{3600}{z} \varepsilon - (t_n + t_m) \right] = \\ = \frac{1 + \beta}{2} \Delta P_n (t_n + t_m) + \frac{3600}{z} \Delta P_n \varepsilon - \Delta P_n (t_n + t_m) + \frac{3600}{z} \Delta P_n \beta (1 - \varepsilon). \end{aligned} \quad (6.28)$$

Решая (6.28) относительно z , находим допустимое число включений в час

$$z = 3600 \frac{(\Delta P_n - \Delta P_x) \varepsilon + \Delta P_n \beta (1 - \varepsilon)}{\Delta A_n + \Delta A_m - a}, \quad (6.29)$$

где

$$a = (t_n + t_m) \left[\Delta P_n \left(\frac{1 + \beta}{2} - 1 \right) + \Delta P_x \right].$$

Если время переходных процессов при пуске и торможении невелико по сравнению с продолжительностью установившегося режима, и коэффициент ухудшения охлаждения принять равным 0,5, величина a в знаменателе выражения (6.29) составляет 2...4% от суммы электрических потерь при разбеге и торможении, поэтому можно принять

$$z = 3600 \frac{(\Delta P_n - \Delta P_x)\varepsilon + \Delta P_n \beta(1 - \varepsilon)}{0,97(\Delta A_n + \Delta A_m)}.$$

Когда в установившемся режиме двигатель работает с номинальной нагрузкой, и потери равны номинальным, допустимое число включений в час определяется как:

$$z = 3600 \frac{\Delta P_n \beta(1 - \varepsilon)}{0,97(\Delta A_n + \Delta A_m)}.$$

Допустимое число включений в час можно повысить главным образом за счет увеличения коэффициента теплоотдачи путем независимого обдува двигателя и снижения потерь в переходных режимах. Последнее достигается за счет правильного выбора моментов инерции электропривода и рационального способа электрического торможения.

Литература: [2, с. 239-241; 6, с. 201-211; 7, с. 268-270; 9, с. 235-245; 10, с. 386-387].

ГЛАВА 7. ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Коэффициент мощности электропривода является одним из важнейших показателей, определяющих экономичность самого электропривода, и оказывает влияние на технико-экономические показатели энергоснабжающих предприятий. Низкий $\cos \varphi$ ведет к увеличению потерь в линиях электропередач, уменьшению их пропускной способности, непроизводительному использованию мощности генераторов и трансформаторов, к необходимости увеличения сечения проводов в линиях и перерасходу проводникового материала.

7.1. Влияние коэффициента мощности на работу электроустановок

Электроприводы с асинхронными электродвигателями, подключаемые к сети переменного тока, потребляют из нее активную и реактивную мощность. Активная мощность расходуется на выполнение полезной работы и покрытие потерь, а реактивная используется для создания электромагнитных полей двигателей и других элементов привода; полезной работы она не производит.

При одной и той же активной мощности, развиваемой двигателем, сила тока, поступающего из сети, должна быть тем больше, чем ниже $\cos \varphi$, т.к.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}. \quad (7.1)$$

Реактивная составляющая этого тока, протекая по обмоткам генераторов и трансформаторов, не позволяет полностью использовать их мощность. Нагрузка первичного двигателя определяется активной составляющей мощности генератора. Повышать нагрузку первичного двигателя нельзя, так как это приведет к перегрузке обмоток генератора током и их перегреву. Недогрузка генератора ведет к недоиспользованию мощности первичного двигателя, и, как следствие, к снижению его к.п.д. и перерасходу топлива, приходящегося на единицу вырабатываемой электрической энергии.

Несложные расчеты показывают, что низкий $\cos \varphi$ ведет к увеличению потерь мощности в линиях электропередач. Потери мощности в одном проводнике линии определяются как:

$$\Delta P = I^2 R, \quad (7.2)$$

где R — активное сопротивление провода.

При передаче одной и той же мощности линейные токи, согласно формулы (7.1), будут обратно пропорциональны $\cos \varphi$.

