

И. Я. БРАСЛАВСКИЙ, З. Ш. ИШМАТОВ, В. Н. ПОЛЯКОВ

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Под редакцией И. Я. БРАСЛАВСКОГО

Допущено

*Учебно-методическим объединением по образованию в области
энергетики и электротехники
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 180400 «Электропривод
и автоматика промышленных установок и технологических комплексов»
направления 654500 «Электротехника, электромеханика
и электротехнологии»*

УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73
Б87

Рецензенты:

зав. кафедрой «Электротехника и электротехнологические установки»
Уральского государственного технического университета — УПИ,
проф., д-р техн. наук *Ф. Н. Саранулов*;
проф. кафедры «Автоматизированный электропривод» МЭИ *С. К. Козырев*

Браславский И. Я.

Б87 Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб.
пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский,
З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков; Под ред. И. Я. Браславского. —
М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 256 с.
ISBN 5-7695-1704-2

Изложены основные сведения о наиболее распространенных классах современных систем регулируемых асинхронных электроприводов и их энергетических показателях. Рассмотрены в общем виде возможности снижения энергопотребления в асинхронных электроприводах при работе в установившихся и переходных режимах. Обоснована целесообразность автоматизации энергоемких технологических процессов с использованием регулируемых асинхронных электроприводов, что позволяет решать задачи энергосбережения. Приведены рациональные структуры энергосберегающих автоматизированных частотно-регулируемых асинхронных электроприводов для типовых производственных механизмов. Даны количественные оценки снижения энергопотребления.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73

ISBN 5-7695-1704-2

© Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н., 2004
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2004
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Предисловие | 3 |
| Глава 1. Исходные положения | 6 |
| 1.1. Основные показатели качества электроэнергии и их оценка при питании регулируемых асинхронных электроприводов | 6 |
| 1.2. Системы регулируемых электроприводов и тенденции их развития | 7 |
| 1.3. Математическое описание и модели асинхронных двигателей в установившихся и переходных режимах | 8 |
| 1.4. Использование регулируемых асинхронных электроприводов и систем автоматизации в энергоемких технологических процессах | 16 |
| Глава 2. Основные типы регулируемых асинхронных электроприводов и их энергетические показатели | 21 |
| 2.1. Общие сведения | 21 |
| 2.2. Асинхронные электроприводы с реостатным управлением | 24 |
| 2.3. Системы электроприводов «тиристорный преобразователь напряжения — асинхронный двигатель» (ТПН — АД) | 31 |
| 2.4. Системы электроприводов «полупроводниковый преобразователь частоты — асинхронный двигатель» (ППЧ — АД) | 37 |
| 2.4.1. Назначение, состав и виды ППЧ — АД | 37 |
| 2.4.2. Математическое описание элементов силовой части ППЧ — АД | 40 |
| 2.4.3. Энергетические характеристики системы ПЧ — АД | 43 |
| 2.5. Предварительные выводы | 54 |
| Глава 3. Пути снижения электропотребления при использовании электроприводов | 58 |
| 3.1. Установившиеся режимы работы асинхронных электроприводов | 58 |
| 3.1.1. Выбор установленной мощности и типа двигателя | 58 |
| 3.1.2. Оптимизация потерь и КПД в системах ТПН — АД при изменении параметров установившегося режима | 59 |
| 3.1.3. Мощность потерь в системах ППЧ — АД при типовых законах частотного управления | 64 |
| 3.1.4. Оптимизация режимов системы ПЧ — АД | 89 |

| | |
|--|------------|
| 3.2. Реактивная мощность асинхронных электроприводов | |
| в установившихся режимах | 105 |
| 3.2.1. Исходные положения | 105 |
| 3.2.2. Системы ТПН—АД | 107 |
| 3.2.3. Системы ПЧ—АД | 112 |
| 3.3. Переходные режимы работы асинхронных | |
| электроприводов | 117 |
| 3.3.1. Общие принципы оптимизации энергопотребления | |
| в переходных режимах | 117 |
| 3.3.2. Обеспечение технологических требований к показателям | |
| переходных процессов за счет систем управления | |
| электроприводом | 126 |
| 3.3.3. Плавный пуск в системах ТПН—АД | 128 |
| 3.3.4. Плавный пуск в системах ПЧ—АД | 134 |
| 3.3.5. Законы управления системой ПЧ—АД, | |
| обеспечивающие снижение потерь энергии | |
| в переходных режимах | 142 |
| Глава 4. Автоматизация технологических процессов на основе | |
| частотно-регулируемого электропривода как средства ресурсо- | |
| и энергосбережения | 153 |
| 4.1. Основные пути повышения энергетической эффективности | |
| асинхронных электроприводов | 153 |
| 4.2. Энергетическая эффективность асинхронных | |
| электроприводов | 156 |
| 4.2.1. Кинематически связанные электроприводы | 156 |
| 4.2.2. Режимы энергосбережения в электроприводах | |
| с полупроводниковыми преобразователями | 159 |
| 4.2.3. Электроприводы центробежных насосов | 165 |
| 4.2.4. Электроприводы вентиляторов и турбокомпрессоров | 174 |
| 4.2.5. Электроприводы поршневых машин | 181 |
| 4.2.6. Электроприводы конвейеров и транспортеров | 184 |
| 4.2.7. Электроприводы управления дугowymi | |
| сталеплавильными печами | 186 |
| Глава 5. Примеры применения регулируемых электроприводов | |
| и средств автоматизации | 194 |
| 5.1. Особенности современных полупроводниковых | |
| преобразователей | 194 |
| 5.1.1. Достоинства полупроводниковых преобразователей | 194 |
| 5.1.2. Особенности полупроводниковых преобразователей | |
| частоты | 195 |
| 5.1.3. Преобразователи для систем ТПН—АД | 202 |
| 5.2. Эффективность использования систем преобразования | |
| в электроприводах объектов жилищно-коммунального | |
| хозяйства | 204 |
| 5.2.1. Системы водоснабжения | 204 |
| 5.2.2. Системы теплоснабжения | 216 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.3. Электроприводы лифтов | 225 |
| 5.3. Эффективность использования частотно-регулируемых электроприводов в устройствах на промышленных объектах | 228 |
| 5.3.1. Поршневые насосы и компрессоры | 228 |
| 5.3.2. Подъемно-транспортные механизмы | 232 |
| 5.3.3. Дуговые электрические печи | 237 |
| Список литературы | 241 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Возрастающие технологические требования к качеству производственных процессов, необходимость внедрения высоких технологий обуславливают устойчивую тенденцию внедрения в различные отрасли промышленного и сельскохозяйственного производства регулируемых электроприводов.

Развитие математической теории машин переменного тока, создание усовершенствованных силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе, использование современных средств управления, включая микропроцессорные, позволили создать высококачественные и надежные системы регулируемых асинхронных электроприводов, которые становятся основным видом регулируемого электропривода. Как указывается в [77], в 2002 г. на европейском рынке из общего числа продаваемых регулируемых приводов электроприводы переменного тока составили 68 %, электроприводы постоянного тока — 15 %, механические и гидравлические приводы — 17 %. Тенденция возрастания доли внедряемых регулируемых асинхронных электроприводов объективно сохранится и в дальнейшем, так как массовый регулируемый электропривод может быть реализован только на базе асинхронных двигателей. Это связано с тем, что в диапазоне мощностей до 100 кВт их производится в 40 — 50 раз больше, чем двигателей постоянного тока.

Широкое использование регулируемых электроприводов привело к тому, что современный электропривод является не только энергосиловой основой, позволяющей обеспечить производственные механизмы необходимой механической энергией, но и средством управления технологическими процессами, так как задачи по реализации качества производственных процессов в настоящее время в большинстве случаев возлагаются на системы управления регулируемыми электроприводами в сочетании с системами технологической автоматики. В связи с возрастанием цен на энергоносители, в частности на электроэнергию, и ограниченными возможностями увеличения мощности энергогенерирующих установок проблема энергосбережения, в том числе снижения электропотребления, приобретает особую актуальность.

Энергосбережение стало одним из приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира. Это связа-

но, во-первых, с ограниченностью и невозобновляемостью основных энергоресурсов, во-вторых, с непрерывно возрастающими сложностями их добычи и стоимостью, в-третьих, с глобальными экологическими проблемами, обозначившимися на рубеже тысячелетий.

Энергосбережение является наиболее дешевым и безопасным способом увеличения энергогенерирующих мощностей, так как затраты на экономию 1 кВт мощности обходятся в 4—5 раз дешевле, чем стоимость вновь вводимого 1 кВт мощности.

Основные потери (до 90 %) приходится на сферу энергопотребления, в которой должны быть сконцентрированы основные усилия по энергосбережению электроэнергии. Так как электроприводы потребляют до 70 % вырабатываемой электроэнергии, наиболее существенная экономия электроэнергии может быть достигнута при использовании регулируемых электроприводов для управления технологическими процессами, что в сочетании с возможностями автоматизации может обеспечить оптимальное использование электроэнергии и других ресурсов.

В связи с тем что среди регулируемых электроприводов доминирующее положение занимают частотно-регулируемые асинхронные электроприводы, их массовое применение позволяет решать не только технологические задачи, но и проблему энергосбережения.

В последние годы в России уделяется большое внимание теоретическим и практическим вопросам энергосбережения. Это связано в первую очередь с тем, что удельные затраты энергии на единицу стоимости валового внутреннего продукта (ВВП) и энергетическая составляющая себестоимости продукции в России выше, чем в других развитых странах. Можно утверждать, что в настоящее время многие отечественные научные и проектные организации, а также производственные предприятия достигли определенных успехов в энергосбережении и число таких организаций и предприятий, решающих проблемы энергосбережения, постоянно растет.

В учебном пособии в систематизированном виде изложен комплекс вопросов, связанных с возможностями энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов, главным образом частотно-управляемых; обоснованы рациональные способы применения энергосберегающего электропривода; намечены схемные решения, обеспечивающие энергосбережение при управлении различными технологическими процессами и производственными механизмами; дана количественная оценка снижения электропотребления и других ресурсов.

Использованы данные теоретических исследований в области регулируемых асинхронных электроприводов, проводившихся на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» (ЭАПУ) Уральского государственного технического универ-

ситета (УГТУ); результаты внедрения энергосберегающих асинхронных электроприводов, реализованных сотрудниками кафедры ЭАПУ при сотрудничестве с рядом организаций, а также отечественные и зарубежные публикации.

И. Я. Браславским написано предисловие, гл. 1, гл. 2 (кроме подразд. 2.4), подразд. 3.1.1, 3.1.2, 3.2.1, 3.2.2, 3.3.3, 4.4, а также подготовлены контрольные вопросы к гл. 1...5; З. Ш. Ишматовым — подразд. 3.3.1, 3.3.2, гл. 4 (кроме подразд. 4.4), гл. 5; В. Н. Поляковым — подразд. 2.4, 3.1.3, 3.1.4, 3.2.3, 3.3.4, 3.3.5.

