

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

С.В. Гужов, М.Ю. Юркина, В.С. Глазов

**СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ
В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

Учебное пособие

по курсу
«Энергоаудит и энергосбережение
на промышленных предприятиях»
направления 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Москва
Издательство МЭИ
2017

УДК 621
ББК 31.37
Г 936

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

Подготовлено на кафедре тепломассообменных процессов и установок

Рецензенты: Злобин А.А., директор ООО «Интехэнерго-аудит»,
канд. техн. наук; Яковлев И.В., проф. каф. ТМПУ
НИУ «МЭИ», канд. техн. наук

Гужов, С.В.

Г 936 Способы повышения энергетической эффективности при эксплуатации электрических двигателей: учеб. пособие / С.В. Гужов, М.Ю. Юркина, В.С. Глазов. – М.: Издательство МЭИ, 2017. – 44с.

ISBN 978-5-7046-1876-8

Рассмотрены основные понятия, основные типы автоматизированного электропривода. Изложены преимущества и недостатки применения электрических двигателей различных типов.

Показаны основные способы пуска синхронных и асинхронных электрических двигателей, приведены их преимущества и недостатки.

Изложены основные способы повышения энергетической эффективности при эксплуатации электрических двигателей. Приведены основы сравнительного анализа двигателей различных классов энергетической эффективности.

Для студентов технических университетов, обучающихся по программам подготовки магистров по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». Также может быть использовано для подготовки бакалавров по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

**УДК 621
ББК 31.37**

ISBN 978-5-7046-1876-8

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Виды электрических двигателей и их применение во вспомогательном теплотехническом оборудовании.....	6
2. Асинхронные электрические двигатели.....	8
2.1. Принцип действия и устройство.....	9
2.2. Режимы работы асинхронного двигателя.....	11
2.3. Определение основных параметров асинхронного двигателя..	13
2.4. Пуск двигателя.....	16
3. Синхронные машины.....	18
3.1. Устройство и принцип действия.....	19
3.2. Пуск синхронного двигателя.....	20
3.4. Различные конструкции маломощных синхронных двигателей	21
4. Повышение энергетической эффективности при пуске асинхронных электрических двигателей.....	22
4.1. Регулирование понижением напряжения питания.....	23
4.2. Регулирование изменением сопротивления цепи ротора...	25
4.3. Тиристорные пусковые устройства (устройства плавного пуска)	26
4.4. Использование устройств изменения частоты питания.....	27
5. Повышение энергетической эффективности при эксплуатации асинхронных электрических двигателей.....	34
5.1. Корректный подбор электрического двигателя (переход на следующий класс энергетической эффективности АД)..	34
5.2. Установка фильтров высших гармоник тока.....	39
Контрольные вопросы.....	41
Список литературы.....	42

ВВЕДЕНИЕ

Современный автоматизированный электропривод практически полностью соответствует потребностям отраслей промышленности, сельского хозяйства, систем жилищно-коммунального хозяйства, транспорта по качеству, функциональным характеристикам и надёжности. Теплотехническая отрасль, включающая процессы генерации, транспорта и потребления тепловой энергии в промышленности и бытовом секторе, использует значительный по электрической мощности диапазон электродвигателей: от десятков тысяч киловатт до десятков ватт.

Современная промышленность выпускает практически все необходимые типоразмеры, обладающие возможностью подключения к устройствам регулирования, использующиеся во всех отраслях промышленности (рис. 1) [1]. Например, Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат, использует в прокатных станах синхронные двигатели (СД) мощностью 30МВт. Магнитогорский металлургический комбинат для обеспечения работы доменной печи применяет по восемь доменных воздуходувок, приводимых электрическим приводом мощностью 6 МВт каждая. В то же время для работы микроканальных теплообменных аппаратов используются микродвигатели мощностью 10–6 Вт и частотой вращения до 50 тыс. об./мин.

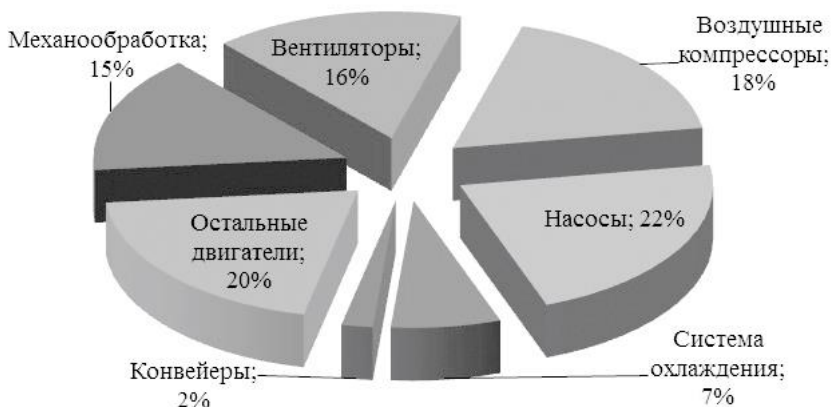


Рис. 1. Разделение по энергопотреблению для конечных потребителей в промышленном производственном секторе Европейского Союза

В настоящее время значительная часть электроприводов основного и вспомогательного оборудования, задействованного при производстве, транспортировке и потреблении тепловой энергии, морально и технически устарела, что снижает общую эффективность технологии. В связи с этим возникает необходимость выработки мер по повышению энергетической эффективности электроприводов и систем с их использованием. Настоящее пособие посвящено способам повышения энергетической эффективности при эксплуатации электрических двигателей.

1. ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ВО ВСПОМОГАТЕЛЬНОМ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

В циклах производства и передачи тепловой энергии мощные электрические машины чаще всего используются на теплоэлектроцентрали в роли генераторов электрической энергии. Мощность электрогенераторов в зависимости назначения и от года постройки ТЭЦ может колебаться от единиц до десятков и даже сотен мегаватт. Технологические схемы, используемые для генерации тепловой энергии, содержат значительное число электрических машин для обеспечения работоспособности основного и вспомогательного оборудования. Отличаются разнотипностью и многообразием и электрические приводы механизмов котельных.

К тепловому оборудованию, использующему электрические приводы, относятся, например, воздуходувки. Электрическая мощность, потребляемая в режиме нагнетания может колебаться от 3кВт при максимальном расходе 104 м³/ч, до 250кВт – для 10 тыс. м³/ч [2]. Для режима всасывания изготавливаются модели с потребляемой электрической мощностью от 5,5кВт при максимальном расходе 290 м³/ч, до 160кВт – для 8,5 тыс. м³/ч.

Другим типом распространенного оборудования, использующим электрические приводы, являются насосы. Циркуляционные насосы изготавливаются с сухим и мокрым ротором. Агрегаты с сухим ротором часто применяются для циркуляции теплоносителей в больших системах и имеют относительно высокий КПД. Агрегаты с мокрым ротором, как правило, применяются для нужд ГВС, а также для перемещений теплоносителя у потребителя. Востребованность электроприводов для насосов объясняется большим числом задач по перекачке жидкостей в системах теплоснабжения и ГВС. Применяемые электрические приводы могут иметь мощность 0,09 кВт для насоса с подачей 1 м³/ч и напором 0,75м. Для насоса с подачей 100м³/ч и напором 30м электрическая мощность составляет 11кВт при частоте вращения ротора 1450 об./мин. [3]. Насосы часто используются в схемах ИТП у потребителя, в которых электрическая машина обеспечивает принудительное перемещение теплового агента. Дру-

гой тип насосов – вакуумные насосы – используются, как правило, для откачки водяного пара, инертных газов и воздуха. При производительности $110\text{м}^3/\text{ч}$ потребляемая мощность составляет $3,7\text{кВт}/\text{об.}/\text{мин.}$, при $1500\text{м}^3/\text{ч}$ – 30кВт [4].

При передаче теплоносителя с целью контроля расхода передаваемой тепловой энергии используется запорная арматура, в том числе управляемая дистанционно. В таком случае исполнительным механизмом является электрический двигатель, способный останавливать ротор точно в заданном положении.

Перечисленные электродвигатели характеризуются различным устройством и типом используемого тока, имеют разные габариты и эксплуатационные характеристики. Классификация типов электрических двигателей приведена на рис. 2 [1]. Диаграмма сравнения применения электрических двигателей в зависимости от их электрической мощности представлена на рис. 3.



Рис. 2. Классификация электрических двигателей

Приведённое разнообразие электрических машин позволяет использовать их для различных целей, максимально используя преимущества каждого из типов электрических двигателей. В следующих разделах будут рассмотрены основные типы электрических машин, а также способы повышения энергетической эффективности при их эксплуатации.

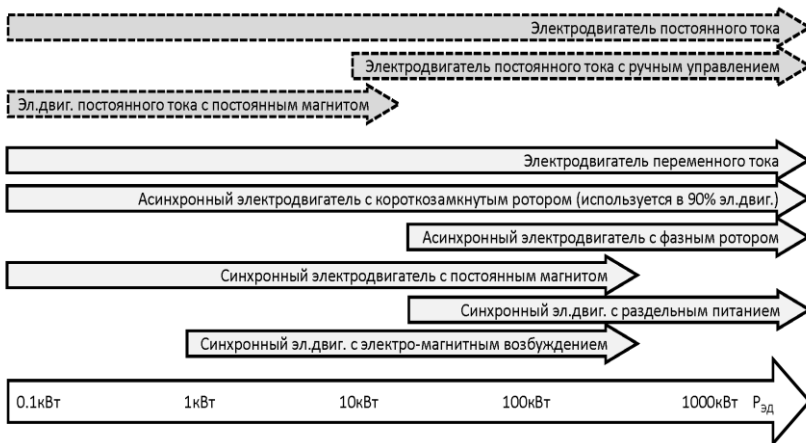


Рис. 3. Характерное применение электрических двигателей в зависимости от их электрической мощности

2. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Асинхронный двигатель (АД) как устройство был создан в 1888–1889 годах в Германии русским электротехником оливо-Добровольским. Из-за ряда существенных преимуществ по сравнению с другими двигателями, конструкция АД с момента изобретения не претерпела значительных изменений. Двигатель имеет простое устройство, высокую надёжность, небольшие массогабаритные показатели. На производство АД требуется относительно немного цветных металлов.

С бурным развитием полупроводниковой электротехники в последней четверти XX в. АД стали оснащаться устройствами, регулирующими частоту вращения. Это позволило использовать двигатели в высокоточных приборах и в приборах, требующих незначительного угла поворота (задвижки, фиксаторы и пр.).

Электрические двигатели относятся к классу электромеханических преобразователей, конструкция которых позволяет преобразовывать электрическую энергию в механическую (двигательный режим). Поскольку все электрические машины обладают *свойством*

обратимости, АД способен преобразовывать механическую энергию в электрическую (режим генератора). Вместе с этим, при проектировании машины её параметры оптимизируются к условиям эксплуатации в одном из режимов.

2.1. Принцип действия и устройство

АД принадлежат к классу бесколлекторных машин переменного тока, иначе именуются «машины с вращающимся магнитным полем». Термин «асинхронные» объясняется фактом несинхронности скорости вращения ротора (подвижной части) и скорости вращения магнитного поля неподвижной части (статора).

Упрощённо, принцип действия АД удобно демонстрировать на примере поведения прямоугольной замкнутой рамки из проводящего материала, помещённого между полюсами вращающегося внешнего магнитного поля. Движение внешнего поля относительно рамки индуцирует в ней электродвижущую силу (ЭДС). Поскольку рамка замкнута, то под действием ЭДС в ней возникает электрический ток. Протекание по проводнику электрического тока индуцирует вокруг проводника собственное электрическое поле. Поле рамки отталкивается от внешнего поля. Вращаясь, внешнее поле приводит во вращение рамку.

Пусть внешнее магнитное поле вращается с угловой скоростью ω_0 , магнитное поле рамки – ω . Вращающийся момент ротора, возникающий при воздействии магнитного поля статора, возможен только при наличии тока в роторе, который, в свою очередь, возникает при движении магнитного поля статора относительно ротора. При равенстве $\omega_0 = \omega$ (синхронное вращение) поле статора будет неподвижно относительно ротора. В таком случае в роторе не будет индуцироваться ток, поле вокруг ротора создано не будет и отталкивания полей с возникновением вращающего момента не произойдёт. Таким образом, АД способно приводить в движение механическую нагрузку на валу только при асинхронном вращении полей статора и ротора.

Статор конструктивно состоит из корпуса, сердечника и обмоток. Корпус представляет собой полый цилиндр и практически не участвует в электромагнитных процессах электродвигателя. Его основная функция – обеспечение механической прочности и защита

обмоток. На внутренней стороне корпуса закреплён сердечник, собранный из тонких листов электротехнической стали, с пазами для укладки трёхфазных обмоток (рис. 4а).

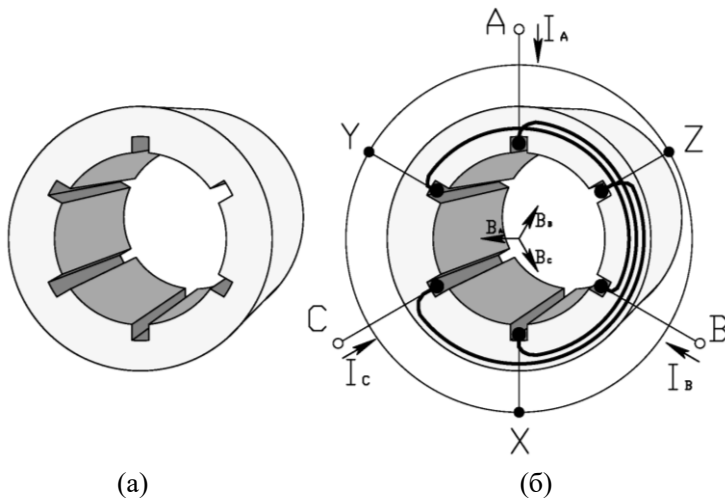


Рис. 4. Конструктивная схема сердечника статора:
без обмоток (а) и с сосредоточенными обмотками (б)

Оси обмоток статора отстоят друг относительно друга на 120° . Начала обмоток, обозначенные как A, B, C , отстоят от пазов, в которые уложены их окончания (X, Y, Z) на 180° .

Ротор АД состоит из вала с закреплёнными на его концах подшипниками и сердечника. Сердечник набирается из тонких пластин электротехнической стали, имеющих пазы для укладки обмоток ротора. Наиболее распространены электроприводы с короткозамкнутыми роторами.

Если разделить обмотку каждой фазы на две части и поместить её в удвоенное число пазов ротора так, чтобы начала и концы половин обмоток находились в пазах, смещённых по окружности статора на 90° , то при подключении к сети образуется магнитное поле с двойным числом полюсов. Такое поле за один период частоты тока питающей электросети будет перемещаться в пространстве не на

360°, а на 180°. Электрические машины с удвоенным числом пар полюсов p_p имеют сниженную в два раза частоту вращения. Проведя аналогичные рассуждения легко видеть, что частота вращения ω электропривода прямо пропорциональна частоте питающей сети и обратно пропорциональна числу пар полюсов магнитного поля p :

$$\omega_{\text{мех}} = \omega_{\text{эл}} / p_p. \quad (1)$$

Частота вращения холостого хода (немного меньше реальной скорости) также называется «скоростью вращения» и измеряется во внесистемных единицах – оборотах в минуту. Для приведения к унифицированной системе СИ, (1) можно записать:

$$n_0 = 60 f / p, \quad (2)$$

где n – скорость вращения электропривода (об./мин.); f – частота питающей сети (Гц).

Используя (2) можно определить скорость вращения двигателя, например, с двумя парами полюсов при известной частоте сети 50 Гц:

$$n = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ об./мин.}$$

Опираясь на частоту сети питания, равную 50 Гц, конструктивно возможно получить следующие скорости вращения магнитного поля: 3000, 1500, 1000, 750, 600 ... об./мин.

2.2. Режимы работы асинхронного двигателя

Поскольку вращение магнитных полей статора и ротора асинхронно, для АД используют понятие скольжения

$$s = \frac{\Omega_{\text{СТАТ}} - \Omega_{\text{РОТ}}}{\Omega_{\text{СТАТ}}} = \frac{n_{\text{СТАТ}} - n_{\text{РОТ}}}{n_{\text{СТАТ}}}. \quad (3)$$

При неподвижном роторе $s = 1$.

В режиме двигателя скольжение находится в диапазоне $0 < s < 1$. Направление вращения ротора совпадает с направлением вращения магнитного поля статора. Скорость вращения статора меньше синхронной скорости вращения магнитного поля с поправкой на величину скольжения. Электрическая энергия ($W_{\text{Э}}$) преобразуется в механическую (W_M), передаваемую на вал ротора, и в тепловую энергию (W_T), нагревающую элементы двигателя, и равную $W_T = W_{\text{Э}} - W_M$.

При синхронном вращении $s = 0$. Синхронный режим вращения ротора называют идеальным холостым ходом. В этом режиме ротор вращается с частотой вращения магнитного поля статора. При скольжениях $s < 0$ ротор двигателя вращается со скоростью выше синхронной. Для асинхронного двигателя это возможно только в случае работы в генераторном режиме, когда ротор вращается нагрузкой с частотой большей скорости магнитного поля статора. Для двигателя, установленного в ЦТП такой режим может быть достигнут, например, присоединением к валу ротора системы рекуперации избыточного магистрального давления рабочих и технологических сред в электрическую энергию [5]. При этом механическая энергия вращения преобразуется в электрическую энергию и в тепловую $W_T = W_M - W_{\text{Э}}$. Данный режим АД называется режимом электромагнитного тормоза (режим противовключения). Механическая мощность имеет отрицательный знак, электрическая – положительный.

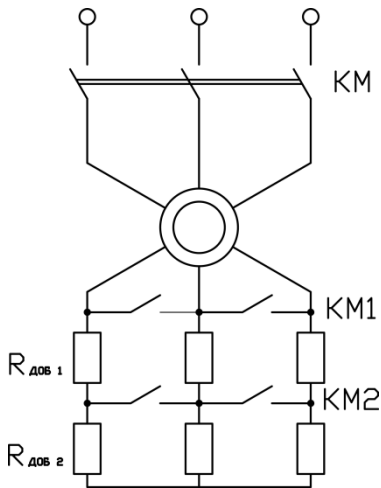


Рис. 5. Схема включения АД с включением цепи якоря на внешнее добавочное сопротивление

Двигатель потребляет и электрическую, и механическую энергию, преобразуя их в тепловую $W_T = W_{\text{Э}} + W_M$. Тепловой режим противовключения является для АД тяжёлым, так как приводит к ухудшению свойств электротехнической стали, существенному перегреву и ускоренному старению изоляции. Наиболее простым решением перегрева двигателя является включение цепи якоря на добавочное сопротивление, находящееся вне двигателя (рис. 5).

Вся тепловая энергия при этом выделяется вне двигателя без существенного ухудшения теплового режима обмоток. Недостатком данного способа являются существенные потери электрической энергии в добавочных сопротивлениях.

2.3. Определение основных параметров асинхронного двигателя

В наиболее полных справочниках и в паспорте электрического двигателя приведены данные, позволяющие полностью описать АД. В случае отсутствия паспорта асинхронного двигателя и его справочных данных, некоторую информацию можно получить из информационной таблички (шильдика), расположенного на корпусе электрического двигателя (рис. 6, 7) [6]:

- 1 – заводской инвентарный номер двигателя;
- 2 – количество фаз;
- 3 – номинальное рабочее напряжение, В;
- 4 – режим эксплуатации;
- 5 – КПД, %;
- 6 – габарит, мм;
- 7 – степень защиты;
- 8 – класс изоляции;
- 9 – температурный подъем, К;
- 10 – частота, Гц;
- 11 – номинальная мощность двигателя, Вт;
- 12 – частота вращения при полной нагрузке, об./мин.;
- 13 – номинальный рабочий ток, А;
- 14 – коэффициент мощности;
- 15 – температура окружающей среды, °С;
- 16 – сервис-фактор;
- 17 – высота над уровнем моря, м;
- 18 – вес двигателя, кг;
- 19 – спецификация на подшипник с приводной стороны и количество смазки;
- 20 – спецификация на подшипник с неприводной стороны и количество смазки;
- 21 – тип смазки;
- 22 – схема электрических соединений;
- 23 – интервал смазки, ч.;
- 24 – сертификационная маркировка;
- 25 – дата изготовления;
- 26 – серийный номер.

W22 Premium

25 IE3 - 91.2% ← 5
03FEV10 0000000000 ← 26

7
12 8 9

6
3 FRAME 132M-04 INS. CL. F Δ+ 80 k IP55 DUTY S1 ← 4
S.F. 1.00 AMB. 40°C ALT. 17 → 1000 m.a.s.l.

15
14 P.F.

V-Δ/Y	Hz	kW	min ⁻¹	13 → A	14 P.F.
380/660	10	11	1460	14.4/8.29	0.87
400/690	50	7.5	1465	13.9/8.06	0.85
415/-	-	-	1470	13.5/-	0.84
440/-	60	8.5	1760	13.9/-	0.87
460/-	-	-	1765	13.5/-	0.86

18
78 kg

21
MOBIL POLYREX EM

19
6308-ZZ ← 19

20
6207-ZZ ← 20

1
11235465

2
MADE IN BRAZIL

3
V-Δ/Y

10
Hz

11
kW

13
min⁻¹

14
P.F.

17
ALT.

18
kg

21
MOBIL POLYREX EM

22
W2 U2 V2
U1 V1 W1
L1 L2 L3
Δ

W2 U2 V2
U1 V1 W1
L1 L2 L3
Y

MOD.TE1BF0X0\$0000302719

1
PC ME95

LR 50962
LR 38324

CE

RA

VDE 0530
IEC 60034

24

Рис. 6. Вид таблички на двигателях габаритами от 63 до 132мм

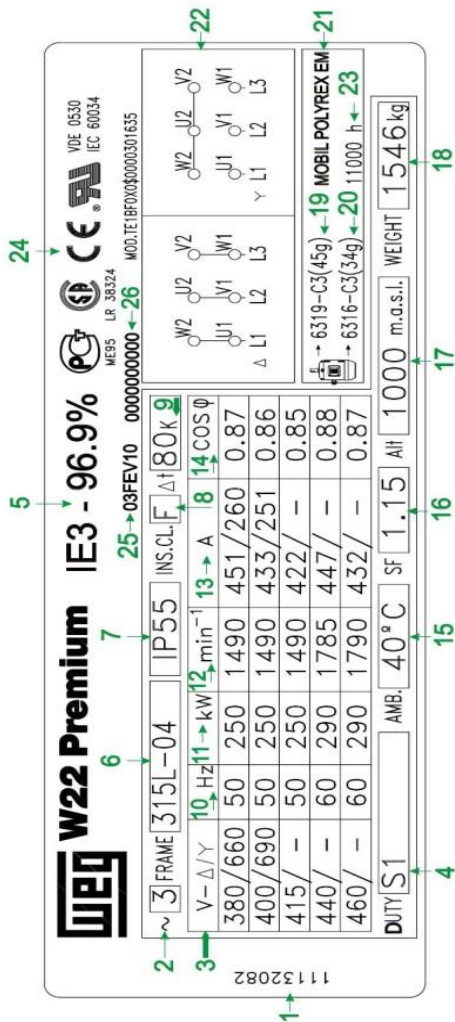


Рис. 7. Вид таблички на двигателях габаритами от160 до 355 мм

Полученная информация в дальнейшем может быть использована при эксплуатации АД.

2.4. Пуск двигателя

Существует несколько способов пуска асинхронного двигателя. Наиболее простой способ – прямой пуск путём непосредственного включения обмоток АД в питающую сеть с помощью коммутационного устройства КМ (рис. 8). Прямой пуск позволяет включение двигателя без дополнительной электрической аппаратуры.

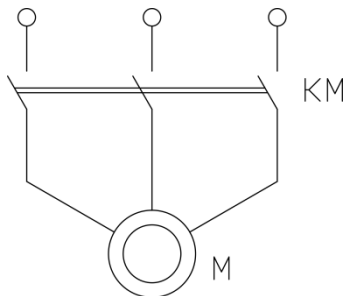


Рис. 8. Схема включения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при использовании контактного пускателя

При запуске асинхронный двигатель развивает пусковой вращающий момент кратностью 1,2 до 2,0 относительно номинального. Пусковые токи при этом имеют кратность от 3 до 7 и более от номинального тока, в зависимости от конструктивных особенностей двигателя. Пусковой ток большой кратности является главной причиной необходимости использования пускорегулирующей аппаратуры. АД с короткозамкнутым ротором мощностью до 50 кВт, как правило, включаются в сеть способом прямого пуска. Более мощные электрические двигатели включают посредством дополнительной пускорегулирующей аппаратуры [7].

При включении асинхронного двигателя по мощности сравнимого с пропускной способностью питающей сети возникает явление понижения напряжения. Снижение напряжения питающей сети может быть настолько существенным, что пуск двигателя станет невозможным. Для устранения подобной ситуации либо проводят модернизацию сети с целью увеличения её пропускной способности, либо

используют АД с увеличенным моментом вращения. Конструкция таких двигателей предусматривает наличие в роторе одной либо нескольких замкнутых рамок из проводящего материала, объединённых в конструкцию «белочья клетка» (рис. 9).

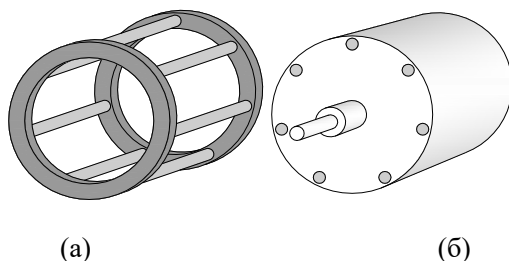


Рис. 9. Белочья клетка (а) и принципиальное изображение ротора АД с белочьей клеткой

Протекание по проводнику белочьей клетки значительных пусковых токов вызывает явление вытеснения тока из центра проводника к его поверхности. Данное свойство также используют для увеличения пускового момента посредством изготовления проводников трапециевидного сечения с соотношением ширины к высоте около 1:10 (рис. 10а). Наиболее целесообразным решением является разделение «белочьей клетки» на две обмотки: нижней рабочей и верхней – пусковой (рис. 10б, 10в). Преимущество подобных АД состоит в увеличенной характеристике пускового момента. Недостаток – относительная сложность изготовления и высокая стоимость.

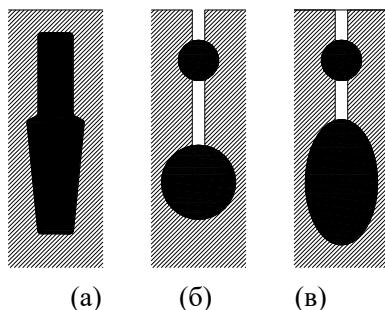


Рис. 10. Некоторые виды сечений проводников белочьей клетки глубокопазных АД

Несмотря на приведённые примеры улучшений конструкции электрического двигателя, главным недостатком прямого пуска является перегрев элементов ротора. Для устранения применяют схема включения АД с включением цепи обмоток статора на внешнее добавочное сопротивление (рис. 5). Даже при подобном включении не рекомендуется эксплуатировать АД в серии нескольких прямых пусков.

Помимо прямого пуска существует несколько способов улучшения пусковых характеристик средних и мощных АД с замкнутым ротором посредством применения пускорегулирующей аппаратуры различного принципа действия. Другие способы будут рассмотрены в последующих разделах.

3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Синхронными электрическими машинами или синхронными двигателями (СД) называют электрические машины переменного тока, у которых скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля. Наиболее часто СД применяют в технологических процессах, где крайне важно соблюдать постоянную скорость вращения. К таким применениям относятся, например, приводы насосов магистральных нефтепроводов, компрессоров газопроводов, транспортных станов в металлургический и горнодобывающей промышленности и пр. С развитием полупроводниковой электротехники сфера применения СД расширилась и на приборные приводы малой и средней мощности, где требуется широкий диапазон и точность регулирования скорости и положения вала ротора.

Преимуществом СД относительно АД является способность работы с высоким $\cos\phi$, что позволяет использовать их в качестве генераторов электрической энергии. К преимуществам СД также относятся:

- возможность изготавливать СД мощностью до десятков мегаватт;
- высокий КПД, составляющий 96–98% [8], что превышает КПД АД аналогичной мощности на 1,5–2%;
- абсолютно жесткая механическая характеристика;
- возможность регулирования перегрузочной способности СД посредством изменения тока обмотки возбуждения. Перегрузочная способность СД зависит от напряжения питающей сети в меньшей степени по сравнению с АД, у которых эта зависимость квадратичная;

- большой воздушный зазор между ротором и статором, что позволяет конструкции эффективнее охлаждаться без применения принудительной вентиляции.

С точки зрения конструкции и интеграции с автоматикой управления частотой вращения, СД являются наиболее перспективными электрическими двигателями.

3.1. Устройство и принцип действия

Конструкция статора СД аналогична конструкции статора АД. Ротор СД представляет собой электромагнит постоянного тока, имеющего явно (рис.11а) или неявно выраженные (рис. 11б) полюсы. Электрический контакт ротора с источником постоянного тока осуществляется посредством соприкосновения вращающихся контактных колец (3) с электрическими щётками (не показаны на рисунке). К кольцам подключены катушки обмоток (2), смонтированные на полюсные наконечники (1) ротора. Протекающий в обмотке ротора ток возбуждает магнитное поле ротора, поэтому эта обмотка называется обмоткой возбуждения.

Поскольку при значительных скоростях вращения достаточно сложно обеспечить прочность ротора с явно выраженными полюсами, то такие конструкции используют в тихоходных СД. Ещё одним недостатком явнополюсного ротора являются значительные завихрения воздуха, которые при вращении ротора приводят к повышенным потерям на трение о воздух.

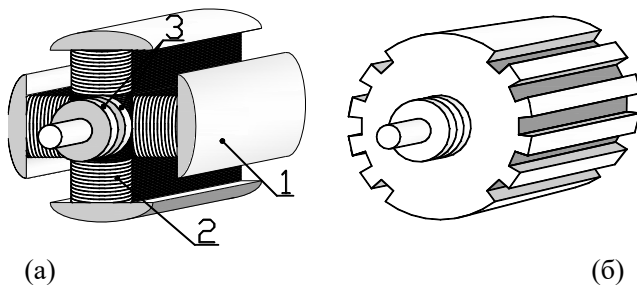


Рис. 11. Примеры конструкции ротора синхронного двигателя:
с явно выраженными полюсами (а) и неявно выраженными (б)

Конструкции роторов современных СД малой и средней мощности предусматривают наличие постоянных магнитов, возбуждающих собственное магнитное поле. Данный способ называется магнитоэлектрическим возбуждением.

3.2. Пуск синхронного двигателя

Пуск СД при неподвижном роторе невозможен собственным вращающим моментом. За первую положительную половину периода синусоиды напряжения на валу СД создаётся момент, разгоняющий ротор в прямом направлении, за вторую – такой же по величине отрицательный. Пуск невозможен, поскольку суммарный момент за период волны напряжения равен нулю. СД сможет запуститься в случае увеличения продолжительности воздействия на ротор положительного момента, что может быть получено путём снижения частоты вращения магнитного поля, либо предварительного разгона ротора до скорости, близкой к синхронной. Первый способ, осуществляемый путём запуска двигателя от преобразователя частоты, используется редко. Второй – асинхронный пуск – является наиболее распространённым в силу его простоты.

Для обеспечения возможности асинхронного пуска в полусные наконечники ротора встраивают короткозамкнутую обмотку, аналогичную беличьей клетке АД. В таком случае разгон СД до близкой к синхронной скорости осуществляется аналогично асинхронному двигателю. При достижении наиболее близкой к синхронной скорости подключается обмотка возбуждения, и скорость вращения вала СД становится синхронной со скоростью вращения магнитного поля. Беличья клетка СД, как правило, способна выдержать $20 \div 50$ с. эксплуатации в кратковременном пусковом режиме. Длительное использование пусковой беличьей клетки в асинхронном режиме недопустимо.

В режиме синхронного вращения ток в короткозамкнутой обмотке равен нулю. Следовательно, обмотка не оказывает влияния на работу двигателя. При изменении момента сопротивления нагрузки короткозамкнутая обмотка создаёт момент, подавляющий возникающие колебания ротора.

Пуск СД мощностью до нескольких сотен киловатт осуществляют прямым включением в сеть. Коэффициент кратности пускового тока при этом составляет $K=4\div 5$. Пуск более мощных СД сопровождается значительными пусковыми токами. Для их ограничения во время пуска применяют три основных способа:

- подключение в цепь обмотки ротора добавочного активного сопротивления;
- подключение в цепь обмотки ротора добавочного реактивного сопротивления
- подключение между питающей сетью и обмотками статора трансформаторов или автотрансформаторов с целью кратковременного уменьшения значений фазного напряжения.

3.4. Различные конструкции маломощных синхронных двигателей

Маломощные синхронные двигатели, предназначенные для работы в системах теплоснабжения и приборного привода, называемые иначе микродвигатели, имеют различное конструктивное исполнение. Различают двигатели: с электромагнитным возбуждением, с магнитоэлектрическим возбуждением или с постоянными магнитами, реактивные, гистерезисные. Особым преимуществом микродвигателей является способность поддержания постоянной скорости вращения вала ротора в независимости от колебаний напряжения питания и изменения момента нагрузки. В силу незначительной их мощности, вопросы энергосбережения здесь не столь актуальны, как быстродействие, надёжность, управляемость.

Микродвигатели, как правило, не изготавливаются на основе СД с электромагнитным возбуждением. Это связано с конструктивными сложностями и низкой надёжностью конструкции щёток и контактных колец, а также с необходимостью использования дополнительного источника питания постоянного тока. Среди микродвигателей широко распространены несколько видов двигателей, имеющих различные преимущества.

Реактивный двигатель, главными преимуществами которого являются простота и надёжность. К недостаткам относятся меньшие мощность и максимальный крутящий момент, чем у синхронных двигателей иных конструкций.

Гистерезисный двигатель, главным достоинством которого является способность самозапуска с большим пусковым моментом. Преимуществами также являются бесшумность, надёжность конструктивных элементов, достаточно высокий КПД, плавный процесс перехода на синхронную скорость. Важным свойством является малая кратность пускового тока $K=1,2-1,3$. К недостаткам относят колебания ротора, возникающие при изменении момента нагрузки, а также высокую стоимость, обусловленную сложностью изготовления ротора.

Шаговый (иначе импульсный) синхронный двигатель, главным достоинством которого является возможность регулирования скорости вращения в диапазоне от полной загрузки до полной остановки с возможностью фиксации ротора в заданном положении. Важной особенностью сочетания шагового двигателя с управляющей электроникой является возможность поворота ротора на малые углы в несколько десятков угловых секунд. При этом каждое положение ротора однозначно определяется кодовой комбинацией, что позволяет полностью контролировать процесс с помощью устройств цифровой обработки информации.

Маломощные синхронные двигатели используются, например, для автоматизации запорной арматуры, вентилях, управления воздушными заслонками и т.п.

4. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Среди рассмотренных типов электрических двигателей наиболее распространенными являются асинхронные двигатели. Суммарная мощность асинхронных двигателей составляет более 90% общей мощности всех существующих двигателей в мире. Поэтому дальнейшее рассмотрение способов повышения энергетической эффективности для систем с электрическими двигателями будет проводиться на примере асинхронных электрических машин.

Прямой пуск асинхронного двигателя является процессом энергетически неэффективным. Снижение потерь электрической энергии возможно в основном посредством регулирования скорости вращения ротора, что возможно посредством использования специализированной регулирующей аппаратуры. Управление скоростью вращения электрического привода позволяет создавать высокотехнологичную продукцию, что является основным требованием современной промышленности. Минимальные требования состоят, как правило, в наличии одного-двух режимов с различной частотой вращения.

4.1. Регулирование понижением напряжения питания

При снижении напряжения питания сети сохраняется значение критического скольжения, но снижается максимальный момент двигателя. При наличии на валу двигателя постоянной механической нагрузки скорость вращения вала будет также уменьшаться. Описанный случай возможен, например, в слабых электрических сетях северных районов, сельской местности и т.п. Данное свойство АД используется для регулирования скорости вращения и обеспечения плавного пуска.

При снижении скорости вращения ротора от номинальной до пониженной, момент на валу уменьшается примерно в квадратной зависимости от величины снижения скорости. Мощность потерь в обмотке ротора при этом уменьшается не столь интенсивно, что приводит к значительному перегреву обмоток ротора. Поэтому подобное регулирование, несмотря на простоту, используют только в случаях:

- необходимости малого диапазона регулирования скорости относительно номинальной;
- необходимости снижения скорости вращения одновременно с существенным снижением момента нагрузки на валу ротора;
- возможности использования двигателя с повышенным скольжением.

При снижении напряжения питающей сети в АД увеличивается величина скольжения. Такая особенность существенно ограничивает перечень возможных применений рассматриваемого способа регулирования.

Для трёхфазных электрических двигателей необходимо осуществлять одновременное регулирование напряжений каждой из фаз, что достигается применением специальных преобразователей. В случае несимметричного снижения напряжения мощность на валу снижается существенно (рис. 12).

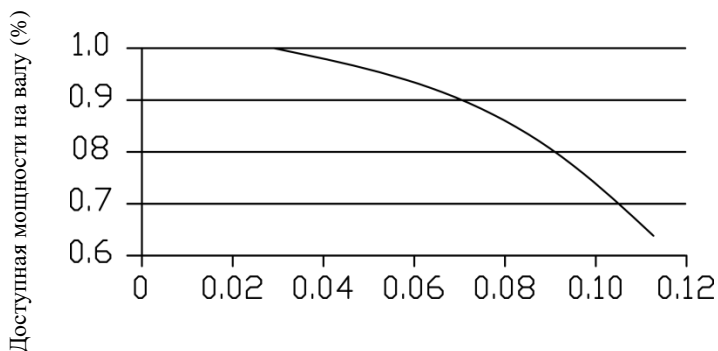


Рис. 12. Зависимость мощности на валу ротора от коэффициента асимметрии напряжений трёхфазной сети

К недостаткам способа регулирования скорости вращения АД изменением напряжения также относятся:

- со снижением напряжения электроприводом развивается все меньший вращающий момент. Граничным является режим «опрокидывания», при котором момент двигателя на валу равен моменту нагрузки;
- КПД $= 1-s$ и даже меньше;
- диапазон регулирования существенно ограничен условием: $0 < s < s_{кр}$. Поэтому рассматриваемый способ регулирования применяют к двигателями специального исполнения с повышенным критическим скольжением.

В настоящее время способ регулирования практически не применяется в силу своей неэффективности. В крайних случаях способ может применяться для плавного пуска приводов вентиляторов и насосов.

4.2. Регулирование изменением сопротивления цепи ротора

Способ также называется реостатным регулированием и применяется для АД с фазным ротором. Способ состоит во включении в цепь ротора разделённого на секции резистора, ступени которого переключаются либо регулировочными контактами либо путём реостатного изменения сопротивления (рис. 13).

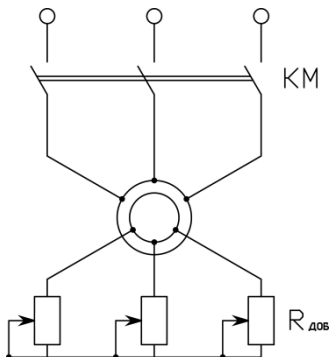


Рис. 13. Схема силовых цепей асинхронного электропривода с добавочными активными сопротивлениями в цепи обмотки ротора

Конструктивно способ реализуется путём включения добавочного сопротивления в цепь фазных обмоток ротора через контактные кольца.

Чем больше сопротивление цепи ротора, тем больше пусковой момент и тем меньше ток через роторную отмотку.

Пуск АД производится при включении полного добавочного сопротивления. При разгоне двигателя секции постепенно отключаются с одновременным увеличением скорости вращения.

Аналогичным способом возможно замедлить вращение двигателя путём последовательного присоединения секций добавочного сопротивления. Увеличение суммарного сопротивления обмотки реостата приводит к увеличению критического скольжения при сохранении максимального момента. В результате скорость вращения ротора замедляется.

Рассматриваемый способ регулирования теоретически прост, но имеет несколько существенных недостатков:

- эксплуатация АД с включенными сопротивлениями приводит к существенным потерям электрической энергии в добавочном сопротивлении, что экономически нецелесообразно;

- с увеличением добавочного сопротивления точность регулирования скорости вращения ротора снижается;

- при снижении нагрузочного момента на валу ротора диапазон возможного регулирования скорости вращения снижается. При скоростях вращения ниже $0,25\omega_0$ и в режимах близких к режиму холостого хода регулирование становится практически невозможным.

Двигатели с возможностью включения добавочного сопротивления в цепь фазных обмоток ротора существенно дороже двигателей с короткозамкнутым ротором.

4.3. Тиристорные пусковые устройства (устройства плавного пуска)

Целесообразным способом обеспечения плавности пуска асинхронного электрического двигателя является использование в их структурах тиристорных пусковых устройств, называемых также устройствами плавного пуска. Тиристорное пусковое устройство (ТПУ) представляет собой адаптированный к электромеханическим характеристикам АД регулятор напряжения переменного тока с фазовым управлением (рис. 14). Представленная схема обеспечивает изменения время открытия и закрытия тиристоров VS1-VS6, что позволяет задавать начальное и конечное фазовые значения питающего напряжения.

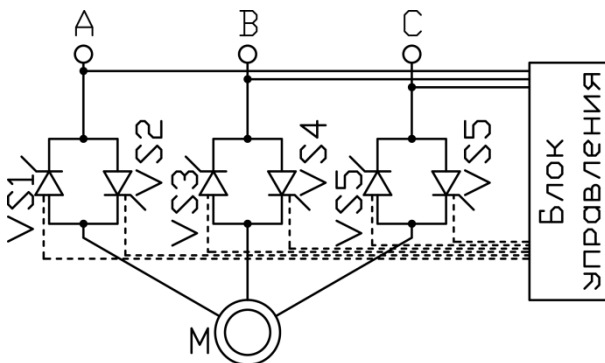


Рис. 14. Функциональная схема асинхронного электропривода с тиристорным пусковым устройством

В таком случае снижение фазного напряжения U_1 снижает вращающий момент двигателя пропорционально квадрату фазного напряжения U_1^2 . Синхронная скорость ω_0 и критическое скольжение s_k двигателя остаются постоянными. При наличии на валу двигателя постоянной механической нагрузки управление скоростью вращения вала возможно в диапазоне от ω_0 до $\omega_0 \cdot (1-s_k)$. Снижение U_1 на 30% обеспечивает уменьшение вращающего момента примерно в два раза.

Недостатки способа регулирования аналогичны недостаткам способа регулирования частоты вращения посредством понижения напряжения.

Устройства плавного пуска в настоящее время применяются практически во всех отраслях промышленности, сельском хозяйстве, сфере ЖКХ. Устройство обеспечивает регулирование напряжения на статоре при неизменной его частоте. Обладая относительной простотой схемы, хорошими массогабаритными характеристиками, ТПУ обеспечивают возможность:

- нивелировать пусковые броски динамического момента АД;
- ограничить ток и вращающий момент вала в пусковом, реверсном и тормозном режимах;
- уменьшить перегрев элементов двигателя;
- ограничить механические нагрузки на ротор и редуктор механической передачи кинематической схемы приводимого в движение технологического оборудования;
- в несколько раз снизить падение питающего напряжения при запуске мощных АД.

4.4. Использование устройств изменения частоты питания

Подбор электродвигательного оборудования осуществляется, как правило, с небольшим завышением мощности относительно проектных значений. Это связано с отсутствием в линейках производимой продукции электродвигателя, идеально соответствующего расчётным значениям. При эксплуатации электрические приводы, как правило, не используются на 100% паспортной мощности.

Наиболее целесообразное энергосберегающее мероприятие – включение между питающей сетью и электрической машиной устройства изменения частоты питания. Принцип действия частотного регулирования электрического привода (ЧРП) состоит в регулировании полупроводниковым преобразователем частоты питающей сети. Системы ЧРП-АД по типу связи с питающей сетью бывали с непосредственной связью, но сейчас выпускаются только со звеном постоянного тока. ЧРП со звеном постоянного тока в свою очередь изготавливают как автономные инверторы тока (АИТ) и как автономные инверторы напряжения (АИН). АИН содержат выпрямитель сетевого напряжения, фильтр гармоник тока и напряжения питающей сети, и инвертор, преобразующий постоянное напряжение в переменное напряжение требуемой частоты посредством команд от широтно-импульсного модулятора (ШИМ) (рис. 15).

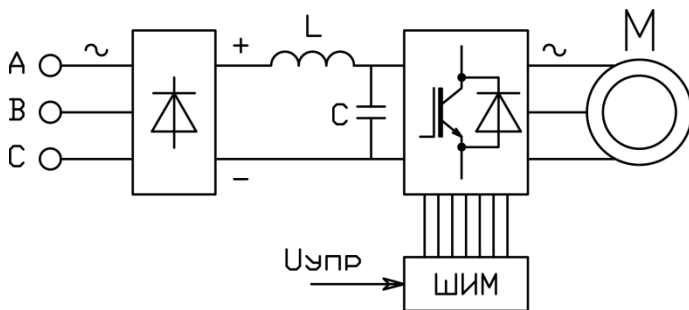


Рис. 15. Упрощенная схема преобразователя частоты асинхронного двигателя

Современные ЧРП осуществляют регулирование скорости вращения двигателя не только вниз, но и до 300% вверх относительно номинального значения. Помимо энергосберегающего эффекта, к преимуществам устройств ЧРП относятся:

- возможность обеспечения плавного пуска и изменения скорости вращения, что существенно повышает комфортность лифтовых механизмов;

- возможность косвенного контроля по моделям теплового режима регулируемого электрического двигателя, недопущение его перегрева, а, значит, увеличение срока безаварийной работы;

- возможность регулирования скорости вращения двигателей мощностью от десятков ватт до десятков мегаватт;

- возможность более точной подстройки переходных электротехнических процессов при регулировании электродвигателя к механическим характеристикам редуктора, что обеспечивает бесшумность и долговечность работы механической составляющей приводной установки;

- незначительные различия массогабаритных показателей АД с ЧРП и обычных электрических двигателей.

Основными недостатками является:

- низкий коэффициент мощности системы ЧРП-АД ($\cos\varphi \approx 0,15$);

- ЧРП производит значительный фон гармонических составляющих напряжения и тока в групповую сеть электродвигателя;

- сложности при генерации частот, незначительно отличающихся от частоты питающей сети.

Системы ЧРП-АД как правило применяются для безредукторных электроприводов любой мощности. Применение частотно-регулируемого электропривода целесообразно при резко переменной нагрузке, которая может определяться технологической схемой, различной загрузкой в зависимости от времени суток, количества людей в здании и т.п. Использование двигателей с ЧРП снижает расход электроэнергии на перемещение воздуха у вытяжных систем на 6–26% и у приточных систем на 3–12%. Внедрение систем ЧРП в городских насосных станциях водоснабжения дает экономию электроэнергии 20–50%.

Косвенный эффект для насосных и вентиляторных установок от применения ЧРП состоит в:

- экономии транспортируемого продукта, за счет снижения непроизводительных расходов, до 25%;

- снижении аварийности гидравлической или пневматической сети за счет поддержания минимально необходимого давления;

- снижении уровня шума, создаваемого технологическим оборудованием.

Физическую природу снижения энергопотребления проиллюстрируем на примере вентиляторов. Типичная характеристика центробежного вентилятора – зависимость выходного давления H от потока (расхода) воздуха Q (рис. 16). Она остается неизменной при постоянной частоте вращения вентилятора. Здесь же представлена характеристика системы вентиляции (кривая 1). Она показывает, какое давление требуется для обеспечения требуемого потока воздуха и покрытия всех потерь в системе. Точка пересечения двух кривых является фактической рабочей точкой системы.

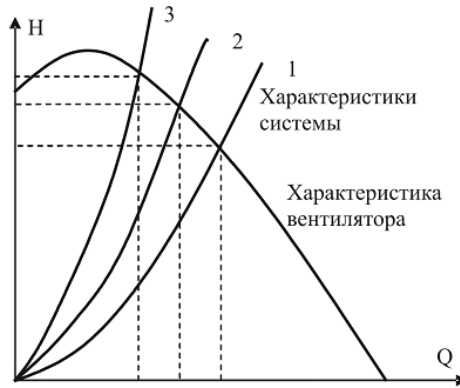


Рис. 16. Характеристики вентилятора и системы при регулировании шибером

Обычно производительность вентилятора изменяется установкой шиберов на выходе. Выходные шиберы воздействуют на характеристику системы, увеличивая сопротивление потоку воздуха. Показаны несколько характеристик системы (рис. 16) при различных положениях шиберов (кривая 1 соответствует полностью открытому шиберу). Известно, что мощность, потребляемая из сети двигателем турбомеханизма, пропорциональна произведению давления и расхода, т.е. пропорциональна площади прямоугольника, одна из вершин

которого совпадает с рабочей точкой, а противоположная – с началом координат. Из рисунка 16 видно, что изменение производительности вентилятора влияет на потребление энергии незначительно.

Изменение частоты вращения вентилятора приводит к изменению его характеристики (рис. 17). Здесь кривые 2 и 3 соответствуют пониженной частоте вращения. Из рисунка видно, что снижение частоты вращения вентилятора приводит к перемещению рабочей точки вдоль характеристики системы и существенному снижению расхода электроэнергии при тех же расходах, что и на рис. 16.

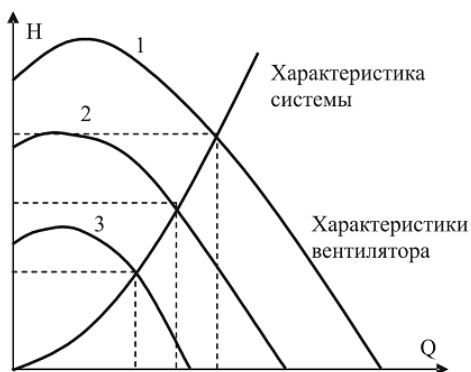


Рис. 17. Характеристики вентилятора и системы при регулировании частоты вращения

Аналогичные кривые можно построить и для центробежных насосов. Здесь изменение производительности обычно осуществляется дроссельными заслонками на выходе насоса. На рисунке 18 представлен сравнительный график мощности, потребляемой насосом, в зависимости от расхода при регулировании дросселированием и частотном регулировании. Разность между значениями этих кривых при заданном расходе позволяет определить экономию энергии при частотном регулировании по сравнению с регулированием дроссельной заслонкой (рис. 18, 19).

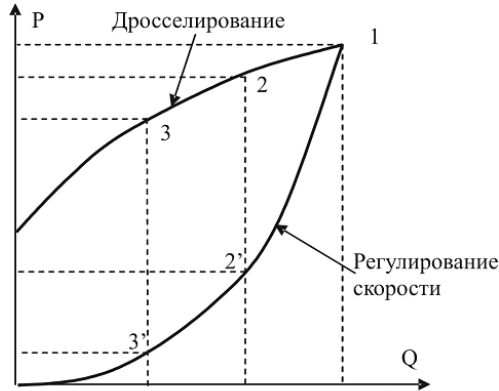


Рис. 18. Зависимость потребляемой мощности от расхода

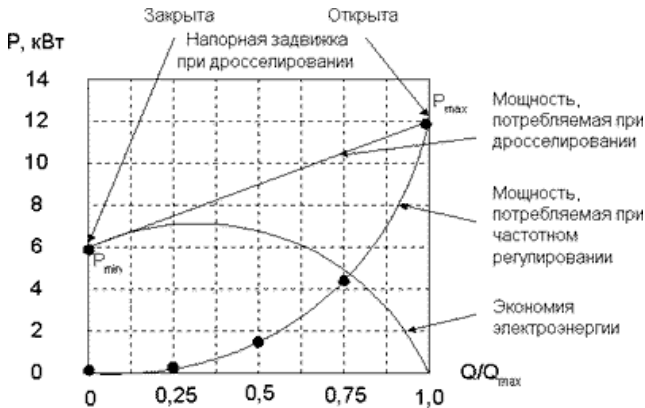


Рис. 19. Потребление мощности при различных способах регулирования скорости вращения насосов

Таким образом, при дросселировании поток вещества, сдерживаемый задвижкой или клапаном, не совершает полезной работы. Применение регулируемого электропривода насоса или вентилятора позволяет задать необходимое давление или расход, что обеспечит не только экономию электроэнергии, но и снизит потери транспортируемого вещества.

Характеристики системы

$$p = kQ^2 + p_0. \quad (12)$$

$$p_1 = k_1Q^2 + p_0. \quad (13)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (14)$$

Потребляемая электрическая мощность

$$P_1 = \frac{p_1 \cdot Q_1}{\eta_1}. \quad (15)$$

$$P_2 = \frac{p_2 \cdot Q_2}{\eta_2}. \quad (16)$$

Экономия потребляемой электрической мощности при регулировании частоты вращения электродвигателя:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{p_1 \cdot Q_1}{\eta_1} - \frac{p_2 \cdot Q_2}{\eta_2} = \frac{p_2 \cdot Q_2}{\eta_2} \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{1}{\eta_1} - 1 \right). \quad (17)$$

Экономия потребляемой электрической мощности при дросселировании:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{p_1 \cdot Q_1}{\eta_1} - \frac{p_2 \cdot Q_2}{\eta_2} = \frac{(k \cdot Q_1^2 + p_0)}{\eta_1} - \frac{(k_1 \cdot Q_2^2 + p_0)}{\eta_2}. \quad (18)$$

Электроприводы турбомеханизмов потребляют не менее 20–25% всей вырабатываемой электроэнергии и в большинстве случаев остаются нерегулируемыми, что не позволяет получить режим рационального энергопотребления и расхода воды, пара, воздуха и т.д. при изменении технологических потребностей в широких пределах. Силовое оборудование выбирается на максимальную производительность, в действительности же его среднесуточная загруженность может составлять около 50% от номинальной мощности. Значительное снижение момента нагрузки при снижении скорости вращения приводного двигателя, характерное для рассматриваемых механизмов, обеспечивает существенную экономию электроэнергии (до 50%) при использовании регулируемого электропривода и позволяет создать прин-

ципально новую технологию транспортировки воды, воздуха и т.д., обеспечивающую эффективное регулирование производительности агрегата. Кроме того, поддержание в системе минимально необходимого давления приводит к существенному уменьшению непроизводительных расходов транспортируемого продукта и снижению аварийности гидравлических и пневматических сетей.

Невысокие требования к качеству регулирования давления и расхода обуславливают возможность применения наиболее простых и, следовательно, относительно недорогих преобразователей. Положительным моментом является также то, что преобразователь частоты может быть легко внедрен в уже существующую установку без какой-либо реконструкции системы в целом. Сочетание высокой экономичности регулирования и относительно низкой стоимости оборудования обеспечивает минимальный срок его окупаемости (6–12 месяцев).

5. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

5.1. Корректный подбор электрического двигателя (переход на следующий класс энергетической эффективности АД)

Эффективным использованием энергетических ресурсов называют достижение экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдении требований к охране окружающей природной среды. Под повышением энергетической эффективности при эксплуатации электрических двигателей в дальнейшем будем понимать решение задач по снижению объемов потребляемой электрической энергии при сохранении выполнения задач, поставленных перед установкой, включающей рассматриваемый АД [9].

Потребляемая электрическим приводом электрическая энергия, помимо создания вращающего момента на нагрузке, расходуется на потери электрической энергии. Потери электродвигателя включают:

1) электрические потери (Омические потери), выраженные, как функция I^2R . Джоулевы потери выделяются в форме тепловой энергии, выделяемой на электрических сопротивлениях обмоток статора и ротора, стержнях и короткозамыкающих кольцах ротора. Потери существенно увеличиваются с возрастанием механической нагрузки двигателя. Чем выше сопротивление R , тем ниже КПД АД. Для снижения электрических потерь в электрической машине необходимо использовать двигатели высоких классов энергетической эффективности с повышенной проводимостью обмоток;

2) магнитные потери – потери, возникающие в результате явления гистерезиса и вихревых токов при перемагничивании пластин сердечника статора и ротора. Объем магнитных потерь находится примерно в квадратичной зависимости от плотности магнитного потока. Величина потерь на перемагничивание пластин уменьшается со снижением толщин этих пластин. Для снижения потерь целесообразно использовать АД с высоким качеством электротехнической стали и высокотехнологично изготовленными пластинами;

3) механические потери возникают как результат трения в подшипниках, потерь на вентиляцию и трения о воздух ротора. Для снижения механических потерь необходимо своевременно проводить регламентные работы по обновлению смазки подшипников;

4) добавочные потери, к которым относят все остальные трудно учитываемые потери, связанные с пульсациями магнитного поля, и поверхностные потери, возникающие в зубцах ротора и статора.

Соотношение потерь электрической энергии в АД различной мощности неодинаково. С увеличением мощности двигателя увеличиваются добавочные потери, растут потери на трение и вихревые токи. Потери в статоре уменьшаются (рис. 20).

Потери в двигателе на различных режимах его загрузки также различаются (рис. 21). С увеличением величины момента нагрузки на валу увеличиваются добавочные потери и Омические потери в обмотках статора. Потери в сердечнике ротора, а также потери на трение и вихревые токи остаются практически неизменными при любой загрузке АД. При загрузке около 50% суммарные переменные потери электроэнергии становятся равны суммарным постоянным потерям двигателя.

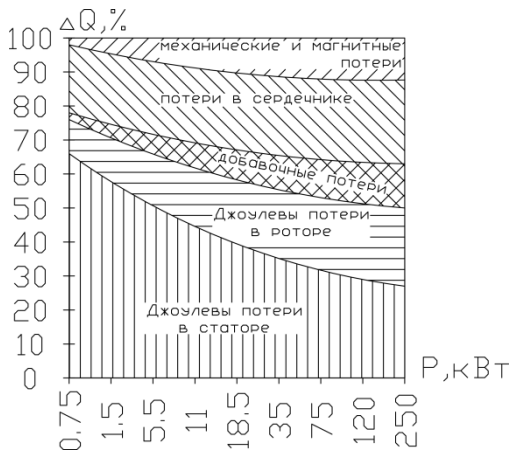


Рис. 20. Потери в асинхронных электрических машинах относительно их мощности

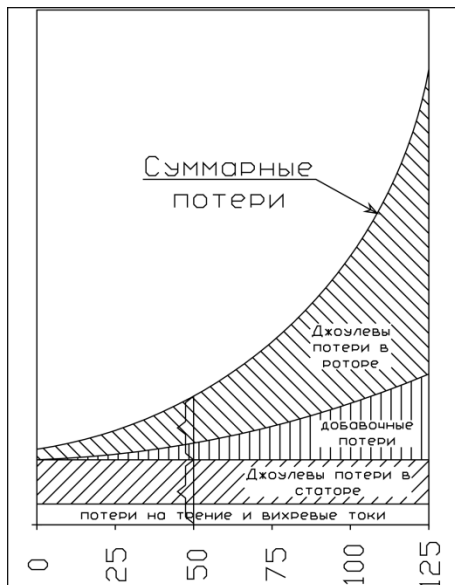


Рис. 21. Потери в асинхронных электрических машинах относительно их загрузки

Чем больше нагрузка двигателя, тем больше потери в обмотке статора, и тем сильнее греется корпус двигателя. Поэтому важно не производить дополнительную окраску кожухов электрических двигателей, поскольку дополнительный слой краски ухудшает отвод тепла. Неоднократная дополнительная окраска корпусов электродвигателей приводит к их перегреву и ускоренному износу изоляции.

К настоящему моменту созданы и введены в действие ключевые стандарты, содержащие основные положения по тестированию энергоэффективности электрических приводов. Стандарты, например, содержат технические инструкции по применению энергоэффективных двигателей с постоянной и регулируемой скоростью [10]. Отдельный стандарт устанавливает методы определения эффективности путём испытаний, а также определяет порядок метода расчёта удельных потерь [11] для всех двигателей постоянного тока, синхронных и асинхронных двигателей переменного тока всех габаритов [12]. Стандарт позволяет определить энергоэффективность системы на основании конкретных критериев, как, например, профиля скорости / нагрузки, профиля эксплуатации, типа и конструкции привода. Устанавливает пределы максимальных потерь компонентов или общих потерь системы электропривода. Стандарт также описывает методологию определения потерь.

В марте 2015г. выпущен стандарт [13], описывающий количественный подход к экологичности конструкций путём оценки жизненного цикла, включая правила категоризации и содержание деклараций по защите окружающей среды.

Используется стандарт [14], определяющий классы энергоэффективности для односкоростных электродвигателей переменного тока с прямым пуском. Стандарт также приводит в соответствие различные классы эффективности (рис. 22), используемые в мире и устанавливает уровни КПД для двигателей в сети 50Гц и 60Гц числом полюсов от 2 до 8 и мощностями от 120Вт до 1МВт. Особенность стандарта состоит в отсутствии различий между технологиями изготовления электрических двигателей.

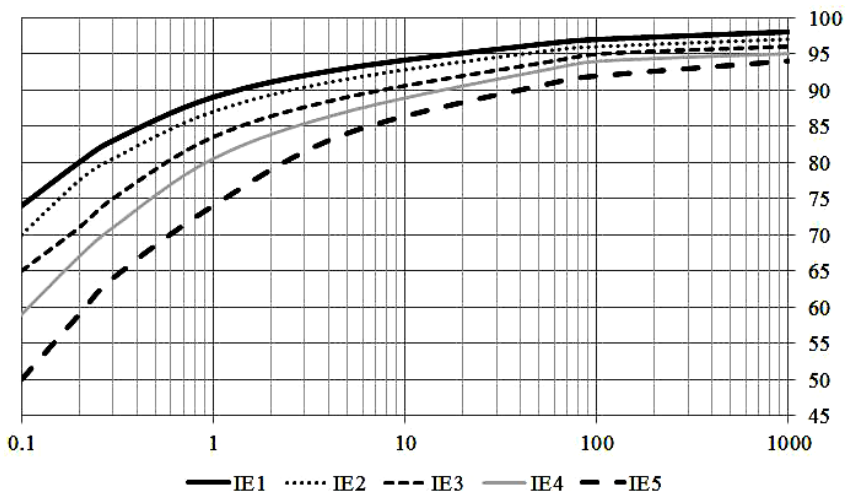


Рис. 22. Зависимость минимальных требований к КПД АД (%) от их электрической мощности (кВт)

Опираясь на данный график легко сравнить КПД и потери нескольких асинхронных двигателей, имеющих одинаковую электрическую мощность, но различный класс энергетической эффективности (IE). Очевидно, что АД с высоким IE имеет меньшие потери относительно АД с IE1, а значит целесообразнее к использованию с точки зрения энергетической эффективности. При выборе предпочтительного электропривода необходимо также использовать и экономические критерии оценки целесообразности применения новых электрических машин.

Помимо подбора наиболее целесообразного АД с точки зрения потерь электрической энергии, существует ещё несколько способов повышения КПД системы электропривода при эксплуатации:

- улучшение механического КПД конечного пользователя (насос, вентилятор, компрессор и пр.);
- снижение потерь при механической передаче путём качественной технической эксплуатации и своевременного выполнения регламентных работ;

- снижение потерь электрической энергии в распределительной сети путём целесообразного сокращения длин и увеличений сечения проводников;
- регулирование крутящего момента двигателя посредством использования устройств изменения частоты питания;
- улучшение таких показателей качества электрической энергии, как колебания напряжения, снижение фона высших гармоник тока и напряжения.

Рассмотрим некоторые из предложенных способов подробнее.

5.2. Установка фильтров высших гармоник тока

Для предотвращения воздействий высших гармоник, проектирование силовых машин осуществляется в том числе с расположением рабочей точки на кривой гистерезиса магнитопровода в зоне перехода кривой в насыщение. Ток намагничивания в данной зоне имеет выраженную форму пика с преобладанием третьей гармоники и составляет несколько процентов от номинального. Дополнительные потери в магнитопроводе от токов высших гармоник невелики.

При протекании токов высших гармоник в сопротивлении обмоток статора и ротора выделяется дополнительное тепло, вызывающее перегрев и ускоренный износ электродвигателей. Дополнительный нагрев также ухудшает свойства электротехнической стали, что дополнительно увеличивает потери в магнитопроводе.

Гармоники тока и напряжения имеют увеличенную относительно сетевой частоту, а, значит, часть периода частоты ток гармоники сонаправлен с частотой сети, а часть – противоположен. Создаваемый при этом ток несинусоидальной формы (рис. 23) индуцирует дополнительное изменяющееся магнитное поле, что создаёт на валу ротора дополнительные вибрации. Наличие гармоник приводит к значительной вибрации вала и ускоренному износу подшипников.

АД с незначительной мощностью и однофазные электродвигатели более чувствительны к высшим гармоникам тока и напряжения. Конструкция маломощных электродвигателей содержит вспомогательные параллельные обмотки с пусковыми конденсаторами. На частотах с 4-й по 11-ую возможен резонанс токов между индуктив-

ностью вспомогательной обмотки и ёмкостью пускового конденсатора. Экспериментально показано, что наличие 6% токов 3-й и 5-й гармоник приводит к снижению срока службы однофазных двигателей на 25 – 30% [15].

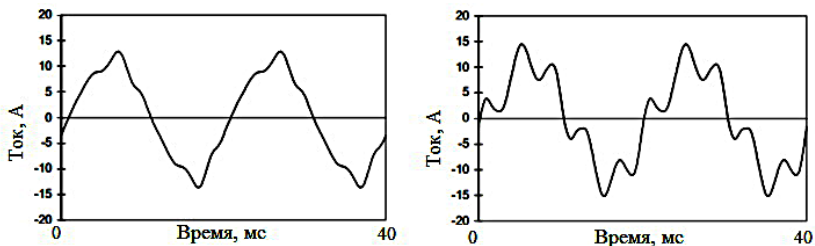


Рис. 23. Кривые тока питания однофазного асинхронного электродвигателя мощностью 1,5 кВт:
напряжением с 1,3%-ным (а) и 5,4%-ным (б) уровнями 5-й гармоники [15]

К способам снижения гармонического фона при эксплуатации электрических машин относится, как правило, применение пассивных и активных фильтрующих устройств.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные типы электрических двигателей.
2. Опишите принцип действия бесколлекторной машины переменного тока.
3. Опишите устройство ротора асинхронного двигателя.
4. Перечислите режимы работы асинхронного двигателя и значения скольжения в каждом из них.
5. По шильдику прибора определить основные параметры электрического двигателя.
6. Перечислите способы пуска асинхронного двигателя, их преимущества и недостатки.
7. Опишите назначение «беличьей клетки» ротора и целесообразность её разделения на верхнюю и нижнюю.
8. Опишите принцип действия синхронного электрического двигателя.
9. Перечислите преимущества и недостатки асинхронных электрических машин перед синхронными.
10. Опишите способ запуска синхронного электрического двигателя.
11. Перечислите основные способы регулирования скорости вращения ротора асинхронного двигателя.
12. Опишите способ регулирования скорости вращения АД посредством понижения напряжения питания, опишите преимущества и недостатки способа.
13. Опишите способ регулирования скорости вращения АД посредством изменения сопротивления цепи ротора, опишите преимущества и недостатки способа.
14. Опишите способ регулирования скорости вращения АД посредством тиристорных пусковых устройств, опишите преимущества и недостатки способа.
15. Опишите способ регулирования скорости вращения АД посредством применения устройств изменения частоты питания, опишите преимущества и недостатки способа.
16. Перечислите и опишите основные типы потерь электрической энергии в электрических двигателях.
17. Перечислите основные способы повышения КПД системы электропривода при эксплуатации.
18. Опишите воздействие высших гармоник тока на элементы асинхронного двигателя, перечислите способы компенсации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дементьев, Ю.Н.** Электрический привод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Томск: Изд-во ТПУ, 2010.

2. Продукция ООО «Лутос». — Режим доступа:

<http://www.lutos.cz/ПРОДУКТЫ.htm>

3. Техническая информация Циркуляционные насосы типа ЦНЛ. — Режим доступа: <http://www.agregat-nasos.spb.ru/teh21.shtml>

4. Насосы для химической промышленности ООО «ЭНЦЕ инжиниринг». — Режим доступа:

http://www.ence-pumps.ru/vodokoltseve_vakuumnnye_nasosy.php#dry_vacuum_pumps_adj_pitch_params

5. Волков, А.В. Получение электрической энергии в системах тепло- и водоснабжения на основе рекуперации избыточного магистрального давления / А.В.Волков, А. Г. Парыгин, В.А.Рыженков, С.Н. Щербаков. — Режим доступа:

<http://www.combienergy.ru/stat/1095-Poluchenie-elektricheskoy-energii-v-sistemah-teplo>

6. Технический каталог. Европейский рынок. Трёхфазные электродвигатели W22. — СПб., 2016. — Режим доступа:

<http://en-res.ru/document/elektrodivigateli-weg-dokumentaciya.html>

7. **Москаленко, В.В.** Электрический привод / В.В. Москаленко. — М.: Высшая школа, 1991.

8. **Усольцев, А.А.** Общая электротехника: учеб. пособие / А.А. Усольцев. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.

9. Методические рекомендации по расчету эффектов от реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности / под ред. Е.Г. Гашо. — М.: Аналитический центр при правительстве Российской Федерации, 2016.

10. ГОСТ ИЕС/TS 60034-31-2015 «Машины электрические вращающиеся. Часть 31. Выбор энергоэффективных двигателей, включая приводы с регулирующей скоростью. — Режим доступа:

http://allgosts.ru/29/160/gost_ИЕС!TS_60034-31-2015

11. ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009 «Машины электрические вращающиеся. Часть 2–1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава)». — Режим доступа:

<http://docs.cntd.ru/document/1200081370>

12. ГОСТ IEC 60034-1-2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики». – Режим доступа:

<http://www.internet-law.ru/gosts/gost/60014/>

13. EN 50598-3 «Экодизайн для систем силовых приводов, пускателей двигателей, силовой электроники и их приложений. Часть 3. Количественный подход к экологичности конструкций путем оценки жизненного цикла, включая правила категоризации продукции и содержание деклараций по защите окружающей среды». – Режим доступа: <http://www.standards.ru/document/6099545.aspx>

14. IEC 60034-30-1 «Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности асинхронных трёхфазных короткозамкнутых двигателей (IE-коды)». – Режим доступа:

https://library.e.abb.com/public/1018a82e36b29462c1257d41002b3470/TM025%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1_lowres.pdf

15. **Янченко, С.А.** Работоспособность и качество функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения: учеб.-метод. пособие / С.А. Янченко, С.В. Гужов. – М.: Изд-во МЭИ, 2016.

Учебное издание

Гужов Сергей Вадимович
Юркина Мария Юрьевна
Глазов Василий Степанович

**СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ
В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

Учебное пособие

Редактор издательства Т.А. Феоктистова
Компьютерная верстка Ю.И. Захаровой

Подписано в печать	31.07.2017 .	Печать офсетная	Формат 60×84/16
Физ. печ. л. 2,75	Тираж 150 экз.	Изд. № 17у-041	Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.