Тогда отношение потерь в линии при различных $\cos \varphi$

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{\cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1}. \quad (7.3)$$

Из выражений (7.1), (7.2) и (7.3) следует, что при передаче одной и той же активной мощности по данной линии потери в ней будут обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности.

Обычно значение допустимых потерь в линии нормируется в процентах от проектной мощности. Поэтому при проектировании сетей с пониженным коэффициентом мощности для сохранения нормированных потерь приходится уменьшать сопротивление линий, т.е. увеличивать их сечение.

Подставив в формулу (7.2) значение линейного тока из формулы (7.1) и выражая сопротивления линии через ее геометрические размеры, определяем допустимые потери в линии

$$\Delta P = \left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi_1} \right)^2 \frac{\rho l}{s_1} = \left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi_2} \right)^2 \frac{\rho l}{s_2}, \quad (7.4)$$

где ρ — удельное сопротивление металла провода;
 l — длина линии;
 s — сечение провода.

Из выражения (7.4) следует

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1}$$

или

$$s_2 = s_1 \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2}. \quad (7.5)$$

Отсюда следует, что сечение проводов, а значит и расход проводникового материала на сооружение линии, находится в обратной зависимости от квадрата коэффициента мощности.

7.2. Факторы, ведущие к понижению коэффициента мощности

Асинхронные двигатели работают на принципе вращающегося магнитного поля, для создания которого двигателем потребляется намагничивающий или реактивный ток, который отстает от напряжения на угол 90° и при постоянном напряжении, приложенном к зажимам двигателя, остается неизменным, не зависящим от нагрузки. Для выработки механической мощности и покрытия потерь в двигателе потребляется активный ток, совпадающий по фазе с напряжением. Величина активного тока зависит от нагрузки, приложенной к валу двигателя. При холостом ходе активная составляющая тока I_{a0} , обусловленная механическими и тепловыми потерями в двигателе, минимальна. По мере увеличения нагрузки она растет и достигает максимального значения при нагрузке несколько превышающей номинальную. По обмоткам статора протекает ток, равный геометрической сумме актив-

ного и намагничивающего токов, который отстает от напряжения на угол φ . Как показано на векторной диаграмме (рис. 83), угол сдвига по фазе между полным током и напряжением изменяется от φ_0 при холостом ходе до φ_n при номинальной нагрузке. Коэффициент мощности может быть выражен через токи как отношение активной составляющей тока при данной нагрузке I_{ax} к соответствующему полному току I_x :

$$\cos \varphi_x = \frac{I_{ax}}{I_x}.$$

При холостом ходе потери в двигателе и активная составляющая тока невелики в то время как намагничивающий ток достигает 20-40% тока номинального. Поэтому коэффициент мощности при холостом ходе невысок и находится в пределах 0,08...0,2. По мере роста нагрузки активная составляющая тока увеличивается и при номинальной нагрузке $\cos \varphi_n$ достигает 0,7...0,96, меньше у двигателей малой мощности и больше у двигателей большой мощности. Из этого следует, что работа двигателя со значительной недогрузкой и при холостом ходе ведет к снижению коэффициента мощности. Как известно, потребляемая асинхронным двигателем реактивная мощность определяется выражением:

$$Q_r = \frac{1}{4} f_1 B^2 S \delta,$$

где f_1 — частота тока сети;

B — магнитная индукция в воздушном зазоре;

S — боковая поверхность ротора;

δ — величина воздушного зазора.

Из этого соотношения следует, что электродвигатели малой мощности имеют более низкий $\cos \varphi$, чем у двигателей большой мощности, так как у последних воздушный зазор, оказывающий большое влияние на величину реактивной мощности, относительно меньше. У тихоходных двигателей $\cos \varphi$ ниже, чем у быстроходных той же мощности, так как тихоходные двигатели имеют большие габариты, большую боковую поверхность ротора и несколько больший воздушный зазор. Двигатели с фазным ротором работают с более низким $\cos \varphi$, чем с короткозамкнутым, поскольку у них больше величина воздушного зазора и больше поля рассеяния обмотки ротора. Крановые двигатели и двигатели для ударной нагрузки по условиям механической прочности выполняются с увеличенным воздушным зазором, поэтому имеют значительно более низкий $\cos \varphi$, чем у двигателей общего назначения. Коэффициент мощ-