Авторы выражают благодарность Т. М. Шерстюк, Т. В. Новиковой, И. В. Рыбалко за помощь при подготовке рукописи.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**1.1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
И ИХ ОЦЕНКА ПРИ ПИТАНИИ РЕГУЛИРУЕМЫХ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Рациональное электропотребление, а следовательно и энерго-сбережение, обеспечивается не только экономичностью использования электроэнергии потребителями (в частности, электропри-водами), но и зависит от качества электроэнергии питающей сети.

Качество электроэнергии оценивается следующими показате-лями [23].

Для трехпроводных сетей трехфазного тока нормируются допу-стимые значения отклонений напряжения и частоты, а также ха-рактеристики несимметрии напряжений промышленной частоты и несинусоидальности формы кривой напряжения.

Допустимое отклонение частоты, т. е. разность между ее теку-щим и номинальным значениями при медленном изменении, огра-ничивается значениями $\pm 0,1$ Гц. Колебания частоты, т. е. быстрые ее изменения, лимитируются значением $0,2$ Гц сверх допустимого значения ее отклонения. Эти нормативы относятся к номиналь-ному режиму работы системы электроснабжения и не распро-страняются на послеаварийный период.

Допустимые значения отклонений напряжения от номиналь-ного на зажимах электрических двигателей по условиям нормаль-ного пуска и управления должны находиться в пределах $-5 \dots +10 \%$. Дополнительное понижение напряжения в послеаварийных ре-жимах допускается не более чем на 5% .

Несимметрия напряжения характеризуется процентным отноше-нием напряжения обратной последовательности $U_{обр}$ к номиналь-ному напряжению сети $U_{ном}$, т. е. коэффициентом несимметрии

$$\epsilon_{несим} = \frac{U_{обр}}{U_{ном}} 100. \quad (1.1)$$

Несимметрия, при которой коэффициент $\epsilon_{несим} \leq 2 \%$ на выво-дах любого трехфазного симметричного электроприемника, счита-ется допустимой. На зажимах асинхронных двигателей несиммет-рия может быть больше, если нагрев двигателя с учетом влияния

отклонения напряжения прямой последовательности и высших гармоник при данном коэффициенте нагрузки не превышает допустимого значения.

Несинусоидальность напряжения характеризуется значением коэффициента несинусоидальности

$$k_{\text{несин}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_{\text{НОМ}}} 100, \quad (1.2)$$

где U_v — действующее значение напряжения v -й гармоники.

Допустимое значение коэффициента несинусоидальности составляет 5 % на выводах любого электроприемника. На выводах асинхронных двигателей допускается большее значение коэффициента несинусоидальности, если нагрев электродвигателей, определенный с учетом отклонения напряжения прямой последовательности и наличия напряжения обратной последовательности, будет находиться в пределах, установленных для данного коэффициента нагрузки. Включение между питающей сетью и двигателем полупроводниковых (тиристорных или транзисторных) преобразователей, обеспечивающих управление и регулирование асинхронных двигателей, может оказать существенное влияние на показатели качества электроэнергии питающей сети.

Вентильные преобразователи являются по существу системами дискретного управления параметрами электроэнергии, подводимой к асинхронному электродвигателю, т.е. двигатель питается несинусоидальным периодическим напряжением, в составе которого кроме основной присутствуют и высшие гармоники, что может привести к чрезмерному увеличению коэффициента несинусоидальности, возрастанию реактивной мощности [37] и необходимости решения задачи электромагнитной совместимости вентильных электроприводов с питающей сетью.

Степень влияния вентильных электроприводов на питающую сеть зависит от мощности источника питания, типа регулируемого электропривода и вентильного преобразователя, способа управления преобразователем и др.

Влияние различных типов асинхронных регулируемых вентильных электроприводов на питающую сеть и их энергетические показатели будут рассмотрены далее.

1.2. СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ

Основными типами регулируемого электропривода являются следующие системы: «полупроводниковый преобразователь — двигатель

постоянного тока» (ПП — ДПТ) и «полупроводниковый преобразователь частоты—асинхронный двигатель» (ППЧ — АД). Однако частотно-регулируемые электроприводы переменного тока постепенно вытесняют приводы постоянного тока. Современные преобразователи частоты обеспечивают регулирование скорости асинхронных двигателей, по качеству не уступающих приводам постоянного тока.

Преимущества асинхронного короткозамкнутого двигателя по сравнению с двигателями постоянного тока, такие как высокая надежность, меньшая стоимость, простота изготовления и эксплуатации, в сочетании с высокими регулировочными и динамическими показателями превращают асинхронный частотно-регулируемый электропривод в доминирующий тип регулируемого электропривода, массовое применение которого позволяет решать не только технологические задачи, но и проблему энергосбережения.

Современная тенденция характеризуется возрастанием применения регулируемых электроприводов. По некоторым данным ежегодный рост мирового рынка продаж электроприводов постоянного и переменного тока составляет 7 %. Причем в общем объеме продаваемых электроприводов ежегодно возрастает доля асинхронных электроприводов, так в 1990 г. она составила 60 %, в 1995 г. — 75 %, в 2002 г. — 82 %.

Далее будут проанализированы возможности энергосбережения только при использовании регулируемых асинхронных электроприводов.

1.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МОДЕЛИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Располагая математическим описанием процессов работы асинхронного двигателя в статическом и динамическом режимах, можно получить временные зависимости токов статора и ротора, определить потери в асинхронной машине, проанализировать возможности их снижения при использовании энергосберегающих алгоритмов управления электроприводом в переходных и установившихся режимах и выбрать рациональные по электропотреблению способы и законы управления асинхронными двигателями.

Для математического описания процессов в асинхронной машине обычно используются дифференциальные уравнения обобщенной двухфазной машины переменного тока [32, 33, 71], полученные при общепринятых допущениях (без учета потерь в стали, высших гармоник магнитного поля при равномерном воздушном зазоре и напряжении питания, являющимися симметричной системой синусоидальных напряжений). Предполагается также, что параметры роторной цепи приведены к статорному контуру.

Исходные уравнения, записанные с использованием обобщенных пространственных векторов в системе координат, вращающихся с произвольной скоростью ω_k (при отсутствии внешних источников напряжения в роторных цепях) имеют вид:

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 R_1 + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_1 + j\omega_k \bar{\Psi}_1; \quad (1.3)$$

$$0 = \bar{I}_2 R_2 + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_2 + j(\omega_k - \omega_3) \bar{\Psi}_2;$$

$$M = \frac{3}{2} p_{\text{п}} L_0 J_m [\bar{I}_1 \times \bar{I}_2^*], \quad (1.4)$$

где \bar{U}_1 — обобщенный вектор напряжения статора; \bar{I}_1, \bar{I}_2 — обобщенные векторы тока соответственно статора, ротора; R_1, R_2 — активное сопротивление обмотки соответственно статора, ротора; $\bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2$ — обобщенные векторы потокосцепления соответственно статора, ротора; ω_k — электрическая угловая скорость вращения координатных осей; ω_3 — электрическая угловая скорость вращения ротора,

$$\omega_3 = \omega p_{\text{п}}, \quad (1.5)$$

где ω — механическая угловая скорость ротора; M — электромагнитный момент, развиваемый двигателем; $p_{\text{п}}$ — число пар полюсов асинхронной машины; L_0 — индуктивность намагничивающего контура; J_m — знак, указывающий на то, что берется только вещественная часть комплекса.

Для исследования переходных процессов система уравнений (1.3) и уравнение (1.4) дополняются уравнением движения электропривода:

$$M - M_c = \frac{J}{p_{\text{п}}} \frac{d\omega_3}{dt}, \quad (1.6)$$

где M_c — момент статической нагрузки; J — приведенный к валу суммарный момент инерции электропривода, $J = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}}$; $J_{\text{дв}}$ и $J_{\text{мех}}$ — момент инерции двигателя и приведенный к валу двигателя момент инерции механизма.

Система уравнений (1.3), записанная через проекции обобщенных векторов на ортогональные оси u, jv координатной плоскости, вращающейся с произвольной скоростью ω_k , имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} u_{1u} &= R_1 i_{1u} + p \Psi_{1u} - \omega_k \Psi_{1pv}; \\ u_{1v} &= R_1 i_{1v} + p \Psi_{1v} + \omega_k \Psi_{1u}; \\ 0 &= R_2 i_{2u} + p \Psi_{2u} - (\omega_k - \omega_3) \Psi_{2v}; \\ 0 &= R_2 i_{2v} + p \Psi_{2v} + (\omega_k - \omega_3) \Psi_{2u}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где p — оператор дифференцирования.

В этом случае электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем, может быть определен из выражения

$$M = \frac{3}{2} p_{\text{п}} L_0 (i_{2u} i_{1v} - i_{1u} i_{2v}). \quad (1.8)$$

Рациональное значение $\omega_{\text{к}}$ зависит от типа решаемой задачи и, как правило, принимает одно из следующих значений: $\omega_{\text{к}} = 0$ (в этом случае принято обозначать координатные оси $\alpha, j\beta$); $\omega_{\text{к}} = \omega_{0\text{э}}$ (координатные оси x, jy); $\omega_{\text{к}} = \omega_{\text{э}}$ (координатные оси d, jq). Здесь $\omega_{0\text{э}}$ — электрическая угловая скорость электромагнитного поля статора. Эта величина соответствует электрической скорости холостого хода. Заметим, что механическая угловая скорость холостого хода, она же — синхронная скорость, $\omega_0 = \omega_{0\text{э}}/p_{\text{п}}$.

Отметим, что, обозначая угловую скорость через ω и измеряя ее с^{-1} , зачастую определение «угловая» опускают и оперируют термином «скорость».

Связь между полным потокосцеплением статора $\bar{\psi}_1$, ротора $\bar{\psi}_2$, главным потокосцеплением $\bar{\psi}_0$ и токами статора i_1 и ротора i_2 ненаасыщенной асинхронной машины выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_1 &= L_s \bar{I}_1 + L_0 \bar{I}_2; \\ \bar{\psi}_2 &= L_r \bar{I}_2 + L_0 \bar{I}_1, \end{aligned} \quad (1.9)$$

где $L_s = L_0 + L_{1\sigma}$ — полная индуктивность обмотки статора; $L_{1\sigma}$ — индуктивность рассеяния обмотки статора; $L_r = L_0 + L_{2\sigma}$ — полная индуктивность обмотки ротора; $L_{2\sigma}$ — индуктивность рассеяния обмотки ротора.