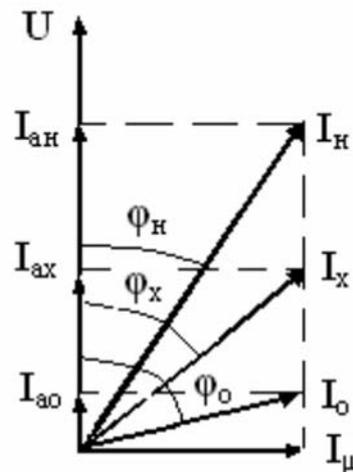


Рис. 83. Зависимость угла φ от нагрузки

ности в значительной мере зависит от условий эксплуатации и качества ремонта электродвигателей. При работе в режиме холостого хода и малых нагрузок $\cos \varphi$ весьма низок. При больших перегрузках он падает из-за увеличения частоты тока ротора и потоков рассеивания, вызванных насыщением железа.

Причиной ухудшения $\cos \varphi$ иногда становится неправильный ремонт электродвигателя. При одностороннем износе подшипников или прогибе вала происходит задевание ротора о статор. Попытки устранения такой неисправности путем проточки ротора или расточки статора приводит к увеличению воздушного зазора и тока намагничивания. Укладка неполного количества витков обмотки статора приводит к тому же результату, так как для создания прежней намагничивающей силы потребуется больший намагничивающий ток. Следует отметить, что в этих случаях уменьшается и номинальная мощность электродвигателя.

7.3. Способы повышения $\cos \varphi$

Мероприятия, направленные на повышение $\cos \varphi$ в электроприводах, условно подразделяют на естественные и искусственные. К числу первых следует отнести мероприятия преимущественно организационного характера, не требующие специальных устройств для устранения факторов, ведущих к его снижению. При подборе двигателей к рабочим машинам необходимо тщательно рассчитывать их потребную мощность и стремиться подбирать двигатели с более высоким $\cos \varphi$. Рекомендуется применять двигатели по возможности более высокоскоростные с короткозамкнутым ротором. В процессе эксплуатации необходимо стремиться к полной загрузке двигателей. Способ и средства управления технологическим процессом должны быть организованы так, чтобы работа двигателей в режиме холостого хода была сокращена до минимума.

В тех случаях, когда по условиям технологического процесса не удается обеспечить полную загрузку двигателя, или когда прибегают к использованию одного и того же двигателя для привода машин с различной потребной мощностью и он работает со значительной недогрузкой, для повышения $\cos \varphi$ прибегают к переключению обмоток статора с треугольника на звезду. Такая потребность, в частности, иногда диктуется сезонным характером в некоторых отраслях сельскохозяйственного производства и стремлением увеличить число часов использования электрооборудования. При переключении обмоток с треугольника на звезду напряжение на фазах двигателя уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, а линейный ток с учетом насыщения железа уменьшается более чем в 3 раза. Намагничивающая составляющая также уменьшается в 3..3,5 раза, что способствует резкому увеличению $\cos \varphi$ (рис. 84, а). За счет уменьшения магнитной индукции и тока намагничивания уменьшаются потери в сердечниках и обмотках двигателя. Благодаря этому, увеличивается коэффициент полезного действия. Однако, как видно из рисунка 84, б, такое переключение допустимо лишь при малых нагрузках, не

превышающих 30...40% от номинальных. В дальнейшем, с ростом нагрузок к.п.д. и $\cos \varphi$ уменьшаются, а токи в обмотках резко возрастают, что может привести к перегреву и выходу из строя электродвигателя.

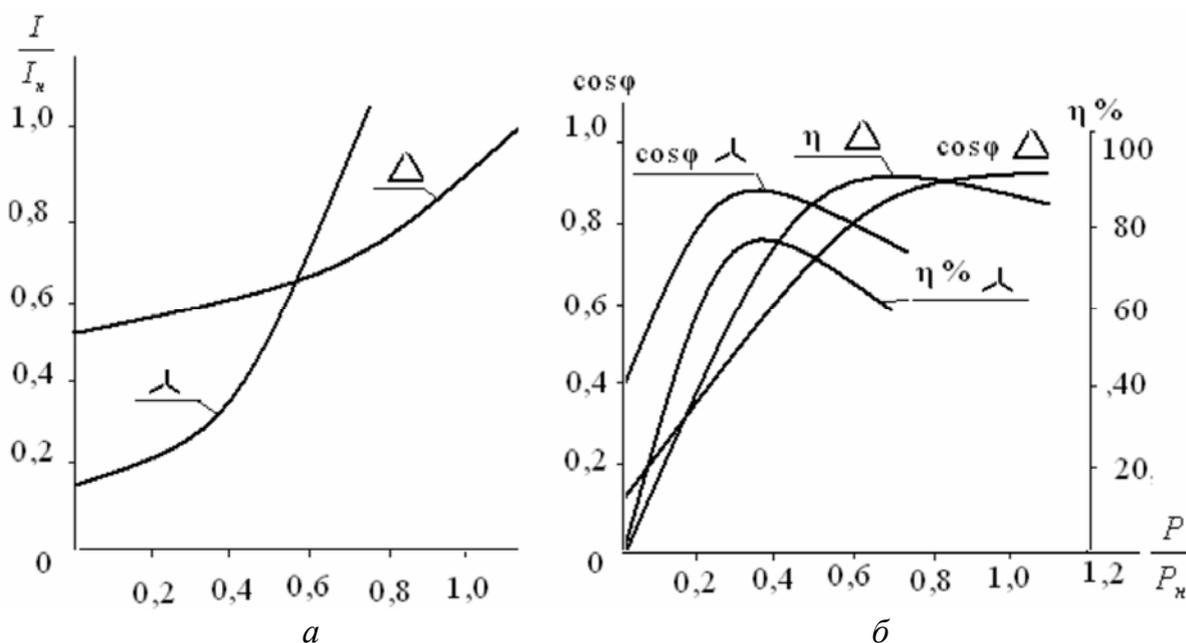


Рис. 84. Зависимость $\cos \varphi$ и к.п.д. от нагрузки двигателя при включении по схеме звезда и треугольник

В тех случаях, когда применение естественных способов не обеспечивает требуемого повышения $\cos \varphi$, прибегают к искусственным, путем использования реактивной мощности с опережающим током. В качестве источников такой мощности наиболее известными являются статические конденсаторы и синхронные двигатели. Синхронные двигатели в условиях сельскохозяйственного производства по ряду причин не нашли распространения, поэтому в качестве компенсаторов реактивной мощности они используются обычно на подстанциях большой мощности. В условиях сельских производственных коллективов, на животноводческих фермах, в ремонтных мастерских, в фермерских хозяйствах более простым и удобным источником реактивной мощности являются статические конденсаторы. Они не имеют подвижных деталей, бесшумны, просты и надежны в работе, обладают высоким коэффициентом полезного действия. Легко рассчитывается и набирается требуемая емкость. К недостаткам конденсаторов следует отнести зависимость генерируемой мощности от напряжения, недостаточную стойкость при перегрузках по току и напряжению, а также ухудшение их работы в сетях с повышенным содержанием высших гармоник.

Принцип компенсации основан на том, что емкостной и намагничивающие токи находятся в противофазе. Если намагничивающий ток отстает от напряжения на 90° , то емкостной опережает его на 90° . Физически это означает, что в полупериод переменного тока, когда происходит зарядка конден-

саторов, т.е. энергия электрического тока в нем преобразуется в энергию электрического поля, происходит преобразование энергии магнитного поля в энергию электрического тока. И наоборот, в тот полупериод тока, когда конденсаторы разряжаются, энергия электрического тока преобразуется в энергию магнитного поля. Электрическая энергия, преобразуемая в энергию электрического или магнитного поля, называется реактивной. Таким образом, при наличии емкостей и индуктивностей в цепи переменного тока происходит взаимный обмен между энергией электрического поля конденсаторов и энергией магнитного поля катушек. При этом отпадает необходимость передавать эту энергию по линиям от электростанции.