Если учесть, что $\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \bar{I}_2$, то выражения (1.9) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_1 &= L_{1\sigma} \bar{I}_1 + \bar{\psi}_0; \\ \bar{\psi}_2 &= L_{2\sigma} \bar{I}_2 + \bar{\psi}_0, \end{aligned} \quad (1.10)$$

где $\bar{\psi}_0 = L_0 \bar{I}_0$; $L_{1\sigma} \bar{I}_1 = \bar{\psi}_{1\sigma}$; $L_{2\sigma} \bar{I}_2 = \bar{\psi}_{2\sigma}$; $\bar{\psi}_{1\sigma}$, $\bar{\psi}_{2\sigma}$ — потокосцепления рассеяния соответственно статора, ротора.

Запишем выражения для потокосцеплений через проекции на оси комплексной плоскости:

$$\begin{aligned} \psi_{1u} &= \psi_{0u} + L_{1\sigma} i_{1u}; \\ \psi_{1v} &= \psi_{0v} + L_{1\sigma} i_{1v}; \\ \psi_{2u} &= \psi_{0u} + L_{2\sigma} i_{2u}; \\ \psi_{2v} &= \psi_{0v} + L_{2\sigma} i_{2v}; \\ \psi_{0u} &= L_0 i_{0u}; \\ \psi_{0v} &= L_0 i_{0v}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

При необходимости учета насыщения целесообразно использовать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 \bar{\Psi}_1 &= \bar{\Psi}_0 + \bar{\Psi}_{1\sigma}; \\
 \bar{\Psi}_2 &= \bar{\Psi}_0 + \bar{\Psi}_{2\sigma}; \\
 \bar{\Psi}_0 &= L_0 \left(|\bar{I}_0| \right) \bar{I}_0; \\
 \bar{I}_0 &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2; \\
 \bar{\Psi}_{1\sigma} &= L_{1\sigma} \bar{I}_1; \\
 \bar{\Psi}_{2\sigma} &= L_{2\sigma} \bar{I}_2.
 \end{aligned}
 \tag{1.12}$$

В системе уравнений (1.12) переменная индуктивность $L_0(|\bar{I}_0|)$, с помощью которой учитывается насыщение двигателя по главному магнитному пути, рассчитывается по кривой намагничивания:

$$L_0(|\bar{I}_0|) = \frac{\psi_0(|\bar{I}_0|)}{(|\bar{I}_0|)},$$

где $\psi_0(|\bar{I}_0|)$ — нелинейная функция (характеристика намагничивания, определяющая связь между модулем $|\bar{\Psi}_0|$ результирующего вектора главных потокосцеплений $\bar{\Psi}_0$ и модулем $|\bar{I}_0|$ результирующего вектора намагничивающих токов \bar{I}_0).

В ряде случаев для вычисления индуктивности удобно использовать выражение

$$L_0(|\bar{\Psi}_0|) = \frac{(|\bar{\Psi}_0|)}{I_0(|\bar{\Psi}_0|)},$$

где $I_0(|\bar{\Psi}_0|)$ — обратная по отношению $\psi_0(|\bar{I}_0|)$ нелинейная функция.

Приведенные уравнения могут быть использованы для анализа как переходных (в этом случае система уравнений асинхронной машины является нелинейной и может быть решена численными методами с использованием ЭВМ), так и установившихся режимов.

Для анализа установившихся режимов при переменной частоте питающего напряжения ($f_1 \neq \text{const}$) примем в системе уравнений (1.3) скорость $\omega_k = \omega_{0\pi} = 2\pi f_1$, производные примем равными нулю, тогда получим следующую модель, описывающую установившийся режим работы двигателя:

$$\begin{aligned}
\bar{U}_1 &= j\omega_{0\varepsilon}\bar{\psi}_1 + R_1\bar{I}_1; \\
0 &= j(\omega_{0\varepsilon} - \omega_\varepsilon)\bar{\psi}_2 + R_2\bar{I}_2; \\
\bar{\psi}_1 &= \bar{\psi}_0 + \bar{\psi}_{1\sigma}; \\
\bar{\psi}_2 &= \bar{\psi}_0 + \bar{\psi}_{2\sigma}; \\
\bar{\psi}_0 &= L_0 \left(|\bar{I}_0| \right) \bar{I}_0; \\
\bar{I}_0 &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2; \\
\bar{\psi}_{1\sigma} &= L_{1\sigma}\bar{I}_1; \\
\bar{\psi}_{2\sigma} &= L_{2\sigma}\bar{I}_2; \\
M &= \frac{3}{2} p_n \operatorname{Im} [\bar{\psi}_0 \times \bar{I}_1]; \\
M &= M_c.
\end{aligned} \tag{1.13}$$

На основании уравнений установившегося режима построим схему замещения асинхронного двигателя при переменном значении f_1 . Для этого в уравнениях электрического равновесия напряжений исключим результирующие векторы полных потокоцеплений обмоток статора $\bar{\psi}_1$ и ротора $\bar{\psi}_2$. В полученных уравнениях выразим результирующие векторы главных потокоцеплений $\bar{\psi}_0$ и потокоцеплений рассеяния обмоток статора $\bar{\psi}_{1\sigma}$ и ротора $\bar{\psi}_{2\sigma}$ через результирующие токи соответственно \bar{I}_0 , \bar{I}_1 и \bar{I}_2 . После несложных преобразований получим уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned}
\bar{U}_1 &= R_1\bar{I}_1 + j\omega_{0\varepsilon}L_{1\sigma}\bar{I}_1 + j\omega_{0\varepsilon}L_0\bar{I}_0; \\
0 &= \frac{R_2}{S}\bar{I}_2 + j\omega_{0\varepsilon}L_{2\sigma}\bar{I}_2 + j\omega_{0\varepsilon}L_0\bar{I}_0,
\end{aligned} \tag{1.14}$$

где $S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{0\varepsilon} - \omega_\varepsilon}{\omega_{0\varepsilon}}$ — скольжение; $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n}$; $\omega_{0\varepsilon} = 2\pi f_1$.

Системе уравнений (1.14) соответствует схема замещения асинхронного двигателя при переменной частоте питающего напряжения, приведенная на рис. 1.1.

В схеме замещения учтено насыщение асинхронного двигателя с помощью переменного коэффициента L_0 , являющегося функцией тока намагничивания $|\bar{I}_0|$.

Наведенные в электромагнитных контурах ЭДС можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
\bar{E}_1 &= j\omega_{0\varepsilon}\bar{\psi}_1; \\
\bar{E}_0 &= j\omega_{0\varepsilon}\bar{\psi}_0; \\
\bar{E}_2 &= j\omega_{0\varepsilon}\bar{\psi}_2.
\end{aligned}$$

Схема замещения, приведенная на рис. 1.1, может использоваться для анализа установившихся режимов асинхронного двигателя при частотном способе регулирования угловой скорости.

В системах асинхронных электроприводов с регулированием напряжения первой гармоники переменного напряжения или добавочного сопротивления в роторе частота питающего напряжения остается постоянной и равной номинальному значению, т. е. $f_1 = f_{1\text{ном}}$ и $\omega_{0\text{э}} = \omega_{0\text{э,ном}} = 2\pi f_{1\text{ном}}$. Для этих случаев уравнения статических режимов приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{I}_1 R_1 + j\bar{I}_1 X_1 + j\bar{I}_0 X_0; \\ 0 &= \bar{I}'_2 R'_2 + j\bar{I}_0 X_0 S + j\bar{I}'_2 X'_2 S, \end{aligned} \quad (1.15)$$

где $X_1 = \omega_{0\text{э,ном}} L_{1\sigma}$; $X'_2 = \omega_{0\text{э,ном}} L_{2\sigma}$; $X_0 = \omega_{0\text{э,ном}} L_0$; X_1, X'_2 — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток соответственно статора, ротора; X_0 — индуктивное сопротивление контура намагничивания.

В уравнениях статических режимов (1.15) с помощью $\bar{I}'_2, \bar{R}'_2, X'_2$ обозначены параметры ротора, приведенные к параметрам обмотки статора, а выражение $\bar{I}_0 X_0$ представляет собой ЭДС контура намагничивания:

$$\bar{E}_0 = j\bar{I}_0 X_0 = j\omega_{0\text{э,ном}} L_0 \bar{I}_0. \quad (1.16)$$

С учетом (1.16) система уравнений (1.15) будет представлять собой систему уравнений статического режима работы асинхронного двигателя при $f_1 = f_{1\text{ном}}$, которому соответствует Т-образная схема замещения (см. рис. 1.1).

Часто для упрощения анализа статических режимов используют Г-образную схему замещения, для чего подключают контур намагничивания непосредственно к зажимам питающего напряжения, что не вносит существенных погрешностей в расчеты. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя в статических режимах приведена на рис.1.2. В такой схеме ток $I_0 = U_1/X_0$

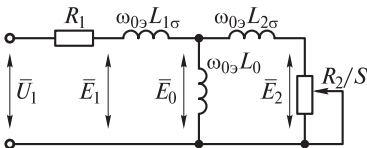


Рис. 1.1. Схема замещения асинхронного двигателя при переменной частоте питающего напряжения

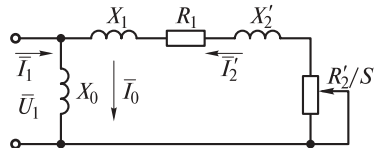


Рис. 1.2. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя в статических режимах

остается в процессе работы двигателя постоянным и не зависит от скорости (скольжения) двигателя.

Приведенные при $f_1 = f_{1\text{ном}}$ уравнения статических режимов (1.15) и схема замещения (см. рис. 1.2) могут быть использованы для исследования свойств и характеристик асинхронного электропривода как при регулировании напряжения U_1 , подводимого к статору, так и при регулировании добавочных сопротивлений ротора $R_{2\text{доб}}$. Это можно реализовать в асинхронных двигателях с контактными кольцами, для чего в схеме замещения вместо R'_2 нужно использовать значение $R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{2\text{доб}}$. Для двигателей с короткозамкнутым ротором $R'_{2\Sigma} = R'_2$. Тогда ток ротора

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_{2\Sigma}/S^2) + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (1.17)$$

При известном токе ротора можно определить статорный ток:

$$I_1^2 = I_0^2 + (I_{1\text{ном}}^2 - I_0^2) \frac{(I'_2)^2}{(I'_{2\text{ном}})^2}, \quad (1.18)$$

где $I_{1\text{ном}}$ и $I'_{2\text{ном}}$ — соответственно номинальный ток статора, приведенный номинальный ток ротора.

Выражение (1.18) может быть преобразовано следующим образом:

$$I_1^2 = I_0^2 + (I_{1\text{ном}}^2 - I_0^2) \frac{MS}{M_{\text{ном}} S_{\text{ном}}}, \quad (1.19)$$

где $M_{\text{ном}}$ и $S_{\text{ном}}$ — соответственно номинальный момент и скольжение двигателя.

Момент двигателя

$$M = \frac{3U_1^2 R'_{2\Sigma}}{\omega_0 S \left[(R_1 + R'_{2\Sigma})^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}. \quad (1.20)$$

Называемый критическим максимальный момент двигателя

$$M_{\text{к}} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}. \quad (1.21)$$

Критическое скольжение, соответствующее критическому моменту,

$$S_k = \pm \frac{R'_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (1.22)$$

В формулах (1.21) и (1.22) знак «+» соответствует двигательному режиму работы двигателя, а знак «-» — тормозному. Используя формулы (1.21) и (1.22), можно получить уточненную формулу Клосса для записи зависимости момента асинхронного двигателя от скольжения:

$$M = \frac{2M_k (1 + aS_k)}{S/S_k + S_k/S + 2aS_k}, \quad (1.23)$$

где $a = R_1/R'_{2\Sigma}$.

В ряде случаев используют упрощенную формулу Клосса, приняв $a = 0$. Тогда

$$M = \frac{2M_k}{S/S_k + S_k/S}. \quad (1.24)$$

При исследовании переходных режимов систему уравнений (1.3), формулы (1.4) и (1.5) записывают обычно в относительных единицах [63, 71, 76]. Рациональный выбор системы базовых единиц зависит от типа анализируемого асинхронного электропривода и исследуемых задач [63].

Приведенное математическое описание переходных и установившихся процессов в асинхронном двигателе показывает, что управляющими воздействиями, изменяющими характеристики двигателя, являются амплитуда (или действующее значение) переменного питающего напряжения, частота и амплитуда переменного напряжения, подводимого к статору, суммарное активное сопротивление роторных цепей (для двигателей с фазным ротором, когда можно изменять значение добавочного сопротивления ротора).

В современных системах электропривода регулирование указанных параметров производится с использованием различных типов полупроводниковых преобразователей, поэтому исходные выражения должны быть дополнены математическим описанием и моделями рассматриваемых типов преобразователей с учетом систем управления ими, что позволит анализировать процессы в системе «преобразователь — асинхронный двигатель». В зависимости от рассматриваемого класса регулируемых асинхронных электроприводов и исследуемых режимов анализ процессов может быть проведен с учетом полигармонического состава питающего напряжения при использовании полупроводниковых преобразователей или

только по гладкой (полезной) составляющей питающего напряжения, а также с учетом насыщения магнитной цепи асинхронной машины или при постоянстве параметров и др. Эти вопросы будут проанализированы в гл. 2.

1.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ В ЭНЕРГОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Известно, что главной энергосиловой основой современного производства является электропривод, с помощью которого поступающая электроэнергия преобразуется в механическую и доставляется к рабочему органу. Очевидно, энергоемкость технологического процесса или производственного механизма зависит от особенностей его работы, способов управления потоком электроэнергии, подводимой к двигателю (электромеханическому преобразователю), рабочих характеристик производственного механизма (тахограммы работы, зависимости требуемой мощности на отдельных участках цикла работы, необходимости регулирования скорости, наличия участков с переменной, или изменяющейся, производительностью) и т.д.

Современные технологические процессы и механизмы требуют управления (регулирования) технологических параметров и протекают оптимально (по производственным требованиям и энергопотреблению), если в системе управления имеется возможность воздействия на процесс регулирования производительности, интенсивности, показателей качества.

Приводной двигатель выбирается по мощности на максимальную производительность. При необходимости регулирования производительности и технологических параметров используются следующие способы управления процессом:

1) при нерегулируемом электроприводе через механическую часть (дресселирование, задвижки, клапаны и др.);

2) при регулируемом электроприводе через систему управления электроприводом, обеспечивающую требуемый вид пускотормозных процессов и регулируемых по скорости режимов.

Взаимодействие приводной машины (привода) и приводи-

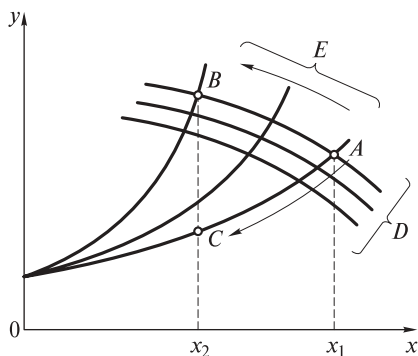


Рис. 1.3. Характеристики взаимодействия привода и приводной системы

мой системы можно представить с помощью характеристик, приведенных на рис. 1.3, на котором буквой D отмечено семейство характеристик электропривода при разных скоростях вращения, E — характеристики нагрузки приводимой системы. По оси x откладываются кинетическая энергия, скорость, расход. Интервал $x_1 \dots x_2$ характеризует производительность, которую можно обеспечить. По оси y откладывают значения потенциальной энергии, противодействующего момента, высоту напора и т. д., т. е. обычно это значение противодействующей нагрузки, которую приводу необходимо преодолеть. Точки пересечения приводной характеристики (из семейства характеристик D) и характеристики нагрузки (из семейства характеристик E) — это рабочие точки. Производительность привода можно менять либо путем регулирования нагрузки, т. е. за счет механической части, когда при уменьшении производительности с x_1 до x_2 приводимая система переходит из точки A в точку B , что приводит к возрастанию противодействующего момента и, следовательно, к увеличению потребляемой мощности и энергии, либо путем регулирования скорости электропривода, т. е. применением регулируемого электропривода, когда при уменьшении нагрузки с x_1 до x_2 система переходит из точки A в точку C , что снижает противодействующий момент и, следовательно, уменьшает потребляемую мощность и энергию по сравнению с регулированием нагрузкой.

Ясно, что использование регулируемого привода, в частности электропривода, в сочетании с системами технологической автоматики позволяет более гибко, плавно, динамично и, главное, энергетически экономнее воздействовать на производственный процесс, поэтому в настоящее время преобладает и постоянно расширяется тенденция передачи управления технологическим процессом от механической части системе автоматизированного регулируемого электропривода, что позволяет обеспечить наилучшие показатели качества производственного процесса и обеспечить значительное снижение энергопотребления и других ресурсов.

Рассмотрим эту тенденцию на примерах, которые далее будут расширены и дополнены конкретными технико-экономическими показателями, подтверждающими обоснованность внедрения регулируемых асинхронных электроприводов для управления многими производственными механизмами.

Турбомеханизмы. Электроприводы механизмов этого класса (насосы, вентиляторы, компрессоры и др.) потребляют около 25% всей вырабатываемой электроэнергии. До последнего времени в подавляющем большинстве случаев в качестве привода указанных механизмов использовался нерегулируемый асинхронный двигатель, подключаемый напрямую к номинальному напряжению сети, а для регулирования расхода (подачи) применялось механическое управление через дроссель, заслонку, клапан и др. Применение

частотно-регулируемого асинхронного электропривода позволяет решить ряд технологических задач (снизить или полностью ликвидировать гидравлические удары, обеспечить требуемый уровень напора в системе) и одновременно с помощью системы автоматического управления (САУ) скоростью двигателя по поддержанию постоянства напора существенно снизить энергопотребление и расход ресурсов.

Лифты. Механизмы перемещения подавляющего большинства пассажирских лифтов, номинальная скорость которых составляет 0,7...1 м/с, оборудуются двухскоростными короткозамкнутыми асинхронными двигателями. В начале перемещения (подъема или опускания) высокоскоростная обмотка асинхронного двигателя подключается контакторами к номинальному напряжению сети 380 В, что приводит к возникновению значительных знакопеременных ударных моментов из-за электромагнитных переходных процессов в асинхронной машине. Чтобы в какой-то мере обеспечить требования по ограничению ускорений в период разгона, увеличивают в 8 — 10 раз момент инерции электропривода по сравнению с собственным моментом инерции двигателя, присоединяя для этого к лебедке высокоинерционный шкив, т.е. технологически задача решается за счет механической части электропривода. Потери энергии в переходных процессах (при прямом пуске и торможении) линейно зависят от суммарного момента инерции и, следовательно, возрастают при его увеличении [32]. Задача ограничения производной ускорения, или «рывка», на начальном этапе переходного процесса не решается. При подходе к месту остановки асинхронный двигатель при незатухшем поле переключается на низкоскоростную обмотку, чтобы обеспечить режим пониженной скорости. Такое переключение сопровождается значительными ударными переходными моментами двигателя, что оказывает отрицательное влияние на механическую часть электропривода лифта, снижая ее надежность и срок службы. Таким образом, существующая система управления лифтом не удовлетворяет современным технологическим требованиям, а работа его электропривода связана с повышенным энергопотреблением.

При использовании для пассажирских лифтов системы «полупроводниковый преобразователь частоты — односкоростной асинхронный короткозамкнутый двигатель» необходимые технологические требования обеспечиваются системой управления электроприводом. В этом случае происходит плавный пуск электропривода с ограничением ускорений и рывков, ликвидируются ударные моменты двигателя, исключается использование добавочного инерционного шкива, снижается момент инерции электропривода, так как его значение у односкоростного двигателя существенно меньше, чем у двухскоростного.

Кроме того, при использовании частотно-регулируемого электропривода удастся резко снизить энергопотребление за счет использования так называемого частотного пуска и уменьшения суммарного момента инерции системы.

Подъемные краны. Большинство крановых механизмов (в частности, механизмы подъема) снабжено асинхронными двигателями с фазным ротором. Процесс пуска осуществляется по характеристикам реостатного управления, когда из ротора дискретно выводятся ступени сопротивления. Во многих случаях торможение крана осуществляется за счет использования режима противовключения двигателя. Частые переключения из двигательного в тормозной режим при подходе к заданной точке останова механизма перемещения крана приводят к возникновению максимальных ударных моментов двигателя, ускоренному выходу его из строя и снижению времени безаварийной работы. Режим пониженной скорости обеспечивается введением в ротор сопротивлений, что связано с возрастанием скольжения двигателя и увеличением электрических потерь [32]. Следовательно, применяемая система асинхронного электропривода не решает технологических задач и приводит к повышенному энергопотреблению.

Использование частотно-регулируемого асинхронного электропривода с короткозамкнутым асинхронным двигателем позволяет существенно повысить надежность работы подъемного крана, увеличить период его безаварийной работы и уменьшить энергопотребление.

Приведенные примеры и также другие, описанные в различных источниках, иллюстрируют общую тенденцию перехода в широких масштабах к регулируемому асинхронному электроприводу, передачи функций управления технологическим процессом системе управления электроприводом в сочетании с технологической автоматикой, что приводит к удовлетворению возрастающих производственных требований при переходе к регулируемому электроприводу и снижению энергопотребления. Предварительные расчеты показывают, что при широком внедрении частотно-регулируемых асинхронных электроприводов можно сэкономить 7... 10 % вырабатываемой электроэнергии [81].

Контрольные вопросы

1. Какие основные показатели качества электроэнергии питающей сети вы знаете?
2. Как определяется коэффициент несинусоидальности питающего напряжения?
3. Какие типы регулируемых электроприводов наиболее широко применяются в настоящее время и почему?
4. Какая формула связывает механическую и электрическую скорость вращения ротора?

5. Как учитывается насыщение двигателя по главному магнитному пути при расчете характеристик двигателя?

6. Каким выражением определяется скольжение асинхронного двигателя?

7. Изобразите схему замещения асинхронного двигателя при постоянстве частоты питающего переменного напряжения, равной номинальному значению.

8. За счет изменения каких параметров или управляющих воздействий можно реализовать регулировочные характеристики асинхронных двигателей?

9. Почему наиболее целесообразно управлять технологическим процессом, используя систему автоматизированного регулируемого электропривода?

10. Какие примеры применения регулируемого асинхронного электропривода для улучшения показателей качества технологического процесса и снижения энергопотребления вы можете привести?

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящее время основным типом регулируемого электропривода, энергосберегающим возможностям которого и будет уделено основное внимание в этой главе, является частотно-регулируемый асинхронный электропривод — система «полупроводниковый преобразователь частоты — асинхронный двигатель» (ППЧ — АД). Однако наряду с этим электроприводом в некоторых случаях для решения отдельных производственных задач и энергосбережения находит применение система «тиристорный преобразователь напряжения — асинхронный двигатель» (ТПН — АД), обеспечивающая регулирование напряжения первой гармоники напряжения, подводимого к статору.

В эксплуатации также находятся электроприводы на основе асинхронных двигателей с фазовым ротором, регулируемые за счет изменения добавочных сопротивлений в роторных цепях, так называемые системы реостатного регулирования — «устройство реостатного регулирования — асинхронный двигатель с фазовым ротором» (УРР — АДФР). Особенно много таких электроприводов входит в состав подъемно-транспортных механизмов.

Для количественной оценки выигрыша в энергопотреблении при замене, например, электропривода с фазным ротором системой ППЧ — АД необходимо располагать энергетическими показателями всех систем регулируемых асинхронных электроприводов: УРР — АДФР, ТПН — АД, ППЧ — АД.

Для оценки энергетической эффективности работы различных типов регулируемых асинхронных электроприводов целесообразно ввести и проанализировать обобщенные энергетические показатели для установившихся и переходных режимов электропривода.

Для статических режимов в качестве основных энергетических показателей могут быть использованы коэффициент полезного действия η , являющийся мерой экономичности преобразования электрической энергии в механическую, и коэффициент мощности k_m , который является мерой экономичности потребления электроэнергии из сети и используется вместо понятия $\cos \phi$ в

цепях с несинусоидальными токами, что характерно для электроприводов, управляемых от вентильных преобразователей. При анализе процессов по основной гармонике (гладкой составляющей) без учета высших гармоник можно, как и в традиционном рассмотрении, использовать понятие $\cos \varphi$.

Рассмотрим общие выражения для определения η и k_m , которые будут конкретизированы при анализе различных типов электроприводов.

Используя методы определения активной P , реактивной Q и полной S мощностей в трехфазных цепях переменного тока при управлении от вентильных преобразователей [37], получим выражения для отыскания η и k_m при синусоидальном напряжении питающей сети. Выражение для k_m выглядит следующим образом:

$$k_m = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2 + H^2}}, \quad (2.1)$$

где P и S — активная и полная мощности, потребляемые от сети переменного тока трехфазной нагрузкой; Q — реактивная мощность, или мощность сдвига трехфазной нагрузки, обусловленная сдвигом по фазе основной гармоники тока нагрузки относительно синусоидального напряжения питающей сети; T — мощность искажения, обусловленная наличием в составе несинусоидального периодического тока, кроме основной, высших гармоник; H — мощность несимметрии, учитывающая дополнительные потери энергии, связанные с неравномерной загрузкой фаз трехфазной нагрузки. Большинство применяемых для управления асинхронным двигателем преобразователей обеспечивают симметричную, равномерную загрузку фаз двигателя, поэтому $H = 0$.

Значения мощностей S и P в установившемся режиме записываются в следующем виде [37]:

$$S = U_{\text{л}} \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1B}^2 + I_{1C}^2};$$

$$P = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} (I_{1A1} \cos \varphi_{1A} + I_{1B1} \cos \varphi_{1B} + I_{1C1} \cos \varphi_{1C}). \quad (2.2)$$

Тогда

$$k_m = \frac{P}{S} = \frac{I_{1A1} \cos \varphi_{1A} + I_{1B1} \cos \varphi_{1B} + I_{1C1} \cos \varphi_{1C}}{\sqrt{3(I_{1A}^2 + I_{1B}^2 + I_{1C}^2)}}; \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P} = \frac{\sqrt{3} M_c \omega}{U_{\text{л}} (I_{1A1} \cos \varphi_{1A} + I_{1B1} \cos \varphi_{1B} + I_{1C1} \cos \varphi_{1C})}, \quad (2.4)$$

где U_n — номинальное действующее линейное напряжение трехфазной сети; I_{1A}, I_{1B}, I_{1C} — действующие значения токов фазы соответственно A, B, C статора; $I_{1A1}, I_{1B1}, I_{1C1}$ — действующие значения первой гармоники токов фаз A, B, C статора; $\varphi_{1A}, \varphi_{1B}, \varphi_{1C}$ — фазный сдвиг первой гармоники статорного тока фаз A, B, C по отношению к напряжению фазы A, B, C питающей сети; $P_{\text{мех}}$ — механическая мощность на валу асинхронного двигателя, $P_{\text{мех}} = M_c \omega$.

Статорные токи отдельных фаз двигателя, как правило, симметричны. В этом случае $I_{1A} = I_{1B} = I_{1C} = I_1$; $\varphi_{1A} = \varphi_{1B} = \varphi_{1C} = \varphi_1$; $I_{1A1} = I_{1B1} = I_{1C1} = I_{11}$, где I_1 — действующий ток фазы статора; I_{11} — действующий ток первой гармоники фазы статора. Тогда

$$k_m = \frac{I_{11}}{I_1} \cos \varphi_1 = k_{\text{и}} \cos \varphi_1; \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{M_c \omega}{\sqrt{3} U_n I_{11} \cos \varphi_1}, \quad (2.6)$$

где $k_{\text{и}} = \frac{I_{11}}{I_1}$ — коэффициент искажения.

Для оценки нагрева обмоток двигателя высшими гармониками и определения возрастания потерь при полигармонических токах по сравнению с синусоидальными введем коэффициенты перегрузки по токам статора $k_{\text{п1}}$ и ротора $k_{\text{п2}}$. При симметричных режимах значения $k_{\text{п}}$ для отдельных фаз статора и ротора одинаковы:

$$\begin{aligned} k_{\text{п1}} &= I_1 / I_{11}; \\ k_{\text{п2}} &= I_2 / I_{21}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где I_2 — действующий ток фазы ротора; I_{21} — действующее значение первой (основной) гармоники тока ротора.

В качестве показателя экономичности работы электропривода в переходных режимах используем значение энергии потерь за время переходного процесса $\Delta W_{\text{п.п}}$. Очевидно, в общем случае

$$\Delta W_{\text{п.п}} = \int_0^{t_{\text{п.п}}} \Delta P_{\text{дв}} dt, \quad (2.8)$$

где $t_{\text{п.п}}$ — время переходного процесса; $\Delta P_{\text{дв}}$ — суммарная мощность потерь в двигателе:

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{1\text{м}} + \Delta P_{2\text{м}} + \Delta P_{1\text{с}} + \Delta P_{2\text{с}} + \Delta P_{\text{доп}} + \Delta P_{\text{мех}}, \quad (2.9)$$

где $\Delta P_{1м}$, $\Delta P_{2м}$ — потери в меди соответственно статора, ротора асинхронного двигателя (для асинхронных двигателей с фазовым ротором вместо $\Delta P_{2м}$ используется величина $\Delta P_{2м\sigma}$ — полные потери в роторной цепи двигателя); $\Delta P_{1с}$, $\Delta P_{2с}$ — потери в стали соответственно статора, ротора; $\Delta P_{доп}$ — дополнительные потери; $\Delta P_{мех}$ — механические потери.

В зависимости от типа анализируемого асинхронного электропривода отдельные составляющие потерь в формуле (2.9) могут быть незначительными в общем балансе потерь ($\Delta P_{дв}$) и их можно не учитывать при определении $\Delta W_{п.п}$. В ряде случаев потери в полупроводниковом преобразователе $\Delta P_{пр}$, от которого питается асинхронный двигатель, могут оказаться существенными и потребуются их учет при определении $\Delta W_{п.п}$, т. е.

$$\Delta W_{п.п} = \int_0^{t_{п.п}} (\Delta P_{дв} + \Delta P_{пр}) dt = \int_0^{t_{п.п}} \Delta P_{эп} dt,$$

где $\Delta P_{пр}$ — потери в преобразователе; $\Delta P_{эп}$ — потери в электроприводе, $\Delta P_{эп} = \Delta P_{дв} + \Delta P_{пр}$.

Эти вопросы будут конкретизированы при рассмотрении разных типов электроприводов.

Еще один аспект, требующий рассмотрения, — это особенности математического описания и модели полупроводниковых преобразователей, которые используются для регулирования асинхронного двигателя, и систем управления ими. Точную картину процессов в асинхронном электроприводе (гармонический состав питающих двигатель токов, оценку энергетических показателей, учет влияния полупроводниковых электроприводов на питающую сеть и др.) можно получить, анализируя совместную работу системы «преобразователь — двигатель» с использованием взаимосвязанного математического описания указанных элементов системы. Особенности моделирования и описания различных систем «преобразователь — асинхронный двигатель» с учетом систем управления будут рассмотрены далее.

2.2. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С РЕОСТАТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Реостатное регулирование может быть использовано только для асинхронных двигателей с фазовым ротором, когда в процессе управления изменяется значение добавочного $R_{2доб}$ и полного $R_{2\sigma}$ сопротивлений в роторных цепях. Схемы силовых цепей асинхронных электроприводов с реостатным регулированием при ступенчатом и плавном изменении $R_{2доб}$ показаны на рис. 2.1.

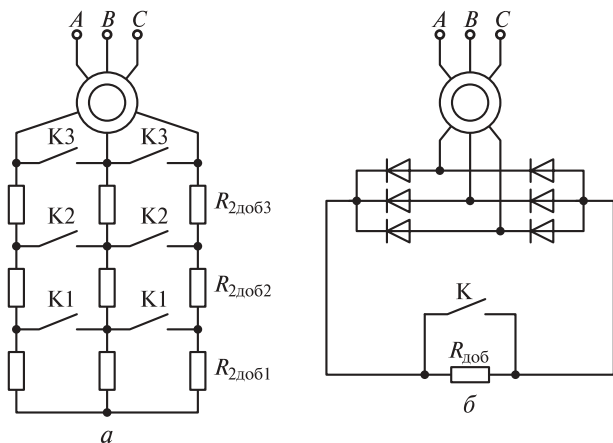


Рис. 2.1. Схемы силовых цепей асинхронных электроприводов с реостатным регулированием:

а — при ступенчатом изменении $R_{2доб}$; *б* — при плавном изменении $R_{2доб}$

На рис. 2.1, *а* приведена схема реостатного регулирования со ступенчатым изменением значения добавочного сопротивления в роторе, т. е. когда при размыкании (замыкании) контактов К1, К2, К3 в роторную цепь вводятся или выводятся ступени сопротивления. В этой схеме асинхронный двигатель может работать как на естественной характеристике (при закороченном роторе), так и на одной из трех регулировочных характеристик, когда в роторные цепи включены сопротивления $R_{2доб3}$, $R_{2доб3} + R_{2доб2}$, $R_{2доб3} + R_{2доб2} + R_{2доб1}$.

В схеме, показанной на рис. 2.1, *б*, изменение добавочного сопротивления в роторных цепях осуществляется плавно, так как на стороне выпрямленного тока неуправляемого трехфазного выпрямителя, подключенного к контактным кольцам ротора, включено неизменяемое добавочное сопротивление $R_{доб}$, которое периодически шунтируется силовым полупроводниковым ключом К на тиристорах или транзисторах, выполняющим роль широтно-импульсного преобразователя (ШИП) [27, 54]. Частота коммутации ШИП (f_k) не связана с частотой питающей сети и в рассматриваемой схеме особенно при применении транзисторов достигает 400... 600 Гц.

Изменение значения добавочного сопротивления в роторных цепях обеспечивается изменением относительного времени $\gamma = t_p / T_k$ проводящего состояния ключа К при неизменной частоте коммутации (здесь t_p — время проводящего состояния ключа К; $T_k = 1/f_k$ — период коммутации ШИП).

Эквивалентное добавочное сопротивление в цепи выпрямленного тока $R_{\text{доб.э}} = R_{\text{доб}}(1 - \gamma)$, т. е. изменяется от 0 (при $\gamma = 1$) до $R_{\text{доб}}$ (при $\gamma = 0$).

Значение $R_{\text{доб.э}}$ с учетом особенностей работы вентиля мостового выпрямителя можно привести к цепи трехфазного переменного тока и получить схему, эквивалентную показанной на рис. 2.1, а. В обоих случаях необходимо знать значение суммарного роторного сопротивления, приведенного к контуру статора и определяемого по формуле

$$R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{2\text{доб}} = k_e^2(R_2 + R_{2\text{доб}}),$$

где R'_2 , $R'_{2\text{доб}}$ — приведенные к цепи статора соответственно сопротивление ротора двигателя и добавочное сопротивление; k_e — коэффициент трансформации ЭДС асинхронного двигателя.

Для удобства введем безразмерный коэффициент $r = R'_{2\Sigma}/R'_2 = (R'_2 + R'_{2\text{доб}})/R'_2$. Тогда в схему замещения (см. рис. 1.2) вместо R'_2 нужно подставить значение $R'_2 r$. Очевидно, для короткозамкнутых асинхронных двигателей и двигателей с закороченным фазным ротором $r = 1$, если в ротор введено добавочное сопротивление, то $r > 1$.

Потери в меди статора и ротора асинхронного двигателя при работе в установившемся режиме можно определить из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \Delta P_{1\text{м}} &= \Delta P_{1\text{м.ном}} k_{\text{п1}}^2 [A + (1 - A) M_*^2]; \\ \Delta P_{2\text{м}} &= \Delta P_{2\text{м.ном}} k_{\text{п2}}^2 M_*^2; \\ \Delta P_{1\text{с}} &= \Delta P_{1\text{с.ном}} [B + (1 - B) M_*^2]; \\ \Delta P_{2\Sigma} &= k_{\text{п2}}^2 M \omega_0 S, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где $\Delta P_{1\text{м}}$, $\Delta P_{2\text{м}}$ — соответственно потери в меди статора, ротора; $\Delta P_{1\text{с}}$ — потери в стали статора; $\Delta P_{2\Sigma}$ — полные потери в роторной цепи при включении добавочного сопротивления; $\Delta P_{1\text{м.ном}}$ — номинальные потери в меди статора, $\Delta P_{1\text{м.ном}} = 3I_{1\text{ном}}^2 R_1$ ($I_{1\text{ном}}$ — номинальный ток статора); $\Delta P_{2\text{м.ном}}$ — номинальные потери в меди ротора, $\Delta P_{2\text{м.ном}} = 3I_{2\text{ном}}^2 R'_2 = M_{\text{ном}} \omega_0 S_{\text{ном}}$ ($I_{2\text{ном}}$ — приведенный номинальный ток ротора; $M_{\text{ном}}$ — номинальный момент двигателя; $S_{\text{ном}}$ — скольжение двигателя); $\Delta P_{1\text{с.ном}}$ — номинальные потери в стали статора); $M_* = M/M_{\text{ном}}$ — относительное значение момента двигателя; A и B — конструктивные коэффициенты двигателя.

Приближенно значение $\Delta P_{1\text{с.ном}}$ может быть определено из выражения $\Delta P_{1\text{с.ном}} \cong 0,2\Delta P_{\text{дв}}$, где $\Delta P_{\text{дв}}$ — суммарная мощность потерь в двигателе при номинальном режиме, $\Delta P_{\text{дв}} = P_{\text{ном}}(1/\eta_{\text{ном}} - 1)$, где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность двигателя; $\eta_{\text{ном}}$ — номинальный КПД.

Значение коэффициента A определяется из следующего выражения [6]:

$$A = \frac{[R'_{2\Sigma}/(X'_2 + X_0)t]^2}{[R'_{2\Sigma}/(X'_2 + X_0)]^2 + S_{\text{НОМ}}^2}.$$

При практических расчетах можно принимать A примерно равным квадрату относительного значения тока намагничивания I_0 при $U_1 = U_{1\text{НОМ}}$, т.е. $A \approx (I_0/I_{1\text{НОМ}})^2 = I_0^2$ [9]. В этом случае ошибка в расчетах особенно для асинхронных двигателей общепромышленных серий не превышает 10... 12 %.

Значение коэффициента B приближается к единице. Его можно принимать равным 0,96... 0,98 для двигателей единой серии, 0,94... 0,97 — для двигателей краново-металлургических серий.

Как видно из (2.10) потери в стали при регулировании добавочных сопротивлений в роторе, когда к статорным цепям приложено номинальное напряжение сети, изменяются незначительно, поэтому при расчетах можно принимать $\Delta P_{1c} = \text{const} = \Delta P_{1c.\text{НОМ}}$. В [14] рекомендуется принимать $k_{\text{п1}}^2 = k_{\text{п2}}^2 = 1,1$, если по обмоткам статора и ротора протекает несинусоидальный ток и присутствуют высшие гармоники (например, при работе схемы, показанной на рис. 2.1, б); при питании синусоидальным током (см. рис. 2.1, а) и при оценочных расчетах можно считать, что $k_{\text{п1}} = k_{\text{п2}} = 1$.

Отметим, что при реостатном управлении потери в меди статора и ротора асинхронного двигателя (2.10) не зависят от скольжения двигателя, а определяются только моментом двигателя, следовательно, во всем диапазоне скоростей допустимый по нагреву момент равен номинальному моменту двигателя, если не учитывать ухудшения теплоотдачи самовентилируемых двигателей.

Коэффициент полезного действия двигателя без учета потерь в стали ротора, механических и дополнительных потерь, которые не оказывают существенного влияния на значение η в рассматриваемом случае, определяется из следующего выражения:

$$\eta = \frac{P_{\text{Мех}}}{P_1} = \frac{M_c \omega}{M_c \omega + k_{\text{п2}}^2 M_c (\omega_0 - \omega) + \Delta P_{1\text{М.НОМ}} k_{\text{п1}}^2 [A + (1 - A) M_{c*}^2] + \Delta P_{1c.\text{НОМ}}}, \quad (2.11)$$

где M_{c*} — относительное значение статического момента, $M_{c*} = M_c/M_{1\text{НОМ}}$.

Как видно из выражения (2.11), η зависит от скорости двигателя и в какой-то мере от развиваемого двигателем момента. На рис. 2.2 приведены зависимости КПД от скорости двигателя

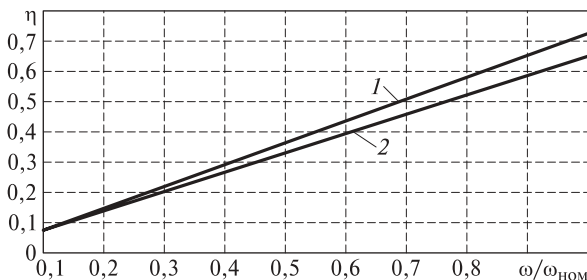


Рис. 2.2. Зависимости КПД от скорости двигателя $\eta = f(\omega)$ для двигателя МТФ111-6 при реостатном управлении:

1 — при $M = M_{\text{НОМ}}$; 2 — при $M = 0,5M_{\text{НОМ}}$

$\eta = f(\omega)$ при $M = M_{\text{НОМ}}$ и $M = 0,5M_{\text{НОМ}}$ для двигателя типа МТФ111-6, у которого $P_{\text{НОМ}} = 3,5$ кВт. При расчетах принято, что $k_{\text{п1}} = k_{\text{п2}} = 1$.

Если считать, что при реостатном управлении асинхронный двигатель питается синусоидальным напряжением, значение $\cos\phi$ можно определить с использованием схемы замещения (см. рис. 1.2) [6]. В этом случае

$$\cos\phi = \frac{R_3}{Z_3} = \frac{R_3}{\sqrt{R_3^2 + X_3^2}}, \quad (2.12)$$

где

$$R_3 = R_1 + \frac{X_0^2 R_2' r}{S \left[(X_2' + X_0)^2 + \frac{R_2'^2 r^2}{S^2} \right]};$$

$$X_3 = X_1 + \frac{\frac{X_0 R_2'^2 r^2}{S^2} + X_0 X_2' (X_2' + X_0)}{(X_2' + X_0)^2 + \frac{R_2'^2 r^2}{S^2}}.$$

На рис 2.3 показана зависимость $\cos\phi = f(s)$ для двигателя МТФ111-6 при разных значениях добавочного сопротивления в роторе.

Располагая выражениями для составляющих потерь при реостатном управлении (2.10), можно подсчитать энергию потерь при работе на установившейся скорости в статическом режиме:

$$\Delta W_y = t_y k_{\text{п}}^2 \left\{ \left[A + (1 - A) M_{\text{с*}}^2 \right] \Delta P_{1\text{м.НОМ}} + M_{\text{с}} (\omega_0 - \omega) \right\} + t_y \Delta P_{1\text{с.НОМ}}, \quad (2.13)$$

где t_y — время работы на установившейся скорости; $k_{\text{п}}^2 = k_{\text{п1}}^2 = k_{\text{п2}}^2 \cong 1,1$.

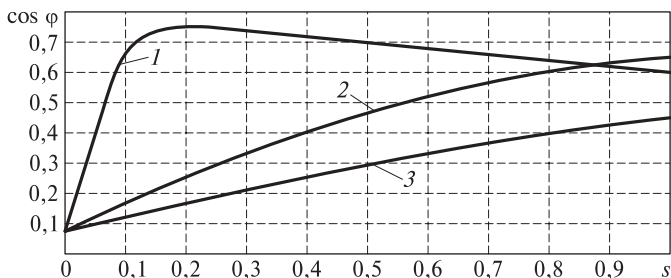


Рис. 2.3. Зависимости $\cos \varphi = f(s)$ для двигателя МТФ111-6:
 1 — при $r = 1$; 2 — при $r = 10$; 3 — при $r = 20$

Уравнение (2.13) справедливо для любого значения пониженной скорости электропривода, включая его работу с отрицательной скоростью, какой можно считать опускание груза в режиме противовключения при активном статическом моменте. В этом случае в уравнение (2.13) необходимо подставить значение ω с отрицательным знаком. При активном моменте статической нагрузки регулирование пониженной скорости в четвертом квадранте (опускание груза) по условиям нагревания двигателя целесообразно осуществлять в режиме торможения противовключением, а не в режиме динамического торможения [10].

Энергия, потребляемая от сети при работе на установившейся скорости, включая полезную работу, совершаемую производственным механизмом $W_{\text{мех}}$, определяется по формуле

$$\begin{aligned}
 W_y &= W_{\text{мех}} + \Delta W_y = \\
 &= t_y \left\{ M_c \omega_0 + \Delta P_{\text{л.ном}} k_{\text{п}}^2 \left[A + (1 - A) M_{\text{с*}}^2 \right] + \Delta P_{\text{л.ном}} \right\}. \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

Переходные процессы в электроприводе с реостатным управлением (пуск, торможение, изменение скорости и т. д.), происходящие при относительно больших добавочных сопротивлениях в роторных цепях и, следовательно, при больших коэффициентах затухания, можно при инженерных расчетах анализировать по статическим зависимостям. Принимая $M_c = \text{const}$ и считая, что при пуске или торможении электропривода обеспечивается равномерно ускоренное или равномерно замедленное движение, что соответствует реальным условиям, особенно при использовании замкнутых по скорости систем автоматического регулирования (САУ), получим

$$\begin{aligned}
 |M_{\text{дин}}| &= J \varepsilon = \text{const}; \\
 \varepsilon &= M_{\text{дин}} / J,
 \end{aligned} \quad (2.15)$$

где $M_{\text{дин}}$ — динамический момент электропривода; J — суммарный момент инерции электропривода, $J = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}}$; ε — модуль ускорения при пуске ($a_{\text{п}}$) или замедления при торможении ($b_{\text{т}}$), $\varepsilon = |a_{\text{п}}| = |b_{\text{т}}| = \text{const}$.

Тогда время разгона при пуске $t_{\text{п}}$ или торможении $t_{\text{т}}$ будет изменяться от нуля до скорости ω_y или от скорости ω_y до нуля:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = t_{\text{п.п}} = \frac{\omega_y}{\varepsilon} = \frac{J \omega_y}{M_{\text{дин}}}, \quad (2.16)$$

где $t_{\text{п.п}}$ — время переходного процесса.

Выражения для расчета потерь энергии в меди статора $\Delta W_{1\text{м}}$, в меди ротора $\Delta W_{2\text{м}}$; в стали статора $\Delta W_{1\text{с}}$ и полных потерь в меди роторных цепях $\Delta W_{2\text{м}\Sigma}$ при пускотормозных режимах, протекающих в двигательном режиме работы асинхронной машины, при $M_{\text{с}} = \text{const}$ приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta W_{1\text{м}} &= \Delta P_{1\text{м.ном}} t_{\text{п.п}} k_{\text{п}}^2 [A + (1 - A) M_*^2]; \\ \Delta W_{2\text{м}} &= \Delta P_{2\text{м.ном}} t_{\text{п.п}} k_{\text{п}}^2 M_*^2; \\ \Delta W_{1\text{с}} &= \Delta P_{1\text{с.ном}} t_{\text{п.п}}; \\ \Delta W_{1\text{м}\Sigma} &= k_{\text{п}}^2 M \left(\omega_0 t_{\text{п.п}} - \frac{\varepsilon t_{\text{п.п}}^2}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.17)$$

где M_* — относительный момент, развиваемый двигателем в переходных режимах, $M_* = M/M_{\text{ном}} = \text{const}$.

Суммарная энергия потерь в переходном процессе $\Delta W_{\text{п.п}} = \Delta W_{1\text{м}} + \Delta W_{1\text{с}} + \Delta W_{2\text{м}\Sigma}$.

Значение M определяется следующим образом:

1) при разгоне электропривода, когда реактивный статический момент $M_{\text{с}}$ противоположен направлению вращения, $M = |M_{\text{дин}}| + |M_{\text{с}}|$;

2) при разгоне электропривода, когда активный статический момент $M_{\text{с}}$ совпадает с направлением вращения и $|M_{\text{дин}}| > |M_{\text{с}}|$, $M = |M_{\text{дин}}| - |M_{\text{с}}|$;

3) при торможении электропривода, когда статический реактивный момент $|M_{\text{с}}| > |M_{\text{дин}}|$, $M = |M_{\text{с}}| - |M_{\text{дин}}|$.

Если пускотормозные режимы протекают в режиме торможения противовключением, то для определения энергии потерь также используется группа выражений (2.17), изменяются лишь условия для отыскания момента двигателя в тормозном режиме.

В этом случае значение тормозного момента двигателя определяется следующим образом:

1) при торможении электропривода $M_{\text{с}}$ — реактивный и $|M_{\text{дин}}| < |M_{\text{с}}|$, тогда $M = |M_{\text{дин}}| - |M_{\text{с}}|$;

2) при торможении электропривода M_c — активный и тогда $M = |M_{\text{дин}}| + |M_c|$;

3) при разгоне электропривода M_c — активный и $|M_{\text{дин}}| > |M_c|$, тогда $M = |M_{\text{дин}}| - |M_c|$.

Энергия, потребляемая асинхронным двигателем в пускатор-мозных режимах в случае пренебрежения потерями в цепи ротора от высших гармоник тока, определяется по формуле

$$W_{\text{п.п}} = t_{\text{п.п}} \left\{ M \omega_0 + \Delta P_{1\text{м.ном}} k_{\text{п}}^2 \left[A + (1 - A) M_*^2 \right] + \Delta P_{1\text{с.ном}} \right\}. \quad (2.18)$$

В формуле (2.18) момент двигателя определяется в соответствии с ранее сформулированными условиями.

Таким образом, приведенные выражения позволяют определить энергетические показатели асинхронного двигателя при релостатном управлении, рассчитать потери энергии в установившихся (2.10) и переходных (2.17) режимах и, следовательно, сопоставить энергопотребление при использовании различных способов управления асинхронным двигателем, что позволяет выбрать систему регулирования, обеспечивающую минимальное энергопотребление и экономию электроэнергии.

2.3. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ — АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Наиболее распространенная силовая структура ТПН — АД, схема которой приведена на рис. 2.4, состоит из шести тиристоров, включенных попарно встречно-параллельно в статорные цепи трехфазного асинхронного двигателя. Такой преобразователь предназначен для регулирования 1-й, или основной, гармоники питающего двигателя напряжения изменением угла открытия тиристоров α в диапазоне от $\alpha = \varphi$ до $\alpha = 180^\circ$. В этом случае действующее фазное напряжение первой гармоники изменяется от $U_1 = U_{1\text{ном}}$ (где $U_{1\text{ном}}$ — действующее фазное номинальное напряжение питающей сети; φ — угол отставания тока от напряжения при синусоидальном питании) до $U_1 = 0$ [6]. Частота переменного напряжения основной гармоники остается неизменной и равна частоте сети, т. е. $f_1 = f_{1\text{ном}}$. При таком управлении синхронная скорость асин-

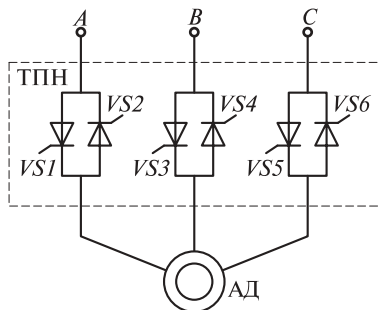


Рис. 2.4. Схема силовой структуры системы ТПН — АД

хронного двигателя и критическое скольжение не изменяются, но регулируется момент двигателя $M = f(U_1^2)$.

Отметим, что работа асинхронного двигателя на регулировочных характеристиках при $U_1 < U_{1\text{ном}}$ происходит в режиме прерывистого тока. В этом случае в спектре несинусоидального периодического тока при соединении обмоток статора звездой без нулевого провода в периодическом несинусоидальном токе кроме основной гармоники присутствуют нечетные гармоники: 5-я, 7-я, 11-я, 13-я и т.д. При таком способе управления осуществляется дискретное воздействие на асинхронный двигатель и в течение периода питающего напряжения 0,02 с при $f_{1\text{ном}} = 50$ Гц происходит чередование схем подключения статорных цепей двигателя к трехфазной питающей сети в следующей последовательности: трехфазное подключение, двухфазное подключение разных фаз, отключение всех фаз двигателя. В связи с этим даже в установившемся режиме наблюдаются пульсации момента двигателя с частотой 300 Гц (схема ТПН на рис. 2.4 имеет пульсность $p = 6$) и, если быть точным, статический режим представляет собой квазистатический, или установившийся динамический, режим.

Однако, как показано в [6], пульсирующая составляющая момента практически не оказывает влияния на колебания скорости и динамику электропривода и достаточно учитывать только гладкую составляющую момента, создаваемую основной гармоникой, т.е. средний момент двигателя на расчетном интервале $M_{\text{ср}}$, который равен $M_{\text{с}}$. Высшие гармоники увеличивают потери в асинхронном двигателе, возрастание которых оценивается введением в расчетные формулы потерь коэффициентов $k_{\text{п1}}$ и $k_{\text{п2}}$.

Для точного анализа установившихся режимов нельзя пользоваться однофазной схемой замещения асинхронного двигателя для определения значения 1-й гармоники, удельного веса высших гармоник и коэффициента мощности асинхронного электропривода. Расчет указанных и других показателей может быть точно выполнен при использовании дифференциальных уравнений асинхронной машины (1.3) с учетом алгоритма переключения тиристоров при $\omega = \text{const}$ и $\alpha = \text{const}$.

При регулировании U_1 за счет ТПН потери в элементах асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при работе в установившемся режиме определяются следующим образом [6]:

$$\begin{aligned} \Delta P_{1\text{м}} &= k_{\text{п1}}^2 \Delta P_{1\text{м.ном}} M_{\text{с}*} \left[A \frac{S_{\text{ном}}}{S} + (1 - A) \frac{S}{S_{\text{ном}}} \right]; \\ \Delta P_{2\text{м}} &= k_{\text{п2}}^2 \Delta P_{2\text{м.ном}} M_{\text{с}*} \frac{S}{S_{\text{ном}}}; \\ \Delta P_{1\text{с}} &= \Delta P_{1\text{с.ном}} M_{\text{с}*} \left[B \frac{S_{\text{ном}}}{S} + (1 - B) \frac{S}{S_{\text{ном}}} \right]. \end{aligned} \quad (2.19)$$

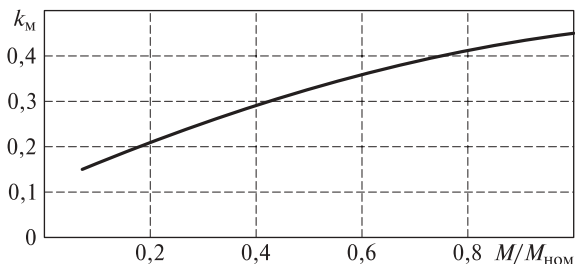


Рис. 2.5. Зависимость $k_M = f(M)$ для двигателя МТ012-6 с закороченным ротором при $\omega = 0,6\omega_{НОМ}$

В формулах (2.19) вместо скорости используется скольжение двигателя $S = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$, что более целесообразно.

Значение k_M , определяемое из уравнения (2.5), может быть точно рассчитано только с применением ЭВМ при использовании математического описания асинхронной машины по уравнениям (1.3) и (1.4) с учетом алгоритма переключения тиристорov. На рис. 2.5 приведена зависимость $k_M = f(M)$ для двигателя МТ012-6 с закороченным ротором при относительной скорости $\omega = 0,6\omega_{НОМ}$.

При рассматриваемом способе управления работа асинхронного двигателя на регулировочных характеристиках при уменьшении развиваемого момента (возрастании угла α) сопряжена со значительным снижением коэффициента мощности, так как с ростом α увеличивается фазовый сдвиг 1-й гармоники тока φ_1 и уменьшается $\cos \varphi_1$, входящий в формулу (2.5), но возрастает удельный вес высших гармоник тока, что приводит к снижению k_M . Этот факт и показан на рис. 2.5. При $\omega = 0,6\omega_{НОМ}$ в диапазоне изменения момента от 0 до $M_{НОМ}$ асинхронный двигатель работает в зоне прерывистых токов.

При определении КПД электропривода в системах ТПН—АД можно не учитывать механические и дополнительные потери и потери в стали ротора ввиду их малости по сравнению с другими составляющими потерь. Тогда формула для определения КПД приобретает следующий вид:

$$\eta = \frac{M_c \omega}{M_c \omega + \Delta P_{1M} + \Delta P_{2M} + \Delta P_{1c}} \quad (2.20)$$

При расчете η по формуле (2.20) с использованием уравнений (2.19) необходимо подставить в (2.19) значения S , соответствующие выбранной скорости.

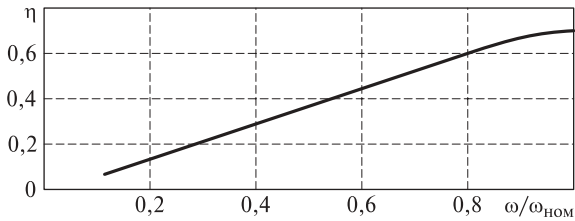


Рис. 2.6. Зависимость КПД от скорости двигателя при управлении от ТПН для двигателя МТФ111-6 с закороченным ротором

На рис. 2.6 приведена зависимость КПД от скорости двигателя при управлении от ТПН для МТФ111-6 с закороченным ротором. При расчете зависимости принято, что $k_{\text{п1}} = k_{\text{п2}} = k_{\text{п}} = 1,1$; $A = 0,861$; $B = 0,97$.

Энергия потерь в установившихся режимах может быть определена с использованием формул (2.19) путем умножения мощности потерь $\Delta P_{1\text{м}}$, $\Delta P_{2\text{м}}$, $\Delta P_{1\text{с}}$ (при выбранной скорости ω и соответствующем ей скольжении S) на время работы с установившейся скоростью $t_{\text{в}}$.

Особенностью использования асинхронных короткозамкнутых двигателей в системах ТПН — АД является то, что относительные потери в роторе превышают относительные потери в остальных элементах машины [6]. Поэтому установленная мощность асинхронного двигателя ($P_{\text{ном}}$) должна быть выбрана таким образом, чтобы во всем диапазоне регулируемых (пониженных) скоростей мощность потерь в роторе $\Delta P_{2\text{м}}$ была меньше номинальной мощности потерь $\Delta P_{2\text{м.ном}}$. Тогда для обеспечения нормального теплового режима двигателя необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$\Delta P_{2\text{м}} \leq \Delta P_{2\text{м.ном}}, \quad (2.21)$$

из которого следует, что допустимый по нагреву относительный момент двигателя $M_{\text{доп}^*} = M_{\text{доп}}/M_{\text{ном}}$ при продолжительном режиме работы должен быть:

$$M_{\text{доп}^*} = M_{\text{доп}}/M_{\text{ном}} \leq S_{\text{ном}}/k_{\text{п2}}^2 S. \quad (2.22)$$

Для иллюстрации степени снижения $M_{\text{доп}^*}$ при регулировании скорости (скольжения) в табл. 2.1 приведены значения $M_{\text{доп}^*}$ при изменении скорости двигателя от $\omega_{\text{ном}}$ до 0 (скольжения от $S_{\text{ном}}$ до 1). При расчетах принято значение $k_{\text{п2}}^2 = 1,1$; $S_{\text{ном}} = 0,04$.

Из уравнения (2.22) и табл. 2.1 следует, что длительное регулирование скорости асинхронного электропривода в системе ТПН — АД при $M_{\text{с}} = \text{const}$ практически невозможно, так как с возрастанием скольжения (при снижении скорости) по сравнению с но-

Зависимость относительного момента двигателя $M_{\text{доп}^*}$ от $\omega/\omega_{\text{ном}}$ и S

| | | | | | | | |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\omega/\omega_{\text{ном}}$ | 1 | 0,937 | 0,833 | 0,625 | 0,416 | 0,208 | 0 |
| S | 0,04 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
| $M_{\text{доп}^*}$ | 1 | 0,36 | 0,182 | 0,091 | 0,06 | 0,045 | 0,036 |

минальными многократно возрастают потери в статоре и в роторе. В этом случае для обеспечения работы короткозамкнутого асинхронного двигателя без перегрева необходимо увеличение в несколько раз, а иногда и на порядок, номинальной мощности двигателя по сравнению с максимальной мощностью статической нагрузки [6]. С учетом ухудшения теплоотдачи самовентилируемых электроприводов при снижении скорости зависимость $M_{\text{доп}^*} = f(S)$ будет еще менее благоприятной.

Зависимости $k_M = f(M)$ и $\eta = f(\omega)$ (см. рис. 2.5, 2.6) также подтверждают низкую энергетическую эффективность регулируемых электроприводов по системе ТПН—АД, работа которых связана с повышенным расходом электроэнергии и низким КПД.

Однако существует ряд производственных задач, для решения которых по технологическим требованиям целесообразно применение систем ТПН—АД. В этих случаях их использование позволяет одновременно снижать потребление электроэнергии, выполняя функцию энергосбережения [6]. Варианты целесообразного применения систем ТПН—АД для управления асинхронным электроприводом в целях энергосбережения будут рассмотрены в гл. 3.

Точный расчет пускотормозных режимов и определение потерь энергии в переходных процессах в системах ТПН—АД нельзя выполнять по статическим зависимостям, так как электромагнитные переходные процессы вносят существенные коррективы в динамические характеристики асинхронных электроприводов и влияют на энергопотребление. Однако при использовании замкнутых по скорости САУ, когда обеспечивается равномерно ускоренное движение при разгоне электропривода и двигатель работает при $U_1 < U_{\text{ном}}$, что ослабляет влияние электромагнитных переходных процессов, можно для предварительных расчетов и сравнительного анализа с другими типами регулируемых электроприводов определять потери энергии с использованием формул (2.19) для расчета мощности потерь в отдельных элементах машины.

В этом случае, учитывая формулы (2.15) и (2.16), можно принять момент двигателя в переходном режиме постоянным и получить выражения для энергии потерь при работе асинхронной

машины в двигательном режиме при реализации пускотормозных процессов в диапазоне изменения скорости от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_y$:

$$\begin{aligned}\Delta W_{1M} &= \frac{k_{п1}^2 \Delta P_{1M.HOM} M_* \omega_0}{\varepsilon} \left[\frac{1-A}{2S_{HOM}} (1-S_y^2) - AS_{HOM} \ln S_y \right]; \\ \Delta W_{2M} &= \frac{k_{п2}^2 \Delta P_{2M.HOM} M_* \omega_0}{\varepsilon} (1-S_y^2); \\ \Delta W_{1c} &= \frac{\Delta P_{1c.HOM} M_* \omega_0}{\varepsilon} \left[\frac{1-B}{2S_{HOM}} (1-S_y^2) - BS_{HOM} \ln S_y \right],\end{aligned}\quad (2.23)$$

где $S_y = \frac{\omega_0 - \omega_y}{\omega_0}$; M_* — относительное значение момента двигателя

в переходном режиме, $M_* = M/M_{HOM}$ (как было сказано выше, принимается, что значение $M_* = \text{const}$).

Значение M зависит от требуемого динамического момента $M_{дин}$, вида момента статической нагрузки (активный или реактивный) и определяется из тех же соображений, которые изложены в подразд. 2.2.

Общие потери энергии в двигателе в переходном режиме, реализуемом в системе ТПН—АД, определяются как сумма составляющих потерь, вычисленных по формулам (2.23):

$$\Delta W_{п.п} = \Delta W_{1M} + \Delta W_{2M} + \Delta W_{1c}. \quad (2.24)$$

Уточненный расчет переходных процессов и динамических механических характеристик асинхронного двигателя особенно в разомкнутых системах должен осуществляться с использованием системы дифференциальных уравнений асинхронной машины при переменной скорости вращения, алгоритма переключения тиристоров ТПН и временного закона изменения угла открытия вентилях $\alpha = f(t)$.

Математические модели систем ТПН—АД достаточно полно отработаны с применением аналоговых устройств [40, 70] и на основе ЦВМ с использованием методов численного решения нелинейных дифференциальных уравнений [50, 79]. Такие модели, в частности с цифровым имитационным моделированием, будут использованы при анализе возможностей направленного формирования пускотормозных режимов для получения желаемых динамических характеристик, при исследовании прямого пуска — при подключении асинхронного двигателя к номинальному напряжению сети, для оценки влияния M_c и J на вид динамических характеристик, для изучения возможностей энергосбережения в пускотормозных режимах при их направленном формировании по сравнению с прямым пуском, в частности при временном законе формирования U_1 в переходных процессах.