Для компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя батарея конденсаторов подключается параллельно обмоткам двигателя. Как следует из векторной диаграммы (рис. 85), ток в линейных проводах равен геометрической сумме токов двигателя и конденсатора.

$$\vec{I} = \vec{I}_a + \vec{I}_\mu + \vec{I}_c.$$

При полной компенсации емкостной ток равен намагничивающему, а результирующий ток равен активной составляющей. На практике обычно не ставится задача полной компенсации реактивной мощности, т.к. это не всегда оправдывается экономической целесообразностью. Значение коэффициента мощности для потребителей определяется электроснабжающей организацией. Требуемая емкость конденсаторов рассчитывается из условий заданного коэффициента мощности.

Если полный линейный ток данного потребителя или группы потребителей без компенсации I_l отстает от напряжения на угол φ_1 (см. рис. 85), то при параллельном включении конденсаторов его величина становится равной I_2 , а угол сдвига по фазе φ_2 . Индуктивные составляющие токов до компенсации и после равны $I_{\mu 1}$ и $I_{\mu 2}$ соответственно. Емкостной ток конденсаторов для этого должен быть равен разности индуктивных токов

$$I_c = I_{\mu 1} - I_{\mu 2}. \quad (7.6)$$

Реактивные индуктивные токи можно выразить через активную составляющую и углы сдвига:

$$I_{\mu 1} = I_a \operatorname{tg} \varphi_1 \quad \text{и} \quad I_{\mu 2} = I_a \operatorname{tg} \varphi_2.$$

Подставив эти значения токов в (7.6), получим

$$I_c = I_a (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2). \quad (7.7)$$

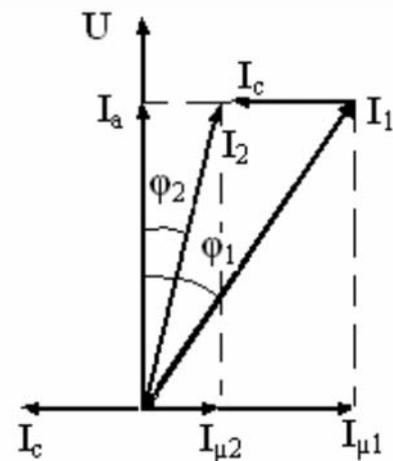


Рис. 85. К расчету емкости конденсаторов

Выразим этот ток через емкостное сопротивление конденсаторов и приложенное фазное напряжение

$$I_c = \frac{U}{x_c} = U\omega C, \quad (7.8)$$

где x_c — емкостное сопротивление фазы $x_c = 1/\omega C$;

ω — угловая частота $\omega = 2\pi f$;

C — емкость одной фазы конденсаторов, Ф.

Приравнивая между собою правые части выражений (7.7) и (7.8), находим

$$C = \frac{I_a(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{\omega U}. \quad (7.9)$$

Обычно нагрузки маркируют не по току, а по мощности при определенном напряжении. Поэтому числитель и знаменатель выражения (7.9) умножим и разделим на $3U$, тогда

$$C = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{3\omega U^2}, \quad (7.10)$$

где P — активная мощность трехфазного потребителя, Вт;

U — фазное напряжение, В.

В условиях практики активная мощность потребителей задается в кВт, а емкость конденсаторов принято исчислять в микрофарадах, поэтому в выражение (7.10) необходимо ввести коэффициент 10^9 :

$$C = \frac{10^9 P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{3\omega U^2}. \quad (7.11)$$

Батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности могут применяться как для индивидуальных, так и для групповых потребителей.

Из выражения (7.11) следует, что при одинаковой мощности емкость конденсаторов обратно пропорциональна квадрату приложенного напряжения. Поэтому для уменьшения требуемой емкости конденсаторов их включают по схеме треугольник, так как по сравнению со схемой звезда напряжение на конденсаторах увеличивается в $\sqrt{3}$ раз, а мощность батареи возрастает в 3 раза. Для компенсации реактивной мощности группы потребителей, питающихся от данной трансформаторной подстанции, следует рассмотреть экономическую целесообразность подключения батареи конденсаторов на стороне высокого напряжения. При этом стоимость высоковольтных конденсаторов увеличивается незначительно, тогда как требуемая емкость уменьшается в десятки и даже в сотни раз.

Конденсаторные батареи групповой компенсации располагают у распределительных щитов на металлических настилах вместе с разрядными сопротивлениями. В качестве разрядных сопротивлений применяются лампы накаливания, подключаемые параллельно конденсаторной батарее (рис. 86).

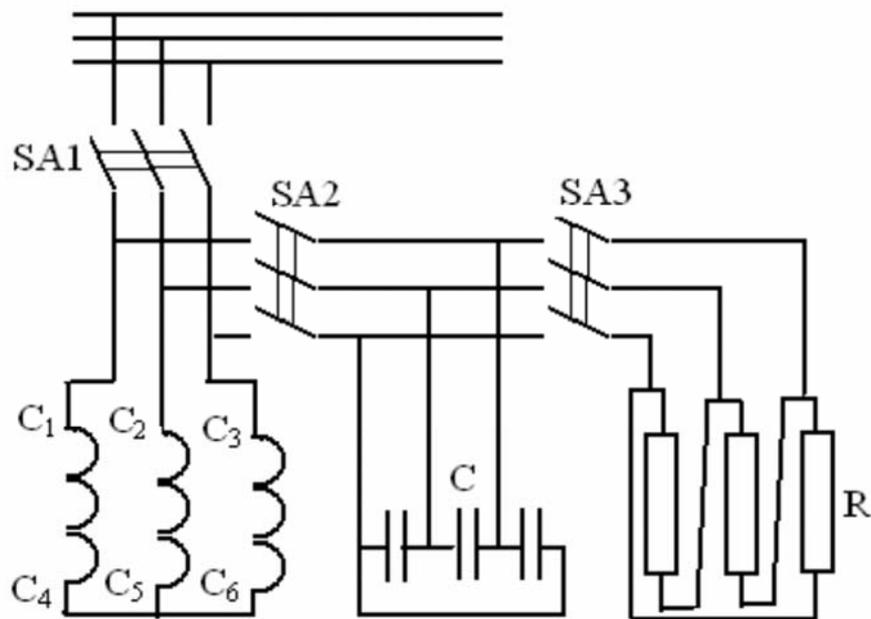


Рис. 86. Схема включения конденсаторов для компенсации реактивной мощности

Величина разрядного сопротивления принимается из расчета снижения напряжения до 50 В в течение 1 минуты.

Литература: [6, с. 214-219].

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 50369—92 Электроприводы. Термины и определения — М. : Изд-во стандартов, 1993.
2. Основы электропривода и автоматическое управление электроприводом в сельском хозяйстве / А.М. Басов, А.Т. Шаповалов, С.А. Кожевников. — М. : Колос, 1972. — 240 с.
3. Вешеневский, С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. — М. ; Л. : Энергия, 1966. — 399 с.
4. Ильинский, Н.Ф. Общий курс электропривода / Н.Ф. Ильинский, В.Ф. Козаченко. — М. : Энергоатомиздат, 1992. — 543 с.
5. Кацман, М.М. Справочник по электрическим машинам. — М. : Академия, 2005. — 479 с.
6. Москаленко, В.В. Электрический привод. — М. : Высшая школа, 1991. — 430 с.
7. Онищенко, Г.Б. Электрический привод. — М. : РАСХН, 2003. — 320 с.
8. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 616 с.
9. Фролов, Ю.М. Основы электрического привода / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. — М. : Колос, 2007. — 252 с.
10. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, С.А. Сандлер. — М. : Энергоиздат, 1981. — 576 с.
11. Шичков, Л.П. Электрический привод. — М. : РАСХН, 2003. — 83 с.

Учебно-теоретическое издание

Основы электропривода : учебное пособие для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» очной и заочной форм обучения / сост. А.С. Симоненко. — 2-е изд., стереотип. — Кострома : КГСХА, 2010. — 182 с.

Гл. редактор Н.В. Киселева
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева