

А.М. АБАКУМОВ

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
В НЕРЕГУЛИРУЕМОМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

Учебное пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2020



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

А.М. АБАКУМОВ

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В НЕРЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Учебное пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2020

Печатается по решению ученого совета СамГТУ (протокол № 8 от 28.03.2019 г.).

УДК 621.311(075.8)

ББК 31.29-5я73

А 13

Абакумов А.М.

Энергосбережение в нерегулируемом электроприводе: учеб. пособие / *А.М. Абакумов.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 79 с.

Приведена классификация асинхронных двигателей по показателям энергоэффективности, рассмотрены способы снижения потерь электроэнергии в нерегулируемых электроприводах с асинхронными двигателями, проанализирована целесообразность использования компенсирующей способности синхронных двигателей в системах электроснабжения.

Предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры высших технических учебных заведений, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Может быть использовано студентами других родственных направлений подготовки.

Рецензент: д-р техн. наук *Л.С. Зимин*

УДК 621.311(075.8)

ББК 31.29-5я73

А 13

© А.М. Абакумов, 2020

© Самарский государственный
технический университет, 2020

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема энергосбережения в электроприводе, потребляющем более половины всей вырабатываемой электроэнергии, является одной из актуальных в электромеханике и электроприводе.

Предлагаемое издание адресовано студентам бакалавриата направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника», профиля «Электромеханика», осваивающим дисциплину «Энергосберегающие технологии в электромеханике», а также студентам магистратуры, обучающимся по программе «Современные технологии в электромеханике и автоматизированном электроприводе» и может быть полезно студентам бакалавриата и магистратуры других профилей.

В учебном пособии рассмотрены энергетические характеристики асинхронных и синхронных электродвигателей, классификация асинхронных двигателей по энергоэффективности и ряд способов повышения энергетической эффективности электроприводов переменного тока.

Каждый раздел пособия, наряду с теоретической частью, содержит задания, методические указания к их выполнению и примеры расчетов.

Указанный материал может использоваться с учетом часов, отводимых в учебном плане на отдельные виды занятий, для проведения практических занятий, лабораторных работ, заданий на самостоятельную работу, а также в случае применения электронного обучения и дистанционных образовательных технологий для студентов заочной формы обучения.

Методики и результаты выполнения ряда заданий могут быть полезны для последующего написания отдельных разделов выпускной квалификационной работы.

ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические преобразователи (ЭМП) характеризуются высоким коэффициентом полезного действия (КПД).

Так, первые асинхронные трехфазные двигатели (АД), разработанные М.О. Доливо-Добровольским и представленные на Международной электротехнической выставке 1891 г. во Франкфурте-на-Майне, уже обладали достаточно высокими энергетическими характеристиками. В докладе Доливо-Добровольского приведены данные, показывающие, что созданные им двигатели имеют КПД до 88 %.

Тем не менее, вопросам повышения энергетических показателей ЭМП всегда уделялось большое внимание. Наиболее остро проблема разработки ЭМП с повышенным КПД, в частности энергосберегающих двигателей, встала в связи с мировым энергетическим кризисом в конце 1970-х годов. Анализ проблемы показал, что сэкономить одну тонну условного топлива во много раз дешевле, чем добыть.

В структуре потерь электроэнергии основную долю составляют потери в сфере потребления – около 90 %, в то время как потери при передаче не превышают 9–10 % [3]. Основным потребителем электроэнергии является электропривод, на его долю приходится около 60 % всей произведенной электроэнергии. В связи с этим вопросам повышения энергоэффективности электропривода уделяется особое внимание.

В качестве ЭМП – обязательного элемента любого электропривода – наиболее широко используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели (СД).

Эффективными мерами повышения энергоэффективности нерегулируемых электроприводов с АД является совершенствование энергетических характеристик двигателя – разработка и использование энергосберегающих двигателей, а также оптимизация режимов работы электроприводов.

В электроприводах с СД за счет управления током возбуждения может обеспечиваться режим работы с генерацией реактивной мощ-

ности, позволяющий компенсировать реактивную мощность смежных электроприемников системы электроснабжения. Использование компенсирующей способности СД позволяет снизить потери мощности в системе электроснабжения.

В нашей стране в 2010 г. принята Государственная программа РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 г.» [2]. В ней указан ряд мер повышения энергетической эффективности, в том числе применительно к электроприводу.

В разделе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в системах коммунальной инфраструктуры и наружного освещения»:

– «внедрение эффективных электродвигателей и оптимизация систем работы электродвигателей, внедрение ЧРП на электродвигателях водозаборов, насосных и канализационных станций».

В разделе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в промышленности»:

– «установка новых электродвигателей, соответствующих классу высокоэффективных, отказ от перемотки двигателей;

– замена старых моторов в пропорции 50:50 на высокоэффективные двигатели и двигатели с повышенной эффективностью, доведение к 2020 г. доли эффективных электродвигателей до 48 %, электродвигателей повышенной эффективности – до 26 %».

Известно [2, 3, 11], что наряду с мерами повышения энергетической эффективности нерегулируемого электропривода, значительный резерв энергосбережения может быть реализован за счет использования регулируемого электропривода. Однако эти вопросы выходят за рамки настоящего издания.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Векторная диаграмма токов и напряжения для одной фазы асинхронного двигателя приведена на рис. 1.1, *а*. Вектор полного фазного тока $\dot{I}_{1\phi}$ АД отстает от напряжения \dot{U}_1 на обмотке статора на некоторый угол φ и может быть представлен в виде активной \dot{I}_a и реактивной \dot{I}_p составляющих. Первая составляющая создает момент двигателя, а вторая – магнитное поле двигателя.

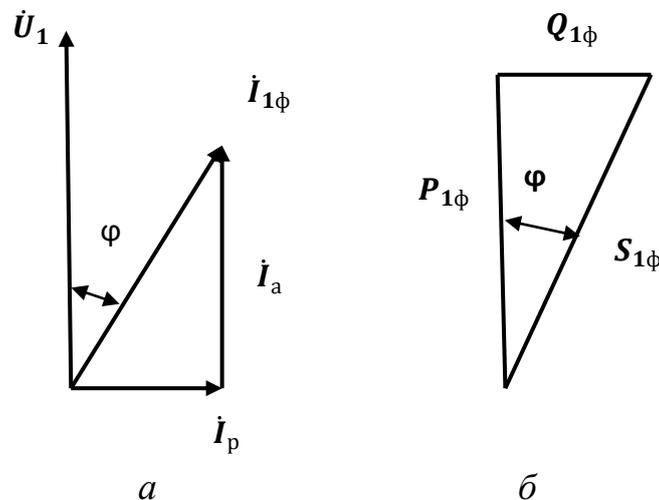


Рис. 1.1. Векторная диаграмма токов асинхронного двигателя (*а*) и треугольник мощностей (*б*)

Умножив полный ток и его составляющие на напряжение, получим выражения для полной, активной и реактивной мощности:

$$S_{1\phi} = U_1 I_{1\phi}; P_{1\phi} = U_1 I_{1\phi} \cos\varphi; Q_{1\phi} = U_1 I_{1\phi} \sin\varphi.$$

Соответствующий треугольник мощностей показан на рис. 1.1, *б*.

Обмотки статора трехфазного асинхронного и синхронного двигателя могут соединяться по схеме «треугольник» или «звезда». В паспортных данных двигателя указываются:

$U_{1\text{ном}Y}/U_{1\text{ном}\Delta}$ – номинальное напряжение, соответствующее включению обмоток в схему «звезда» и схему «треугольник»;

$I_{1\text{ном}Y}/I_{1\text{ном}\Delta}$ – соответствующие номинальные токи;

$f_{\text{НОМ}}$ – номинальная частота сети;

$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность на валу;

$n_{\text{НОМ}}$ или n_c – номинальная или синхронная частота вращения, об/мин;

$\eta_{\text{НОМ}}$ – номинальный КПД;

$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности.

Для соединения обмоток в схему «звезда» фазное напряжение $U_{1\text{ф.НОМ}} = U_{1\text{л.НОМ}}/\sqrt{3}$, а фазный ток равен линейному: $I_{1\text{ф.НОМ}} = I_{1\text{л.НОМ}}$. Полная, активная и реактивная мощность, потребляемая трехфазным двигателем из сети в номинальном режиме:

$$S_{1\text{НОМ}} = 3U_{1\text{ф.НОМ}}I_{1\text{ф.НОМ}} = 3\frac{U_{1\text{л.НОМ}}}{\sqrt{3}}I_{1\text{л.НОМ}} = \sqrt{3}U_{1\text{л.НОМ}}I_{1\text{л.НОМ}}; \quad (1.1)$$

$$P_{1\text{НОМ}} = S_{1\text{НОМ}}\cos\varphi_{\text{НОМ}} = \sqrt{3}U_{1\text{л.НОМ}}I_{1\text{л.НОМ}}\cos\varphi_{\text{НОМ}}; \quad (1.2)$$

$$Q_{1\text{НОМ}} = S_{1\text{НОМ}}\sin\varphi_{\text{НОМ}} = \sqrt{3}U_{1\text{л.НОМ}}I_{1\text{л.НОМ}}\sin\varphi_{\text{НОМ}}. \quad (1.3)$$

Для соединения обмоток в схему «треугольник» фазное напряжение равно линейному: $U_{1\text{ф.НОМ}} = U_{1\text{л.НОМ}}$, а фазный ток $I_{1\text{ф.НОМ}} = I_{1\text{л.НОМ}}/\sqrt{3}$. Полная, активная и реактивная мощность, потребляемая трехфазным двигателем из сети:

$$S_{1\text{НОМ}} = 3U_{1\text{ф.НОМ}}I_{1\text{ф.НОМ}} = 3U_{1\text{л.НОМ}}\frac{I_{1\text{л.НОМ}}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}U_{1\text{л.НОМ}}I_{1\text{л.НОМ}};$$

$$P_{1\text{НОМ}} = S_{1\text{НОМ}}\cos\varphi_{\text{НОМ}} = \sqrt{3}U_{1\text{л.НОМ}}I_{1\text{л.НОМ}}\cos\varphi_{\text{НОМ}};$$

$$Q_{1\text{НОМ}} = S_{1\text{НОМ}}\sin\varphi_{\text{НОМ}} = \sqrt{3}U_{1\text{л.НОМ}}I_{1\text{л.НОМ}}\sin\varphi_{\text{НОМ}}.$$

Таким образом, расчетные формулы для схем соединения «треугольник» и «звезда» совпадают. Подчеркнем, что это справедливо,

когда схема соединения обмоток и номинальные значения тока и напряжения соответствуют паспортным данным двигателя. В случае использования переключения обмоток со схемы «треугольник» на схему «звезда» при неизменном напряжении сети (такое переключение используется для снижения пусковых токов и рассмотрено в разделе б) характеристики двигателя изменяются.

Потери активной мощности в двигателе для номинального режима работы определяются как разность мощности, потребляемой из сети, и номинальной мощности на валу $P_{\text{ном}}$:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_{\text{ном}}. \quad (1.4)$$

Приведенные выражения (1.1)–(1.4), записанные для номинального режима работы двигателя, остаются справедливы и для режимов работы, отличающихся от номинального. В последнем случае следует опускать индекс номинального режима в обозначении переменных.

Показателями энергетической эффективности АД являются:

– коэффициент полезного действия, представляющий отношение полезной мощности P , кВт, на валу двигателя к активной мощности P_1 , кВт, потребляемой двигателем из сети:

$$\eta = P/P_1; \quad (1.5)$$

– коэффициент мощности, представляющий отношение потребляемой активной мощности P_1 , кВт, к полной мощности S_1 , кВА, потребляемой из сети:

$$\cos\varphi = P_1/S_1. \quad (1.6)$$

Для режима работы двигателя, отличающегося от номинального, потери активной мощности в двигателе составят:

$$\Delta P = P_1 - P. \quad (1.7)$$

Активная мощность, потребляемая из сети, может быть определена как на основе электрических переменных по формуле (1.2), так и с использованием значения КПД двигателя:

$$P_1 = P/\eta. \quad (1.8)$$

Подставив последнее выражение в соотношение (1.7), потери активной мощности можно представить в виде

$$\Delta P = P_1 - P = P(1/\eta - 1). \quad (1.9)$$

Формулы (1.5)–(1.9) справедливы и для номинального режима. Необходимо только добавить индекс номинального режима при записи переменных.

Задание 1. Известны каталожные данные асинхронного короткозамкнутого двигателя для номинального режима (табл. 1.1) [9, 10].

Определить номинальные значения тока статора, полной, активной и реактивной мощности, потребляемой двигателем из сети. Определить потери активной мощности в АД при работе в номинальном режиме.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Исходные данные для расчета

№ вар.	Тип АД	$P_{\text{ном}}$, кВт	n_c , об/мин	$U_{1\text{л.ном}}$, В	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$, А
1	A4-400ХК-4МУ3	400	1500	6000	95,5	0,89	113
2	A4-400Х-4МУ3	500	1500	6000	94,7	0,88	58
3	A4-400У-4МУ3	630	1500	6000	95,2	0,88	72,5
4	A4-450Х-4МУ3	800	1500	6000	95,2	0,88	92
5	A4-450У-4МУ3	1000	1500	6000	95,5	0,89	113
6	A4-400ХК-6МУ3	315	1000	6000	93,6	0,85	38
7	A4-400Х-6МУ3	400	1000	6000	94	0,86	47,5
8	A4-400У-6МУ3	500	1000	6000	94,4	0,86	59,5
9	A4-450Х-6МУ3	630	1000	6000	94,7	0,86	74,5

Пример 1

Поясним последовательность расчетов для исходных данных варианта 9.

Рассчитываем значение номинального линейного тока (в каталогах оно не всегда приводится). Из соотношения (1.2) запишем выражение для номинального тока:

$$I_{1\text{л.ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{1\text{л.ном}}\cos\varphi_{\text{ном}}}.$$

Подставив в него выражение (1.8) для $P_{1\text{ном}}$, получим:

$$I_{1\text{л.ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{1\text{л.ном}}\cos\varphi_{\text{ном}}\eta_{\text{ном}}}. \quad (1.10)$$

Используя это выражение, рассчитываем:

$$I_{1\text{л.ном}} = \frac{630 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 1000 \cdot 0,86 \cdot 0,947} = 74,4 \text{ А.}$$

Полученное значение практически совпадает с указанным в каталоге (в каталогах линейный номинальный ток обозначается $I_{\text{ном}}$). Рассчитываем значение полной мощности, потребляемой из сети, по формуле (1.1):

$$S_{1\text{ном}} = \sqrt{3}U_{1\text{л.ном}}I_{1\text{л.ном}} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 74,4 = 773 \text{ кВА.}$$

По формуле (1.2) находим значение активной мощности, потребляемой из сети:

$$\begin{aligned} P_{1\text{ном}} &= \sqrt{3}U_{1\text{л.ном}}I_{1\text{л.ном}}\cos\varphi_{\text{ном}} = \\ &= \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 74,4 \cdot 0,86 = 665 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Определяем номинальное значение угла:

$$\varphi_{\text{ном}} = \arccos\varphi_{\text{ном}} = \arccos(0,86) = 0,535 \text{ рад.}$$

Определяем значение реактивной мощности по формуле (1.3):

$$Q_{1\text{НОМ}} = \sqrt{3}U_{1\text{Л.НОМ}}I_{1\text{Л.НОМ}}\sin\varphi_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 74,4 \cdot \sin 0,535 = 394 \text{ квар.}$$

Для проверки вычисляем значение полной мощности по формуле

$$S_{1\text{НОМ}} = \sqrt{P_{1\text{НОМ}}^2 + Q_{1\text{НОМ}}^2} = \sqrt{665^2 + 394^2} = 773 \text{ кВА,}$$

что совпадает с ранее рассчитанным значением.

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы по работе.

В выводах сравните:

- рассчитанное значение номинального тока с паспортным;
- значения полной мощности, рассчитанные по разным формулам.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятия КПД и коэффициента мощности АД.
2. Поясните, что понимают под треугольником мощностей.
3. Как соотносятся линейные и фазные значения тока и напряжения для схем соединения «звезда» и «треугольник»?
4. По каким формулам рассчитывается полная, активная и реактивная мощность, потребляемая двигателем из сети, для соединения обмоток в схемы «звезда» и «треугольник»?

2. ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АД. КЛАССЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Требуемые значения КПД асинхронных двигателей регламентируются соответствующими нормативными документами.

В качестве национального стандарта Российской Федерации с 2015 г. введен в действие Межгосударственный стандарт ГОСТ 31605-2012 Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности [5].

Указанный стандарт распространяется на трехфазные АД с короткозамкнутым ротором общего назначения мощностью от 1 до 400 кВт включительно для работы от сети переменного тока напряжением до 690 В, производимые для нужд народного хозяйства и экспорта.

Согласно стандарту, в зависимости от требований к уровню энергоэффективности двигатели подразделяют на следующие виды:

– *двигатели с нормальным КПД*: АД общепромышленного назначения, КПД которых соответствует уровню, достигнутому в производстве двигателей серии АИ;

– *двигатели с повышенным КПД (энергосберегающие двигатели)*: двигатели общепромышленного назначения, у которых суммарные потери мощности не менее чем на 20 % меньше суммарных потерь мощности двигателей с нормальным КПД той же мощности и частоты вращения.

Потери мощности в двигателях с нормальным КПД (стандартные АД) будем обозначать $\Delta P_{ст}$, а их КПД – $\eta_{ст}$. Потери мощности и КПД энергосберегающих двигателей обозначим $\Delta P_{эс}$ и $\eta_{эс}$. Относительный уровень снижения потерь в общем случае принято обозначать буквой e .

По требованиям ГОСТа значение e должно быть не менее 20 %: $e \% \geq 20 \%$, или в относительных единицах (о.е.) $e \geq 0,2$.

Иными словами, суммарные потери активной мощности в энергосберегающем двигателе должны удовлетворять условию

$$\Delta P_{эс} \leq \Delta P_{ст} \frac{(100 \% - e \%)}{100 \%}, \quad (2.1)$$

или при использовании значения e в относительных единицах

$$\Delta P_{эс} \leq \Delta P_{ст}(1 - e). \quad (2.2)$$

Подставив в соотношение (2.2) выражение (1.9), получим следующую формулу для потерь активной мощности энергосберегающего двигателя:

$$\Delta P_{эс} \leq P_{ст}(1/\eta_{ст} - 1)(1 - e). \quad (2.3)$$

После преобразований выражения (2.3) формулу для КПД энергосберегающего двигателя при различных уровнях снижения суммарных потерь e , о.е., можно записать в виде

$$\eta_{эс} \geq \frac{\eta_{ст}}{1 - (1 - \eta_{ст})e}. \quad (2.4)$$

Минимальные значения КПД энергосберегающего двигателя (для случая снижения суммарных потерь мощности в двигателе на 20 %, т.е. при $e = 0,2$ о.е.), с учетом выражения (2.4), определяют по формуле

$$\eta_{эс} \geq \frac{\eta_{ст}}{0,8 + 0,2\eta_{ст}} \quad (2.5)$$

или, когда КПД выражен в процентах,

$$\eta_{эс} \% \geq \frac{\eta_{ст} \%}{80 + 0,2\eta_{ст} \%} \cdot 100 \% . \quad (2.6)$$

Маркировка двигателей с повышенным КПД по ГОСТ 28330: при маркировании в условном обозначении двигателей с повышенным КПД применяют строчную букву e , которую располагают после цифры, обозначающей число полюсов двигателя. Пример условного обозначения асинхронного двигателя серии 5А высотой оси вращения 180 мм, относительной длиной S , двухполюсного, с повышенным КПД, климатического исполнения Т2: 5А180S2 e Т2.

В мировой практике используют разнообразные стандарты уровней энергоэффективности. Это разнообразие национальных стандартов создает трудности для производителей и коммерсантов, ориентирующихся на мировой рынок. В связи с этим в РФ в 2011 г. был разработан стандарт для универсальной гармонизации классов энергоэффективности электрических машин:

Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 54413-2011 Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IЕ) [7].

Этот стандарт включает в себя модифицированные основные нормативные положения международного стандарта, разработанного Международной электротехнической комиссией (МЭК). В отличие от ГОСТ 31605-2012, в котором регламентируются суммарные потери активной мощности, рассматриваемый стандарт устанавливает классы энергоэффективности в зависимости от **КПД двигателя в номинальном режиме**.

КПД двигателя в номинальном режиме определяют как отношение выходной мощности к входной при **номинальных** значениях мощности на выходе, напряжения питания и частоты питания:

$$\eta_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / P_{1\text{ном}} \quad (2.7)$$

В стандарте используются термины:

– **нормативный КПД $\eta_{\text{норм}}$** : величина КПД, соответствующая определенному классу энергоэффективности, выбранная по таблицам этого стандарта;

– **номинальный (паспортный) КПД $\eta_{\text{ном}}$** : величина КПД, заявленная производителем и равная номинальному КПД или превышающая его.

Обозначение класса энергоэффективности состоит из букв IE (сокращение определения International Energy-efficiency Class – «Международный класс энергоэффективности»), после которых без пробела следует номер класса:

IE1 – нормальный;

IE2 – повышенный;

IE3 – премиум;

IE4 – суперпремиум.

Нормативные значения КПД для двигателей различной номинальной мощности при номинальной (полной) нагрузке для каждого класса указаны в рассматриваемом ГОСТе. Некоторые данные из этого ГОСТа приведены в табл. 2.1–2.3.

Следует учитывать, что вследствие нестабильности свойств материалов и технологии производства КПД отдельных экземпляров вы-

пускаемых двигателей могут различаться, т.е. можно говорить о некотором диапазоне энергоэффективности для каждой серии двигателей.

Маркировка. Класс энергоэффективности IE и номинальный КПД должны быть приведены на заводской табличке.

Пример: IE2 – 84,0 %.

Таблица 2.1

Нормативные значения КПД $\eta_{\text{норм}}$, %, для класса энергоэффективности IE1 при частоте 50 Гц

$P_{\text{ном}}$, кВт	Число полюсов		
	2	4	6
0,75	72,1	72,1	70,0
1,1	75,0	75,0	72,9
1,5	77,2	77,2	75,2
2,2	79,7	79,7	77,7
3	81,5	81,5	79,7
4	83,1	83,1	81,4
5,5	84,7	84,7	83,1
7,5	86,0	86,0	84,7
11	87,6	87,6	86,4
15	88,7	88,7	87,7
18,5	89,3	89,3	88,6
22	89,9	89,9	89,2
30	90,7	90,7	90,2
37	91,2	91,2	90,8
45	91,7	91,7	91,4
55	92,1	92,1	91,9
75	92,7	92,7	92,6
90	93,0	93,0	92,9
110	93,3	93,3	93,3
132	93,5	93,5	93,5
160	93,8	93,8	93,8
От 200 до 355	94,0	94,0	94,0

**Нормативные значения КПД $\eta_{\text{норм}}$, %,
для класса энергоэффективности IE2 при частоте 50 Гц**

$P_{\text{ном}}$, кВт	Число полюсов		
	2	4	6
0,75	77,4	79,6	75,9
1,1	79,6	81,4	78,1
1,5	81,3	82,8	79,8
2,2	83,2	84,3	81,8
3	84,6	85,5	83,3
4	85,8	86,6	84,6
5,5	87,0	87,7	86,0
7,5	88,1	88,7	87,2
11	89,4	89,8	88,7
15	90,3	90,6	89,7
18,5	90,9	91,2	90,4
22	91,3	91,6	90,9
30	92,0	92,3	91,7
37	92,5	92,7	92,2
45	92,9	93,1	92,7
55	93,2	93,5	93,1
75	93,8	94,0	93,7
90	94,1	94,2	94,0
110	94,3	94,5	94,3
132	94,6	94,7	94,6
160	94,8	94,9	94,8
От 200 до 355	95,0	95,1	95,0

Нормативные значения КПД $\eta_{\text{норм}}$, %, для класса энергоэффективности IE3 при частоте 50 Гц

$P_{\text{ном}}$, кВт	Число полюсов		
	2	4	6
0,75	80,7	82,5	78,9
1,1	82,7	84,1	81,0
1,5	84,2	85,3	82,5
2,2	85,9	86,7	84,3
3	87,1	87,7	85,6
4	88,1	88,6	86,8
5,5	89,2	89,6	88,0
7,5	90,1	90,4	89,1
11	91,2	91,4	90,3
15	91,9	92,1	91,2
18,5	92,4	92,6	91,7
22	92,7	93,0	92,2
30	93,3	93,6	92,9
37	93,7	93,9	93,3
45	94,0	94,2	93,7
55	94,3	94,6	94,1
75	94,7	95,0	94,6
90	95,0	95,2	94,9
110	95,2	95,4	95,1
132	95,4	95,6	95,4
160	95,6	95,8	95,6
От 200 до 355	95,8	96,0	95,8

Задание 2. Провести сравнительный анализ КПД АД различных классов энергоэффективности. Варианты заданий приведены в табл. 2.4.

Исходные данные для расчетов

№ варианта	Синхронная частота вращения, n , об/мин	Сравниваемые типы и классы АД			
		7АИ	IE2	IE3	Энергосбер.
1	1000	7АИ	IE2	IE3	Энергосбер.
2	1500	АИР	IE1	IE2	Энергосбер.
3	1000	АИР	IE1	IE2	Энергосбер.
4	3000	5АИ	IE2	IE3	Энергосбер.
5	1500	5АИ	IE2	IE3	Энергосбер.
6	1000	5АИ	IE2	IE3	Энергосбер.
7	3000	7АИ	IE2	IE3	Энергосбер.
8	1500	7АИ	IE2	IE3	Энергосбер.
9	3000	АИР	IE1	IE2	Энергосбер.

Пример 2

Рассмотрим в качестве примера исследования для варианта 9 задания 2.

В примере, в отличие от задания 2, дополнительно рассмотрим вариант энергоэффективности IE3.

Данные для анализа сведены в табл. 2.5. Номинальные значения КПД электродвигателей типа АИР, найденные по справочным данным [9, 10], приведены во втором столбце таблицы. В 3-м, 4-м и 5-м столбцах указаны нормативные значения КПД $\eta_{\text{норм}}$ двигателей по классификации IE (см. табл. 2.1–2.3), для синхронной частоты вращения 3000 об/мин (число полюсов равно 2). В последнем столбце табл. 2.5 приведены рассчитанные по формуле (2.4) значения КПД энергосберегающих двигателей. В формуле (2.4) КПД стандартного двигателя принимается равным номинальному значению КПД двигателя АИ соответствующей мощности: $\eta_{\text{ст}} = \eta_{\text{ном}}$.

По результатам расчетов на рис. 2.1, 2.2 построены соответствующие графики.

Результаты расчета

Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	Номинальные и нормативные значения КПД АД				
	АИР $\eta_{\text{ном}}$, %	IE1 $\eta_{\text{норм}}$, %	IE2 $\eta_{\text{норм}}$, %	IE3 $\eta_{\text{норм}}$, %	Энергосбер. АД, $\eta_{\text{эс}}$, %
4	87	83,1	87	88,1	89,3
5,5	88	84,7	88,1	89,2	90,2
7,5	87,5	86	89,4	90,1	89,7
11	88	87,6	90,3	91,2	90,2
15	90	88,7	90,9	91,9	91,8
18,5	90,5	89,3	91,3	92,4	92,3
22	90,5	89,9	92	92,7	92,3
30	91,5	90,7	92,5	93,3	93,1
37	91,5	91,2	92,9	93,7	93,1
45	92	91,7	93,2	94	93,5
55	92,5	92,1	93,8	94,3	93,9
75	93	92,7	94,1	94,7	94,3
90	93	93	94,3	95	94,3

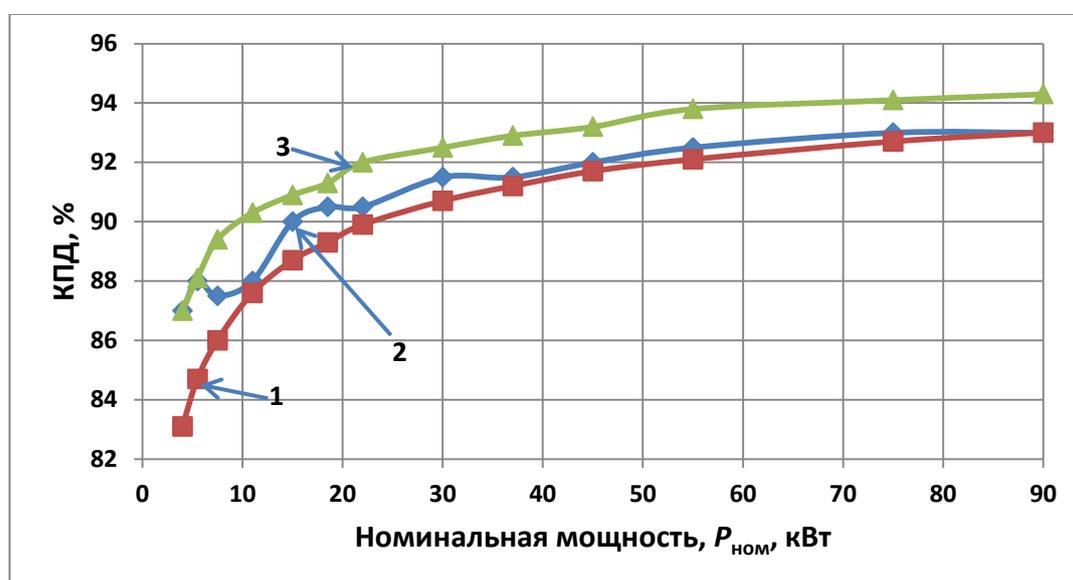


Рис. 2.1. Зависимость КПД, %, от номинальной мощности $P_{\text{ном}}$, кВт, для двигателей различных классов энергоэффективности с синхронной частотой вращения 3000 об/мин:
1 – IE1; 2 – АИР; 3 – IE2

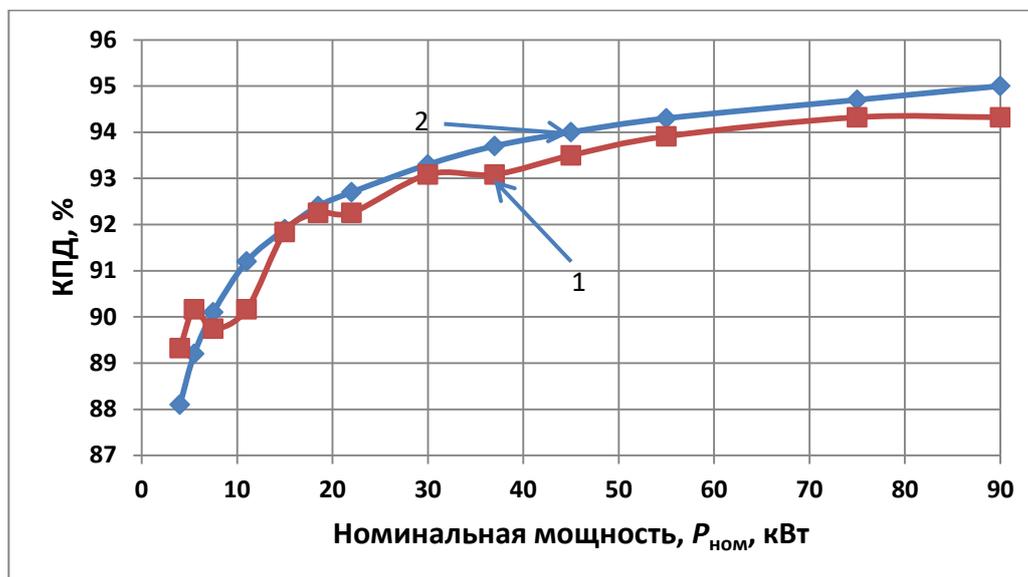


Рис. 2.2. Зависимость КПД, %, от номинальной мощности $P_{ном}$, кВт, для двигателей различных классов энергоэффективности с синхронной частотой вращения 3000 об/мин:
1 – энергосберегающий; 2 – IE3

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы по работе.

В выводах отметьте:

- как изменяется КПД двигателя в зависимости от номинальной мощности;
- к какому классу энергоэффективности IE можно отнести указанные в задании двигатели типа АИ;
- к какому классу энергоэффективности IE можно отнести энергосберегающие двигатели.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятия КПД двигателя.
2. По какому показателю установлены классы энергоэффективности IE?
3. Каким требованиям к энергоэффективности должны удовлетворять энергосберегающие двигатели?
4. Как маркируются энергосберегающие двигатели?

3. ЗАВИСИМОСТЬ КПД И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ АД ОТ НАГРУЗКИ

Большинство электроприводов механизмов имеют установленную мощность электродвигателей, существенно превышающую необходимую для реализации технологического процесса [1, 3]. Фактическую нагрузку двигателя по мощности характеризуют коэффициентом нагрузки k_H , который определяется как отношение мощности нагрузки P_c (мощности сопротивления механизма) к номинальной мощности двигателя:

$$k_H = P_c / P_{\text{ном}}. \quad (3.1)$$

В зависимости от коэффициента нагрузки изменяются КПД, коэффициент мощности и потери активной мощности в двигателе.

Потери мощности в электродвигателе в установившемся режиме при питании от сети представляют суммой двух составляющих: постоянных K и переменных V потерь [3]:

$$\Delta P = K + V. \quad (3.2)$$

Под постоянными потерями K подразумеваются потери мощности, не зависящие от нагрузки двигателя. К ним относят потери в магнитопроводе (стали), механические и добавочные потери. К переменным относят потери в обмотках двигателей при протекании по ним токов, определяемых нагрузкой электропривода.

Переменные потери мощности в двигателе могут быть в общем случае определены через электрические или механические переменные и параметры.

Переменные потери складываются из потерь в статоре V_1 и потерь в роторе V_2 :

$$V = V_1 + V_2. \quad (3.3)$$

В соответствии с упрощенной схемой замещения для одной фазы (рис. 3.1), в которой по резистору R_1 протекает ток I_2' , переменные потери составят [3]:

$$V_1 = 3I_1^2 R_1 = 3I_2'^2 R_1; \quad V_2 = 3I_2'^2 R_2', \quad (3.4)$$

где R_1, X_1 – активное и индуктивное сопротивление фазы статора;

R'_2, X'_2 – приведенное к статору активное и индуктивное сопротивление ротора;

X_μ – индуктивное сопротивление контура намагничивания;

I_1, I'_2, I_μ – ток статора, приведенный ток ротора и ток намагничивания;

U_ϕ – фазное напряжение.

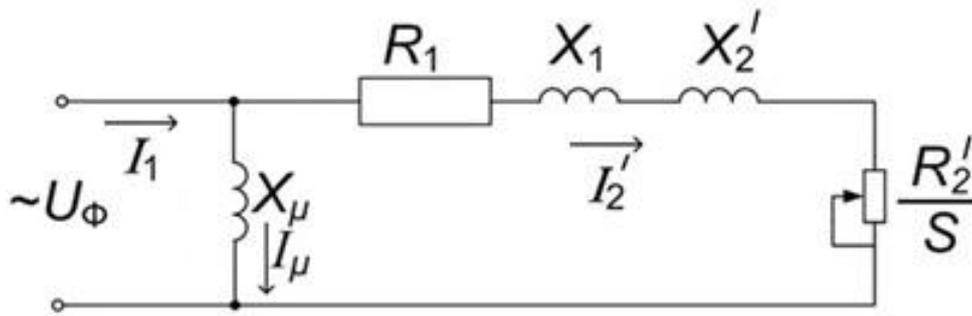


Рис. 3.1. Г-образная схема замещения АД

В номинальном режиме

$$V_{1\text{ном}} = 3I_{1\text{ном}}^2 R_1; V_{2\text{ном}} = 3I_{2\text{ном}}'^2 R'_2. \quad (3.5)$$

Суммарные переменные потери в номинальном режиме

$$V_{\text{ном}} = V_{1\text{ном}} + V_{2\text{ном}} = 3I_{1\text{ном}}^2 R_1 + 3I_{2\text{ном}}'^2 R'_2. \quad (3.6)$$

Учитывая, что переменные потери зависят от квадрата тока и, соответственно, от квадрата коэффициента нагрузки k_H , суммарные потери можно представить в виде следующего выражения:

$$\Delta P(k_H) = K + k_H^2 V_{\text{ном}}. \quad (3.7)$$

Таким образом, для расчета потерь и КПД при работе двигателя в режимах, отличающихся от номинального, необходимо предварительно найти постоянные и переменные потери $V_{\text{ном}}$.

В приведенные формулы входят параметры схемы замещения, которые обычно не приводятся в паспортных данных АД. Методики расчетов параметров схемы замещения и потерь в АД рассмотрены, например, в работах [3, 6].

Остановимся далее на упрощенной методике оценочных расчетов КПД и потерь мощности при работе АД в режимах, отличающихся от номинального. Предварительно проанализируем в общем виде характер зависимости КПД двигателя от нагрузки.

Подставив в выражение (1.5) соотношение (3.7), КПД двигателя в функции коэффициента нагрузки можно представить в виде

$$\eta(k_H) = \frac{k_H P_{\text{НОМ}}}{k_H P_{\text{НОМ}} + K + k_H^2 V_{\text{НОМ}}}. \quad (3.8)$$

Найдем значение коэффициента нагрузки $k_{H,\text{ОПТ}}$ (оптимальное значение коэффициента нагрузки), при котором двигатель будет работать с максимальным КПД. В соответствии с известной из математики общей схемой определения экстремума функции необходимо взять производную $\frac{d\eta(k_H)}{dk_H}$, приравнять ее нулю и решить полученное уравнение относительно КПД. Выполните эти преобразования и убедитесь, что максимальное значение КПД будет иметь место при нагрузке, определяемой следующим соотношением постоянных и номинальных переменных потерь мощности:

$$k_{H,\text{ОПТ}} = \sqrt{K/V_{\text{НОМ}}}. \quad (3.9)$$

Из последней формулы, в частности, следует, что двигатель будет иметь максимальный КПД в номинальном режиме ($k_{H,\text{ОПТ}} = 1$), если он спроектирован так, что постоянные потери K равны переменным $V_{\text{НОМ}}$. Если же $K > V_{\text{НОМ}}$, то максимальный КПД достигается, когда двигатель работает с перегрузкой, что неприемлемо.

При проектировании стремятся, чтобы максимальный КПД двигателя достигался при некоторой недогрузке двигателя, а именно, принимают $k_{H,\text{ОПТ}}$ равным примерно 0,7 [4]. Тогда, как показывает анализ, для интервала нагрузок $k_{H,\text{ОПТ}} \approx 0,4-1$ КПД изменяется незначительно, т.е. в этом диапазоне нагрузок АД работает с высокими энергетическими показателями. Это весьма важно, так как большинство двигателей работает с недогрузкой.

Далее рассмотрим методику расчета КПД и потерь активной мощности в двигателе в зависимости от коэффициента нагрузки в предположении, что известен коэффициент нагрузки $k_{н.опт}$, при котором двигатель имеет максимальный КПД.

На основании формулы (3.9) найдем соотношение потерь для известного значения коэффициента нагрузки $k_{н.опт}$:

$$K = k_{н.опт}^2 V_{ном}. \quad (3.10)$$

Подставив это выражение в формулу для суммарных потерь активной мощности (3.2), получим

$$\Delta P_{ном} = k_{н.опт}^2 V_{ном} + V_{ном}, \quad (3.11)$$

откуда переменные потери в номинальном режиме

$$V_{ном} = \frac{\Delta P_{ном}}{1 + k_{н.опт}^2}. \quad (3.12)$$

Соответственно, постоянные потери

$$K = \Delta P_{ном} - V_{ном} = \frac{\Delta P_{ном} k_{н.опт}^2}{1 + k_{н.опт}^2}. \quad (3.13)$$

Здесь суммарные потери активной мощности в номинальном режиме вычисляются с учетом формулы (1.9) по выражению

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} (1/\eta_{ном} - 1). \quad (3.14)$$

Задание 3. Исследовать зависимость КПД и потерь активной мощности двигателя, параметры которого приведены в табл. 3.1, от коэффициента нагрузки в предположении, что $k_{н.опт1} = 0,7$. Кроме того, исследовать указанные зависимости для случая, когда значение оптимального коэффициента нагрузки АД отличается от 0,7. Второе значение $k_{н.опт2}$ задается преподавателем.

Исходные данные для расчетов

№ варианта	Тип двигателя	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$	$\eta_{\text{НОМ}}$, о.е.
1	АИР100L2	5,5	0,86	0,840
2	АИР112М2	7,5	0,89	0,870
3	АИР132М2	11	0,88	0,880
4	АИР 160 S2	15	0,86	0,880
5	АИР 160 S4	15	0,87	0,890
6	АИР 180 S4	22	0,88	0,910
7	АИР 200 М4	37	0,87	0,920
8	АИР 225 М2	55	0,90	0,935
9	АИР 250 S2	75	0,89	0,940

Пример 3

Поясним последовательность расчетов на примере варианта 9. Результаты расчетов сводим в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты расчетов

Значение k_{H}	$k_{\text{H.опт1}}=0,7$		$k_{\text{H.опт2}}=0,8$	
	$\Delta P(k_{\text{H}})$, кВт	$\eta(k_{\text{H}})$	$\Delta P(k_{\text{H}})$, кВт	$\eta(k_{\text{H}})$
0,3	1,86	0,924	2,13	0,913
0,4	2,09	0,935	2,34	0,928
0,5	2,38	0,940	2,60	0,935
0,6	2,73	0,943	2,92	0,939
0,7	3,15	0,943	3,30	0,941
0,8	3,63	0,943	3,74	0,941
0,9	4,18	0,942	4,23	0,941
1	4,79	0,940	4,79	0,940

Приняв значение $k_{\text{H.опт1}}=0,7$, предварительно по формулам (3.14), (3.12), (3.13) находим суммарные потери активной мощности в номинальном режиме, переменные потери активной мощности в номинальном режиме и постоянные потери.

Далее задаем значения k_{H} от 0,3 до 1 с шагом 0,1 и рассчитываем значения суммарных потерь $\Delta P(k_{\text{H}})$ по формуле (3.7).

Значения КПД в зависимости от коэффициента нагрузки $\eta(k_H)$ рассчитываем по формуле (3.8), преобразовав ее к виду

$$\eta(k_H) = \frac{k_H P_{\text{НОМ}}}{k_H P_{\text{НОМ}} + K + k_H^2 V_{\text{НОМ}}} = \frac{k_H P_{\text{НОМ}}}{k_H P_{\text{НОМ}} + \Delta P}. \quad (3.15)$$

Аналогично выполняем расчеты для второго значения $k_{H,\text{опт}2}$. По полученным данным строим графики зависимости КПД и суммарных потерь мощности от коэффициента нагрузки k_H . Примеры графиков приведены на рис. 3.2, 3.3.

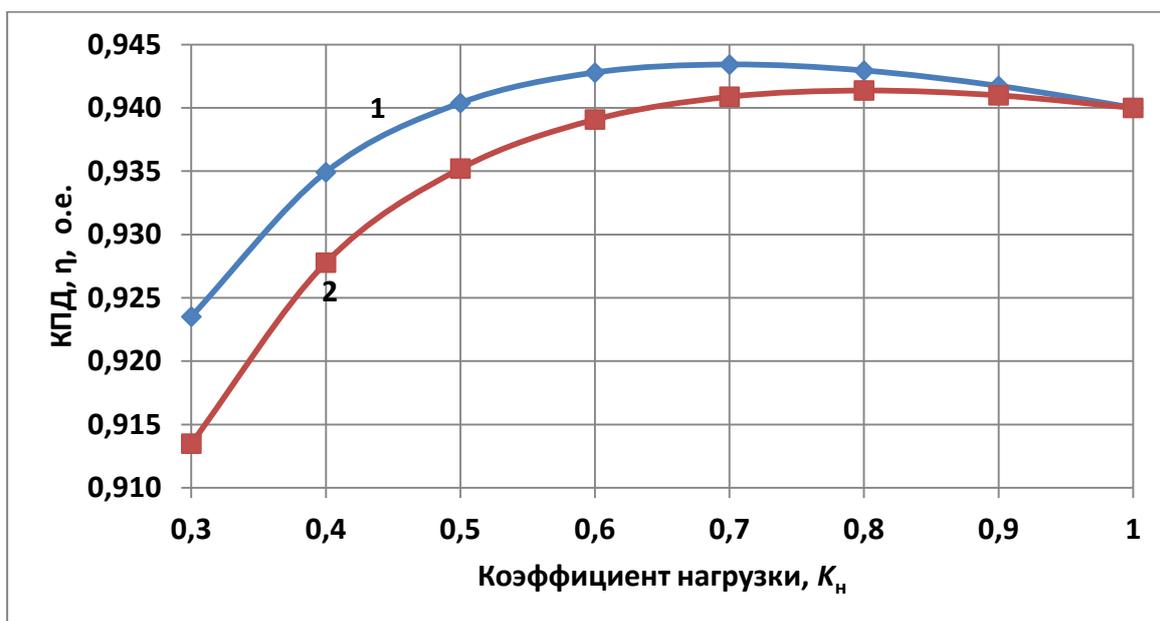


Рис. 3.2. Графики зависимости КПД $\eta(k_H)$, о.е., от коэффициента нагрузки:
 1 – $k_{H,\text{опт}1} = 0,7$; 2 – $k_{H,\text{опт}2} = 0,8$

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы по работе.

В выводах отметьте:

- как влияет значение $k_{H,\text{опт}}$ на вид графика зависимости КПД от нагрузки $\eta(k_H)$;
- насколько существенно отличается максимальное значение КПД от номинального значения при разных значениях $k_{H,\text{опт}}$;
- в каком диапазоне изменения нагрузки КПД АД остается примерно постоянным и как этот диапазон зависит от значения $k_{H,\text{опт}}$;

– как изменяются суммарные потери в двигателе в зависимости от коэффициента нагрузки;

– к какому значению $k_{н.опт}$ следует стремиться при проектировании двигателя и почему.

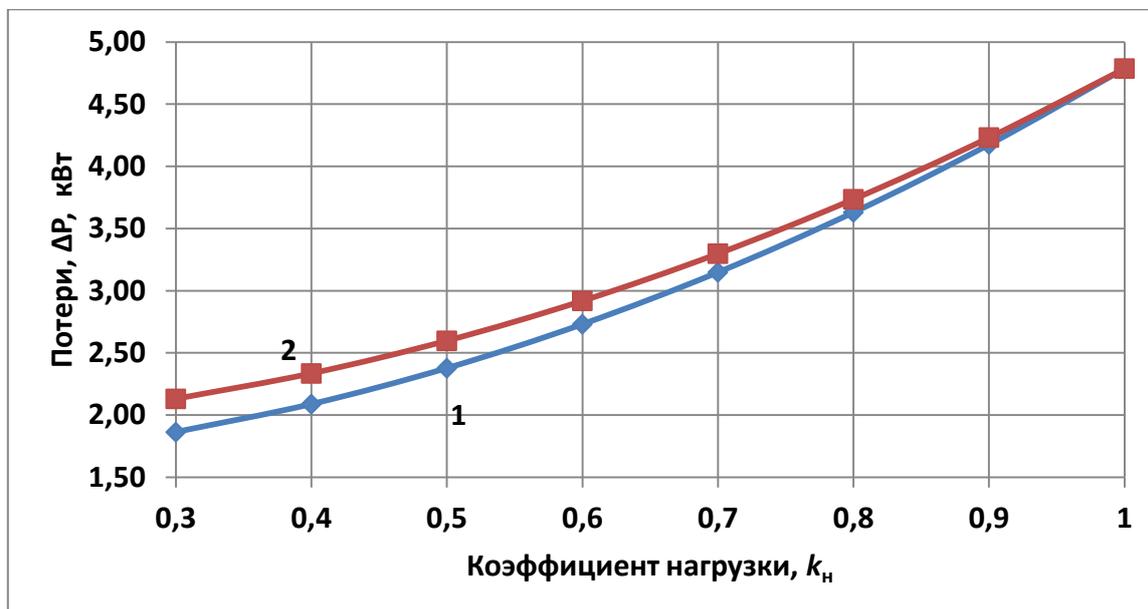


Рис. 3.3. Графики зависимости суммарных потерь активной мощности

$\Delta P(k_n)$, кВт, от коэффициента нагрузки:

$$1 - k_{н.опт1} = 0,7; 2 - k_{н.опт2} = 0,8$$

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под коэффициентом нагрузки двигателя?
2. Из каких составляющих складываются суммарные потери активной мощности?
3. Запишите выражение для расчета суммарных потерь активной мощности при нагрузке, отличающейся от номинальной.
4. При каком соотношении составляющих суммарных потерь достигается максимальное значение КПД двигателя?

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Как уже отмечалось, один из путей повышения экономичности самого массового нерегулируемого асинхронного электропривода мощностью 0,3–400 кВт связан с использованием энергосберегающих двигателей.

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

Номинальный коэффициент мощности асинхронных двигателей, равный отношению активной мощности к полной мощности, потребляемой из сети, также возрастает с ростом мощности и частоты вращения двигателей; при мощности более 1 кВт он составляет 0,7–0,9; в микродвигателях – 0,3–0,7.

В *энергосберегающих* асинхронных двигателях за счет увеличения массы активных материалов (меди и стали), применения высококачественной изоляции, а также оптимизации конструкции снижаются потери энергии, происходит повышение их КПД на несколько процентов.

Кроме того, переход к применению энергосберегающего двигателя позволяет:

- повысить надежность его работы и уменьшить затраты на техобслуживание;
- повысить перегрузочную способность и увеличить устойчивость двигателя к тепловым перегрузкам, а также к отклонениям напряжения и искажению формы кривой напряжения;
- повысить коэффициент мощности;
- уменьшить уровень шума.

В проектах, связанных с использованием энергосберегающих двигателей, следует учитывать и их недостатки:

- повышенную стоимость;
- несколько большую массу;
- более высокую величину пускового тока;

– увеличенный момент инерции и, как следствие, худшие динамические показатели.

Как уже отмечалось, в Российской Федерации Межгосударственный стандарт ГОСТ 31605-2012 [5] предусматривает два уровня КПД:

– нормальный – для двигателей мощностью от 1 до 400 кВт;

– повышенный – для двигателей мощностью от 15 до 400 кВт.

Нормальный КПД устанавливается на уровне, достигнутом в единой серии двигателей АИ. Суммарные потери мощности в двигателях с повышенным КПД на 20 % ниже, чем в двигателях с нормальным КПД.

Иными словами, уровень снижения потерь (e) должен быть не менее 20 %: $e \% \geq 20 \%$, или в относительных единицах $e \geq 0,2$.

В Российской Федерации основными поставщиками энергосберегающих двигателей в настоящее время являются Ярославский электромашиностроительный завод (ОАО ELDIN) и Владимирский электромоторный завод (ВЭМЗ).

Цена энергосберегающего двигателя $C_{эс}$ выше цены стандартного двигателя $C_{ст}$ и оценивается с помощью коэффициента удорожания [3]:

$$C_{эс} = k_{уд} C_{ст};$$

$$k_{уд} = 1 + (1 - \eta_{ст.ном}) e^2 \cdot 100. \quad (4.1)$$

Разность цен

$$\Delta C = C_{эс} - C_{ст}. \quad (4.2)$$

Для определения экономической эффективности использования энергосберегающего двигателя необходимо сопоставить дополнительные затраты ΔC со стоимостью электроэнергии, сэкономленной за определенный период времени при использовании энергосберегающего двигателя.

Как показано в разделе 2, суммарные потери активной мощности в энергосберегающем двигателе удовлетворяют условию (2.1)

$$\Delta P_{эс} \leq \Delta P_{ст} \frac{(100 \% - e \%)}{100 \%},$$

или для значения e в относительных единицах

$$\Delta P_{\text{эс}} \leq \Delta P_{\text{ст}}(1 - e) \leq 0,8\Delta P_{\text{ст}}.$$

Приняв в последнем выражении знак равенства, найдем экономию мощности при использовании энергосберегающего двигателя вместо стандартного:

$$\Delta P_{\text{эк}} = \Delta P_{\text{ст}} - \Delta P_{\text{эс}} = \Delta P_{\text{ст}}e = 0,2\Delta P_{\text{ст}}. \quad (4.3)$$

Рассмотрим ситуацию, когда двигатель работает в номинальном режиме. В этом случае экономия мощности

$$\Delta P_{\text{эк.ном}} = \Delta P_{\text{ст.ном}} - \Delta P_{\text{эс.ном}} = \Delta P_{\text{ст.ном}}e = 0,2 \cdot \Delta P_{\text{ст.ном}}. \quad (4.4)$$

Потери мощности в стандартном двигателе в номинальном режиме

$$\Delta P_{\text{ст.ном}} = (1/\eta_{\text{ст.ном}} - 1)P_{\text{ном}}. \quad (4.5)$$

Стоимость $C_{\text{эк.ном}}$ электроэнергии, которая может быть сэкономлена в течение года при использовании энергосберегающего двигателя при работе в номинальном режиме, может быть рассчитана по формуле

$$C_{\text{эк.ном}} = \Delta W_{\text{эк.ном}}c_{\text{ээ}} = \Delta P_{\text{эк.ном}}T_{\text{р}}c_{\text{ээ}}, \quad (4.6)$$

где $\Delta W_{\text{эк.ном}}$ – экономия потребленной электроэнергии, кВт·ч;

$c_{\text{ээ}}$ – стоимость электроэнергии (тариф), руб/кВт·час;

$T_{\text{р}}$ – годовое время работы двигателя, час.

Время окупаемости при неизменных затратах на амортизацию определяется по формуле [3]

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta Ц}{C_{\text{эк.ном}} - p_{\text{а}}\Delta Ц}, \quad (4.7)$$

где коэффициент амортизации зависит от срока службы двигателя $T_{\text{сл}}$, лет:

$$p_{\text{а}} = 1/T_{\text{сл}}. \quad (4.8)$$

Если двигатель постоянно работает с нагрузкой, отличающейся от номинальной, т.е. с коэффициентом нагрузки $k_H = \frac{P}{P_{НОМ}} < 1$, то для расчета суммарных потерь мощности следует учитывать значение коэффициента нагрузки в соответствии с методикой, рассмотренной в предыдущем разделе.

В том случае, когда нагрузка двигателя переменная, для расчетов используется ступенчатый график нагрузки, где каждому интервалу времени t_i соответствует коэффициент нагрузки k_{Hi} . В качестве примера на рис. 4.1 показан суточный график нагрузки длительностью 24 ч. При ступенчатом графике нагрузки значение суммарных потерь мощности $\Delta P_{стi}$ в стандартном двигателе рассчитывают для каждого значения коэффициента нагрузки k_{Hi} . По формуле (4.3) вычисляют экономию потерь $\Delta P_{эki}$ за счет использования энергосберегающего двигателя и экономию электроэнергии на i -том интервале:

$$\Delta W_{эki} = \Delta P_{эki} t_i. \quad (4.9)$$

Суммируя значения $\Delta W_{эki}$ на n расчетных интервалах, находят общую экономию электроэнергии за определенное время:

$$\Delta W_{ЭК} = \sum_{i=1}^n \Delta W_{эki}. \quad (4.10)$$

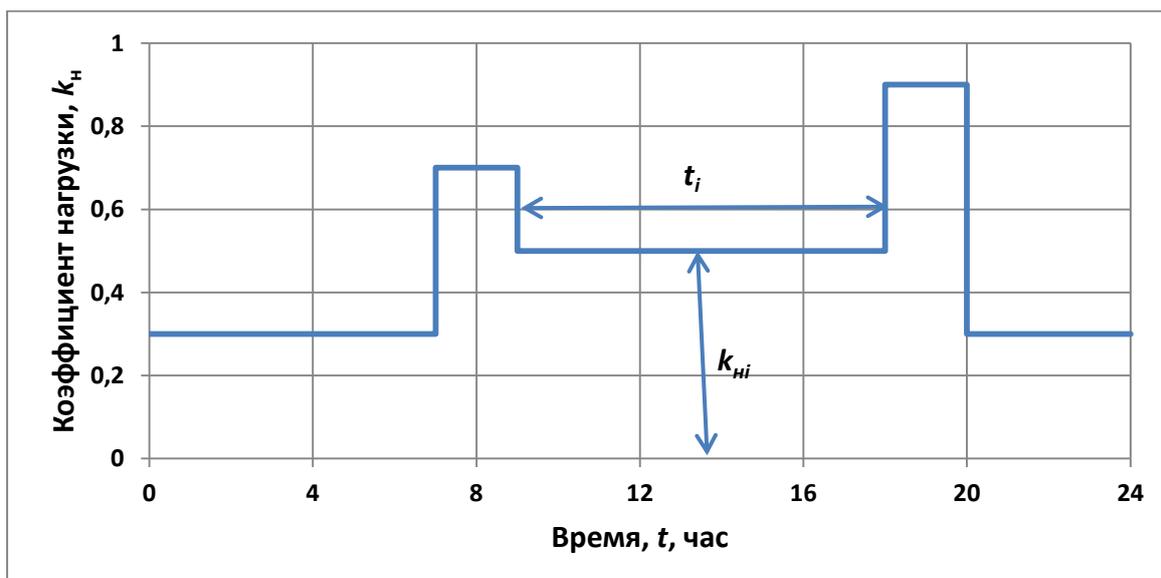


Рис. 4.1. Суточный график нагрузки

Далее с учетом тарифа на электроэнергию определяют стоимость сэкономленной электроэнергии при использовании энергосберегающего двигателя и сравнивают ее с дополнительными затратами на энергосберегающий АД.

Задание 4. Известна требуемая мощность и частота вращения двигателя для привода механизма. Предполагается использование асинхронного короткозамкнутого двигателя. Возможные варианты:

- стандартный двигатель типа АИ соответствующей мощности и частоты вращения;
- энергосберегающий двигатель той же мощности и частоты вращения.

Требуется оценить экономическую целесообразность применения энергосберегающего двигателя для следующих условий:

1) при работе с коэффициентом нагрузки $k_{н1} = 1$ и $k_{н2} < 1$ (задается преподавателем) для различной продолжительности работы в течение года: $T_p = 1500, 3000, 4500, 6000, 7500$ часов в год. Рассчитать срок окупаемости проекта для различных значений T_p . Построить графики срока окупаемости от времени T_p для заданных значений k_n ;

2) при работе с переменной нагрузкой. Данные для расчетов принять по табл. 4.1. КПД стандартного двигателя принять по предыдущему заданию (см. табл. 3.1). Срок службы двигателей $T_{сл} = 15$ лет.

Таблица 4.1

Исходные данные для расчета

№ варианта	Тип двигателя	$P_{ном},$ кВт	Коэффициенты нагрузки $k_{ни}$ и длительности временных интервалов $t_i, ч.$				
			$k_{ни}$	$t_i, ч.$	$k_{ни}$	$t_i, ч.$	$k_{ни}$
1	АИР100L2	5,5	$k_{ни}$	0,3	0,5	0,6	0,9
			$t_i, ч.$	10	8	4	2
2	АИР112М2	7,5	$k_{ни}$	0,2	0,6	0,7	0,9
			$t_i, ч.$	12	6	4	2
3	АИР132М2	11	$k_{ни}$	0,3	0,4	0,6	0,8
			$t_i, ч.$	8	8	4	4
4	АИР160S2	15	$k_{ни}$	0,2	0,5	0,7	1,0
			$t_i, ч.$	12	6	4	2
5	АИР160S4	15	$k_{ни}$	0,3	0,5	0,7	0,8
			$t_i, ч.$	4	10	4	4

№ варианта	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	Коэффициенты нагрузки $k_{\text{нi}}$ и длительности временных интервалов t_{i} , ч.				
			$k_{\text{нi}}$	t_{i} , ч.	$k_{\text{нi}}$	t_{i} , ч.	
6	АИР180S4	22	$k_{\text{нi}}$	0,3	0,4	0,7	0,9
			t_{i} , ч.	10	6	6	2
7	АИР200M4	37	$k_{\text{нi}}$	0,3	0,4	0,7	1,0
			t_{i} , ч.	12	6	4	2
8	АИР225M2	55	$k_{\text{нi}}$	0,3	0,6	0,7	0,9
			t_{i} , ч.	11	7	3	3
9	АИР250S2	75	$k_{\text{нi}}$	0,3	0,7	0,5	0,9
			t_{i} , ч.	11	2	9	2

Пример 4

Рассмотрим методику и порядок расчета для варианта задания 9. Стандартный двигатель типа АИР250S2, $P_{\text{ном}} = 75$ кВт, $\eta_{\text{ст.ном}} = 0,94$.

Цена стандартного двигателя $C_{\text{ст}}=79460$ руб. (данные 2019 г., цену двигателей можно найти в Интернете).

Коэффициент удорожания по формуле (4.1)

$$k_{\text{уд}} = 1 + (1 - \eta_{\text{ст}})e^2 \cdot 100 = 1 + (1 - 0,94) \cdot 0,2^2 \cdot 100 = 1,24.$$

Цена энергосберегающего двигателя при этом составит

$$C_{\text{эс}} = 1,24 \cdot 79460 = 98530 \text{ руб.}$$

а разность цен

$$\Delta C = C_{\text{эс}} - C_{\text{ст}} = 98530 - 79460 = 19070 \text{ руб.}$$

Примем текущий тариф на электроэнергию $c_{\text{ээ}}=4$ руб/кВт·ч.

Потери мощности в стандартном двигателе для различных значений коэффициента нагрузки рассчитаны в примере 3 (см. табл. 3.2). Воспользуемся этими результатами.

1. Выполним расчеты для режимов работы с коэффициентами нагрузки $k_{\text{н}} = 1$ и $k_{\text{н}} = 0,6$.

Потери мощности в стандартном двигателе при номинальном режиме работы ($k_H = 1$)

$$\Delta P_{\text{ст.ном}} = 4,79 \text{ кВт.}$$

Экономия мощности при использовании энергосберегающего двигателя вместо стандартного по выражению (4.4)

$$\Delta P_{\text{эк}} = \Delta P_{\text{ст.ном}} e = 4,79 \cdot 0,2 = 0,96 \text{ кВт.}$$

Задаемся различной продолжительностью эксплуатации двигателя в течение года и по формуле (4.6) рассчитываем стоимость сэкономленной электроэнергии за год. Например, для $T_p = 1500$ ч. получаем:

$$C_{\text{эк}} = \Delta P_{\text{эк}} T_p c_{\text{э}} = 0,96 \cdot 1500 \cdot 4 = 5745 \text{ руб.}$$

Коэффициент амортизации при сроке службы двигателя $T_{\text{сл}} = 15$ лет:

$$p_a = 1/T_{\text{сл}} = 1/15 = 0,0667.$$

Время окупаемости рассчитываем по выражению (4.7). Например, для $T_p = 1500$ ч. получаем:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta \text{Ц}}{C_{\text{эк.ном}} - p_a \Delta \text{Ц}} = \frac{19070}{5745 - 0,0667 \cdot 19070} = 4,3 \text{ года.}$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.2.

Для коэффициента нагрузки $k_H = 0,6$ расчеты выполняются аналогично.

Суммарные потери мощности в стандартном АД для $k_H = 0,6$ (см. табл. 3.2)

$$\Delta P_{\text{ст}} = 2,73 \text{ кВт.}$$

Экономия мощности при использовании энергосберегающего двигателя

$$\Delta P_{\text{эк}} = \Delta P_{\text{ст}} e = 2,73 \cdot 0,2 = 0,55 \text{ кВт.}$$

Стоимость сэкономленной электроэнергии за год, например для $T_p = 1500$,

$$C_{\text{эк}} = \Delta P_{\text{эк}} T_p c_{\text{э}} = 0,55 \cdot 1500 \cdot 4 = 3276 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta Ц}{C_{\text{ЭК}} - p_{\text{а}} \Delta Ц} = \frac{19070}{3276 - 0,0667 \cdot 19070} = 5,8 \text{ года.}$$

Таблица 4.2

Результаты расчета

T_p , час	$k_H=1$		$k_H=0,6$	
	$C_{\text{ЭК}}$, руб.	$T_{\text{ок}}$, лет	$C_{\text{ЭК}}$, руб.	$T_{\text{ок}}$, лет
1500	5745	4,3	3276	5,8
3000	11489	1,9	6552	2,9
4500	17234	1,2	9828	1,9
6000	22979	0,9	13104	1,5

По полученным данным на рис. 4.2 построены графики зависимости срока окупаемости энергосберегающего двигателя от времени эксплуатации.

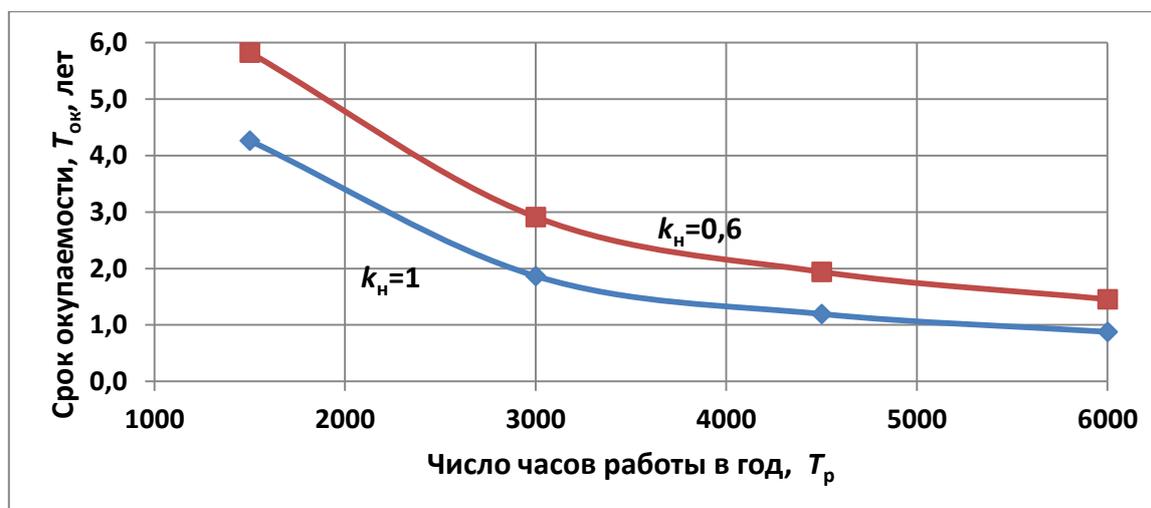


Рис. 4.2. Зависимости срока окупаемости энергосберегающего двигателя $T_{\text{ок}}$, лет, от числа часов работы T_p для различных значений коэффициента нагрузки

2. Расчеты для режима работы с переменным значением коэффициента нагрузки k_H .

В табл. 4.3 заносим значения k_{Hi} и t_i в соответствии с 9-м вариантом рассматриваемого задания. В третьем столбце, используя данные

примера 3 (см. табл. 3.2), записываем значения потерь мощности в стандартном двигателе ΔP_{cti} для соответствующего значения $k_{ни}$. В 4-м столбце по формуле (4.3) вычисляем экономию мощности $\Delta P_{эки}$ при использовании энергосберегающего двигателя. Находим экономию электроэнергии на каждом интервале по формуле (4.9).

Общая экономия электроэнергии за сутки по формуле (4.10)

$$\Delta W_{\text{эк.сут}} = \sum_{i=1}^{n=4} \Delta W_{\text{эки}} = 4,09 + 1,26 + 4,28 + 1,67 = 11,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Стоимость сэкономленной за сутки электроэнергии

$$C_{\text{эк.сут}} = \Delta W_{\text{эк.сут}} c_{\text{ээ}} = 11,3 \cdot 4 = 45 \text{ руб.}$$

Полагая, что двигатель работает с неизменным графиком нагрузки в течение, например, шести месяцев в году, находим стоимость сэкономленной электроэнергии за год:

$$C_{\text{эк.год}} = 6 \cdot 30 \cdot C_{\text{эк.сут}} = 6 \cdot 30 \cdot 45 = 8100 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости по формуле (4.7)

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta Ц}{C_{\text{эк}} - p_a \Delta Ц} = \frac{19070}{8100 - 0,0667 \cdot 19070} = 2,8 \text{ года.}$$

Таблица 4.3

Результаты расчета

t_i , ч.	$k_{ни}$	ΔP_{cti} , кВт	$\Delta P_{эки}$, кВт	ΔW_i , кВт·ч
11	0,3	1,86	0,372	4,09
2	0,7	3,15	0,63	1,26
9	0,5	2,38	0,476	4,28
2	0,9	4,18	0,836	1,67

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы по работе.

В выводах отметьте:

– как влияет нагрузка двигателя на срок окупаемости;

– как влияет время работы двигателя на срок окупаемости;

Оцените приемлемость полученного срока окупаемости при различных значениях T_p .

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные отличия энергосберегающего асинхронного двигателя от стандартного.

2. За счет чего достигается увеличение КПД в энергосберегающем двигателе?

3. По каким причинам стоимость энергосберегающих двигателей выше стоимости стандартных одинаковой мощности?

4. От каких величин зависит стоимость сэкономленной электроэнергии при использовании энергосберегающего двигателя?

5. ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ЗАМЕНЫ МАЛОЗАГРУЖЕННОГО АД НА ДВИГАТЕЛЬ МЕНЬШЕЙ МОЩНОСТИ

Известно, что при использовании асинхронных двигателей их номинальная мощность существенно превышает требуемую, т.е. двигатели работают с низким коэффициентом нагрузки. По данным, приведенным в [1, 3], в отечественной практике коэффициент нагрузки двигателей зачастую равен всего 0,3–0,5. В промышленно развитых странах Западной Европы принято считать, что средняя загрузка двигателей не ниже 0,6–0,7.

Надежное определение фактического коэффициента нагрузки двигателя возможно на основе экспериментальных исследований.

Неполная загрузка двигателя может быть обусловлена различными причинами, в частности: неточностью исходных данных и завышенными коэффициентами запаса, которые используются при проектировании электропривода; несовершенством методики расчета; изменением технологического процесса после установки двигателя и т.д.

Завышение мощности двигателя при проектировании приводит к увеличению капитальных затрат на электропривод, а значительная

недогрузка двигателя в процессе эксплуатации, как рассмотрено в разделе 2, ведет к снижению КПД. Кроме того, при малых значениях коэффициента нагрузки снижается второй важнейший энергетический показатель двигателя – коэффициент мощности.

Из изложенного следует, что выбору двигателя, соответствующего по мощности нагрузке, должно уделяться повышенное внимание [3].

В условиях эксплуатации может ставиться вопрос о замене двигателя, работающего с низким коэффициентом нагрузки, на двигатель меньшей мощности.

Экономически такая замена оправдана, если стоимость электроэнергии, сэкономленной за счет снижения потерь в заменяющем двигателе, компенсирует за приемлемый срок дополнительные затраты на проект.

Таким образом, для оценки целесообразности замены двигателя необходимо найти потери в двигателе, работающем с пониженным значением коэффициента нагрузки $k_{н1}$, подобрать заменяющий двигатель, рассчитать потери в этом двигателе и выяснить, произойдет ли снижение потерь при такой модернизации.

В расчетах будем, как и в разделе 4, исходить из предположения, что известен коэффициент нагрузки $k_{н.опт} = 0,7$, при котором двигатель имеет максимальный КПД.

Тогда для заменяемого двигателя (параметрам этого двигателя присвоим индекс 1) необходимо с учетом формул (3.14), (3.12), (3.13), (3.7) рассчитать:

– суммарные потери активной мощности в номинальном режиме

$$\Delta P_{ном1} = P_{ном1} (1/\eta_{ном1} - 1); \quad (5.1)$$

– переменные потери в номинальном режиме

$$V_{ном1} = \frac{\Delta P_{ном1}}{1 + k_{н.опт}^2}; \quad (5.2)$$

– постоянные потери

$$K_1 = \Delta P_{\text{НОМ1}} - V_{\text{НОМ1}}; \quad (5.3)$$

– суммарные потери активной мощности

$$\Delta P_1(k_{\text{Н1}}) = K_1 + k_{\text{Н1}}^2 V_{\text{НОМ1}}. \quad (5.4)$$

Заменяющий двигатель (меньшей мощности) нужно выбрать той же частоты вращения. Параметрам заменяющего двигателя присвоим индекс 2. Номинальная мощность этого двигателя должна быть не меньше мощности нагрузки:

$$P_{\text{НОМ2}} \geq P_c = k_{\text{Н1}} P_{\text{НОМ1}}. \quad (5.5)$$

Если не удастся подобрать заменяющий двигатель так, чтобы его мощность была равна P_c , то он будет работать с некоторым, меньшим единицы, коэффициентом нагрузки

$$k_{\text{Н2}} = P_{\text{НОМ2}} / P_c. \quad (5.6)$$

В этом случае необходимо определить суммарные потери мощности в заменяющем двигателе с учетом его коэффициента нагрузки $k_{\text{Н2}}$. Расчеты выполняются по тем же формулам (5.2)–(5.4), необходимо только заменить в переменных индекс 1, соответствующий заменяемому двигателю, на индекс 2 заменяющего двигателя.

Очевидно, что если потери в заменяющем двигателе оказываются больше, чем в заменяемом, то замена нецелесообразна.

Последующие расчеты поясним на примере.

Задание 5. Оценить целесообразность замены малозагруженного двигателя на двигатель меньшей мощности при различных значениях числа часов работы.

Тип исходного двигателя, его параметры и коэффициент нагрузки $k_{\text{Н1}}$ указаны в табл. 5.1.

**Технические данные асинхронных двигателей серии 4А.
Синхронная частота вращения 1500 об/мин**

№ варианта	Тип двигателя	$P_{\text{ном1}}$, кВт	$\eta_{\text{ном1}}$, о.е.	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$k_{\text{н1}}$
1	4А200L4	45	0,920	0,90	0,35
2	4А225М4	55	0,925	0,90	0,30
3	4А250S4	75	0,930	0,90	0,30
4	4А250М4	90	0,930	0,91	0,25
5	4А280S4	110	0,925	0,90	0,35
6	4А280М4	132	0,930	0,90	0,25
7	4А315S4	160	0,935	0,9	0,30
8	4А315М4	200	0,940	0,92	0,35
9	4А355S4	250	0,945	0,92	0,30

Пример 5

Поясним порядок расчетов для 9-го варианта.

Известна номинальная мощность $P_{\text{н1}} = 250$ кВт находящегося в эксплуатации двигателя устаревшей серии 4А. Его коэффициент нагрузки $k_{\text{н1}} = 0,30$, номинальный КПД $\eta_{\text{ном1}} = 0,945$. Заменяющий двигатель (меньшей мощности) нужно выбрать той же частоты вращения. Номинальная мощность заменяющего двигателя должна быть не менее мощности нагрузки:

$$P_{\text{ном2}} \geq P_{\text{с}} = k_{\text{н1}} P_{\text{ном1}} = 0,3 \cdot 250 = 75 \text{ кВт.}$$

В качестве заменяющего двигателя выбираем по каталогу двигатель серии АИ требуемой мощности $P_{\text{с}}$ или ближайший большей мощности: АИР250S4 $P_{\text{н2}} = 75$ кВт, $\eta_{\text{ном2}} = 0,94$. Цена двигателя на 2019 г. примерно $C_{\text{нов}} = 120$ тыс. руб.

Выполняем по формулам (5.1)–(5.4) расчеты потерь для заменяемого двигателя:

– суммарные потери активной мощности в номинальном режиме

$$\Delta P_{\text{ном1}} = P_{\text{ном1}} (1/\eta_{\text{ном1}} - 1) = 250(1/0,945 - 1) = 14,55 \text{ кВт;}$$

– переменные потери в номинальном режиме

$$V_{\text{НОМ1}} = \frac{\Delta P_{\text{НОМ1}}}{1 + k_{\text{Н.ОПТ}}^2} = \frac{14,55}{1 + 0,7^2} = 9,76 \text{ кВт};$$

– постоянные потери

$$K_1 = \Delta P_{\text{НОМ1}} - V_{\text{НОМ1}} = 14,55 - 9,76 = 4,78 \text{ кВт};$$

– суммарные потери активной мощности для коэффициента нагрузки $k_{\text{Н1}} = 0,30$

$$\Delta P_1(k_{\text{Н1}}) = K_1 + k_{\text{Н1}}^2 V_{\text{НОМ1}} = 4,78 + 0,30^2 \cdot 9,76 = 5,66 \text{ кВт}.$$

Выполняем расчеты для заменяющего двигателя.

В рассматриваемой ситуации он будет работать с коэффициентом нагрузки

$$k_{\text{Н2}} = P_c / P_{\text{НОМ2}} = \frac{75}{75} = 1,$$

и суммарные потери в двигателе будут равны номинальным:

$$\Delta P_{\text{НОМ2}} = P_{\text{НОМ2}} (1/\eta_{\text{НОМ2}} - 1) = 75(1/0,94 - 1) = 4,79 \text{ кВт}.$$

Таким образом, экономия мощности составит

$$\Delta P_{\text{ЭК}} = \Delta P_1(k_{\text{Н1}}) - \Delta P_{\text{НОМ2}} = 5,66 - 4,79 = 0,87 \text{ кВт}.$$

Если предположить, что двигатель работает в году $T_p=5000$ часов, то экономия электроэнергии за год составит

$$\Delta W_{\text{ЭК}} = \Delta P_{\text{ЭК}} T_p = 0,87 \cdot 5000 = 4350 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Стоимость сэкономленной электроэнергии при тарифе $c_{\text{ЭЭ}}=4$ руб/кВт·ч

$$C_{\text{Э}} = \Delta W_{\text{ЭК}} c_{\text{ЭЭ}} = 4350 \cdot 4 = 17400 \text{ руб}.$$

Окончательное решение о целесообразности замены двигателя зависит от конкретной ситуации, в частности, необходимо учитывать: будет ли заменяемый двигатель использован на том же предприятии;

будет ли он реализован по остаточной стоимости, которая зависит от срока эксплуатации двигателя; и т.д.

Без учета возможных доходов от реализации заменяемого двигателя и амортизационных отчислений срок окупаемости проекта приближенно можно рассчитать по выражению [3]

$$T_{\text{ок}} = \frac{1,35C_{\text{нов}}}{C_{\text{э}}} = \frac{1,35C_{\text{нов}}}{\Delta P_{\text{эк}} T_{\text{р}} C_{\text{ээ}}}, \quad (5.7)$$

где коэффициент 1,35 учитывает дополнительные затраты на демонтаж заменяемого двигателя, транспортировку, монтаж и пусконаладочные работы по новому двигателю.

Для рассматриваемого примера при $T_{\text{р}}=5000$ часов

$$T_{\text{ок}} = \frac{1,35C_{\text{нов}}}{C_{\text{э}}} = \frac{1,35 \cdot 120}{17,4} = 9,3 \text{ года.}$$

Далее задаемся временем работы от 2000 часов до 7000 часов в год, рассчитываем по формуле (5.7) зависимость срока окупаемости от времени работы и строим соответствующий график. Для рассматриваемого примера график приведен на рис. 5.1.

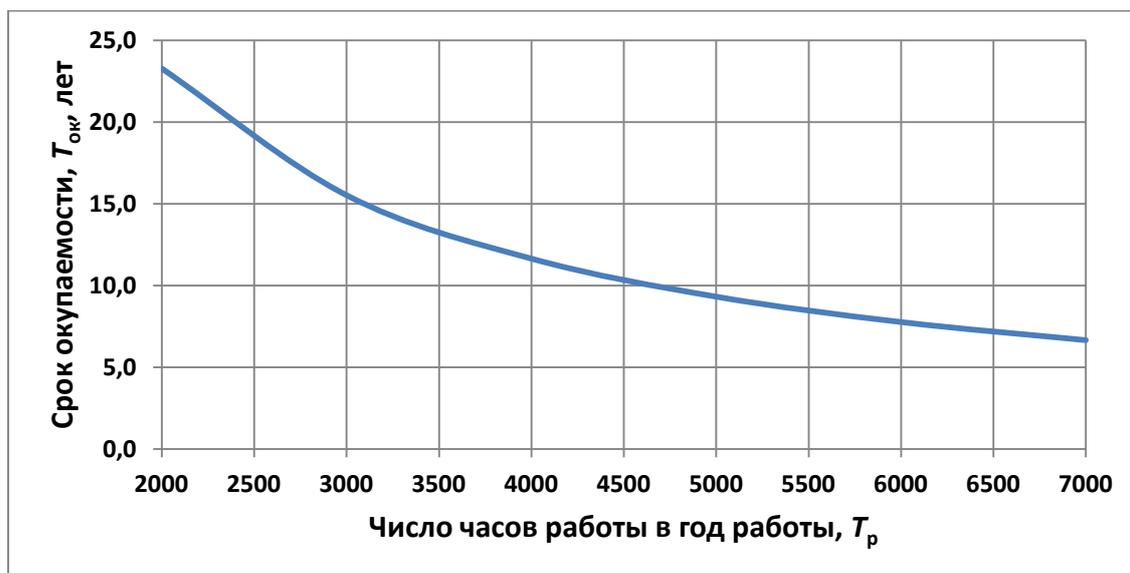


Рис. 5.1. Зависимость срока окупаемости от числа часов работы в год

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы по работе.

В выводах оцените целесообразность замены двигателя при известном коэффициенте его нагрузки для разных значений числа часов работы.

Вопросы для самопроверки

1. По каким условиям выбирается заменяющий двигатель?
2. К каким негативным последствиям приводит завышение мощности двигателя?
3. Как влияет время работы двигателя на эффективность проекта замены малозагруженного двигателя?
4. Какие дополнительные факторы следует учитывать при оценке экономической целесообразности проекта?

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА СО СХЕМЫ «ТРЕУГОЛЬНИК» НА СХЕМУ «ЗВЕЗДА»

Переключение обмоток статора со схемы «треугольник» на схему «звезда» используется для снижения потерь в двигателе при малых нагрузках и уменьшения пусковых токов.

Предварительно, используя упрощенную схему замещения (см. рис. 3.1), проанализируем, как влияет переключение обмоток статора двигателя на его механические характеристики.

Предполагается, что в паспортных данных двигателя указана схема соединения обмоток «треугольник» и соответствующее номинальное линейное напряжение $U_{1л.ном}$. Для достижения энергосберегающего эффекта при пониженной нагрузке производится переключение обмоток на схему «звезда».

Момент асинхронного двигателя создается в результате взаимодействия магнитного потока статора Φ с активной составляющей I'_{2a} приведенного тока ротора [8]:

$$M = 3k\Phi I'_{2a}, \quad (6.1)$$

где k – машинная постоянная.

Магнитный поток статора создается током намагничивания I_{μ} .

Для соединения обмоток статора АД по схеме «треугольник» фазное напряжение равно линейному, и оно создает соответствующий ток намагничивания.

Если обмотки статора АД соединить по схеме «звезда», то это приведет к уменьшению фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз. В соответствии с упрощенной схемой замещения в этом случае ток намагничивания снизится в $\sqrt{3}$ раз. Если двигатель работает на линейной части кривой намагничивания, то и магнитный поток уменьшится в $\sqrt{3}$ раз. Кроме того, при неизменном скольжении пропорционально снижению напряжения снизится приведенный ток ротора I'_2 и его активная составляющая I'_{2a} . Вследствие этого момент асинхронного двигателя, зависящий от квадрата фазного напряжения, уменьшится в 3 раза.

На рис. 6.1 показаны механические характеристики двигателя M_{Δ} , M_Y для соединения статорных обмоток по схеме «треугольник» и «звезда», а также механическая характеристика механизма M_c . Критическое значение скольжения и соответствующее значение скорости $n_{кр}$ при изменении напряжения не изменяются. Значения максимального (критического), пускового и минимального момента на характеристике M_Y в 3 раза меньше, чем на характеристике M_{Δ} .

В установившемся режиме момент двигателя уравновешен моментом сопротивления механизма:

$$M = M_c. \quad (6.2)$$

Для характеристики M_{Δ} режим работы привода характеризуется точкой a (см. рис. 6.1), в которой выполняется равенство (6.2).

Для характеристики M_Y условие (6.2) выполняется в точке b .

В точке b частота вращения двигателя ниже, чем в точке a . Соответственно скольжение $S = (n - n_c)/n_c$ в точке b больше, чем в точке a .

Сравнивая режимы работы на характеристиках M_{Δ} и M_Y , можно заметить, что при переходе на характеристику M_Y величина R'_2/S в

схеме замещения уменьшается, вследствие чего ток ротора и его активная составляющая I'_{2a} увеличиваются.

Таким образом, переход от схемы «треугольник» к схеме «звезда» приводит к возрастанию тока двигателя. Имея в виду формулу (6.1), можно сказать, что при неизменной нагрузке двигателя снижение магнитного потока в схеме «звезда» компенсируется увеличением активной составляющей тока ротора.

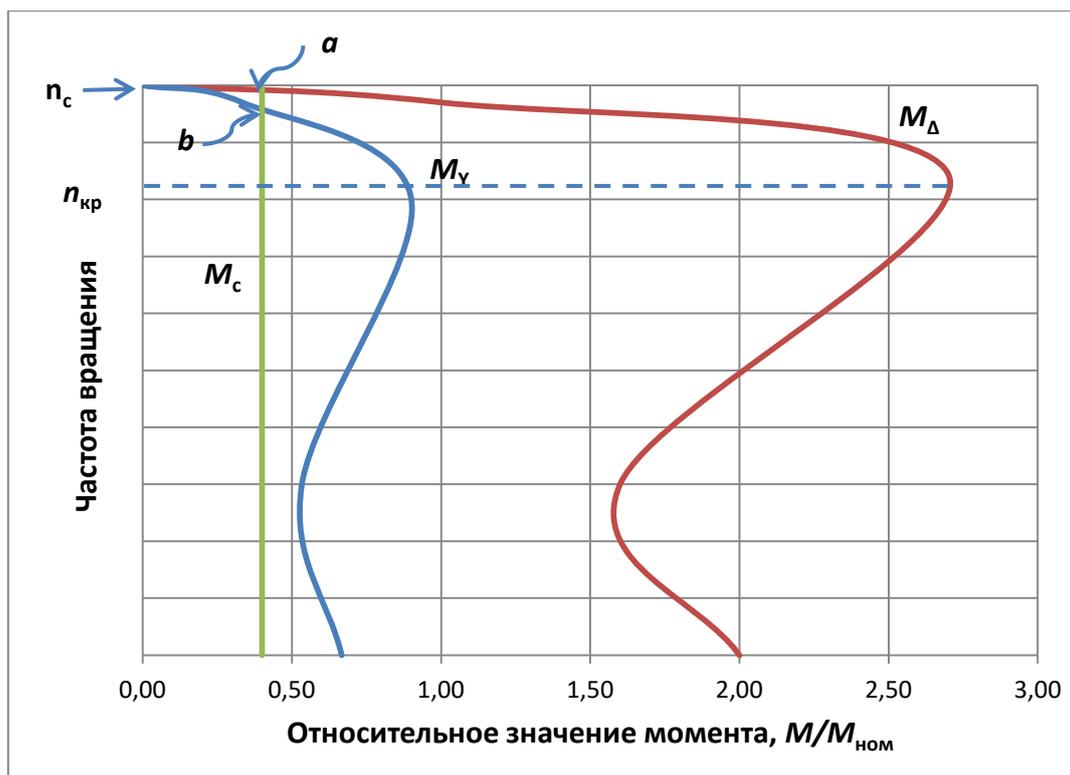


Рис. 6.1. Механические характеристики двигателя при соединении обмоток статора по схеме «треугольник» M_{Δ} и по схеме «звезда» M_Y

Очевидно, что пуск двигателя для схемы «звезда» возможен только в том случае, когда пусковой и минимальный моменты на характеристике M_Y больше M_c . Следовательно, использование схемы «звезда» возможно только при пониженной нагрузке двигателя.

Перейдем к оценке изменения потерь активной мощности и потребляемой двигателем реактивной мощности при изменении схемы соединения обмоток статора.

Чтобы обосновать целесообразность такого проекта, необходимо сравнить потери активной мощности и потребление реактивной мощности для двух схем включения обмоток.

В литературе [11] приведены выражения для проведения практических расчетов потерь активной мощности и потребляемой реактивной мощности АД при отклонении питающего напряжения. Применительно к рассматриваемой задаче учитываются следующие соображения [3].

Суммарные потери *активной мощности* можно представить по выражению (3.7) в виде постоянных и переменных потерь, зависящих от квадрата тока и, соответственно, от квадрата коэффициента нагрузки k_H .

$$\Delta P(k_H) = K + k_H^2 V_{\text{ном}}.$$

Для соединения обмотки статора АД по схеме «*треугольник*» запишем последнюю формулу в следующем виде:

$$\Delta P_{\Delta}(k_H) = K + k_H^2 V_{\text{ном}}. \quad (6.3)$$

Соединение обмоток статора АД по схеме «*звезда*» приводит к уменьшению фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз. В результате снижается ток намагничивания и примерно в 3 раза уменьшаются потери в стали. Но за счет возрастания в $\sqrt{3}$ раз тока ротора в 3 раза увеличиваются потери в обмотках статора и ротора. С учетом этого суммарные потери активной мощности для схемы «звезда» составят

$$\Delta P_Y(k_H) = \frac{K}{3} + 3k_H^2 V_{\text{ном}}. \quad (6.4)$$

Для *реактивной мощности* с учетом коэффициента нагрузки можно записать аналогичные выражения. Снижение потребления реактивной мощности позволяет снизить полный ток двигателя и уменьшить потери в системе электроснабжения.

Для схемы соединения «*треугольник*» реактивная мощность

$$Q_{\Delta}(k_H) = Q_0 + k_H^2 \Delta Q_{\text{ном}}, \quad (6.5)$$

где Q_0 – реактивная мощность при холостом ходе двигателя; $\Delta Q_{\text{ном}}$ – прирост реактивной мощности при переходе двигателя из режима холостого хода в номинальный режим.

Прирост реактивной мощности определяется по формуле

$$\Delta Q_{\text{НОМ}} = (Q_{\text{НОМ}} - Q_0), \quad (6.6)$$

где $Q_{\text{НОМ}}$ – реактивная мощность в номинальном режиме.

Реактивная мощность в номинальном режиме определяется по формуле

$$Q_{\text{НОМ}} = 3U_{\phi} I_{1\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{НОМ}} / \eta_{\text{НОМ}}. \quad (6.7)$$

Для соединения обмотки статора АД по схеме «звезда» с учетом снижения фазного напряжения и увеличения тока реактивная мощность составит

$$Q_Y(k_H) = Q_0/3 + 3k_H^2 \Delta Q_{\text{НОМ}}. \quad (6.8)$$

Задание 6. Исследовать целесообразность переключения обмоток статора АД с «треугольника» на «звезду» в зависимости от коэффициента нагрузки двигателя. Определить предельную нагрузку по условиям пуска двигателя в схеме «звезда». Исходные данные для расчета задаются преподавателем, например, с использованием предыдущего задания (см. табл. 5.1).

Пример 6

Поясним последовательность расчетов на следующем примере. Тип двигателя АИР180S2. Схема соединения обмоток статора «треугольник», номинальное напряжение $U_{\text{НОМ.Л1}} = 380$ В. Номинальная мощность $P_{\text{НОМ}} = 22$ кВт; синхронная частота вращения $n_c = 3000$ об/мин; номинальный КПД $\eta_{\text{НОМ}} = 90,5$ %; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,89$; кратность минимального момента $m_{\text{min}\Delta} = M_{\text{min}}/M_{\text{НОМ}} = 1,9$.

Выполняем расчеты для схемы «треугольник».

По формуле (1.9) определяем полные номинальные потери активной мощности:

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} (1/\eta_{\text{НОМ}} - 1) = 22 \cdot (1/0,905 - 1) = 2,31 \text{ кВт}.$$

Для разделения потерь на постоянные и переменные воспользуемся методикой, изложенной в разделе 3. Будем считать, что известен коэффициент нагрузки $k_{н.опт} = 0,7$, при котором двигатель имеет максимальный КПД. Тогда в соответствии с формулой (3.12) переменные потери активной мощности в номинальном режиме

$$V_{ном} = \frac{\Delta P_{ном}}{1 + k_{н.опт}^2} = \frac{2,31}{1 + 0,7^2} = 1,55 \text{ кВт.}$$

Постоянные потери по формуле (3.13) составят

$$K = \Delta P_{ном} - V_{ном} = 2,31 - 1,55 = 0,76 \text{ кВт.}$$

Рассчитываем по формуле (6.7) реактивную мощность в номинальном режиме:

$$Q_{ном} = P_{ном} \operatorname{tg} \varphi_{ном} / \eta_{ном} = 22 \cdot \operatorname{tg} 0,437 / 0,905 = 12,45 \text{ квар.}$$

$$\varphi_{ном} = \arccos \varphi_{ном} = \arccos 0,89 = 0,473 \text{ рад.}$$

Принимаем реактивную мощность холостого хода

$$Q_0 = 0,6 Q_{ном} = 0,6 \cdot 12,49 = 7,47 \text{ квар.}$$

Находим изменение реактивной мощности при переходе от режима холостого хода к номинальной нагрузке:

$$\Delta Q_{ном} = 0,4 Q_{ном} = 0,4 \cdot 12,49 = 4,98 \text{ квар.}$$

Далее с учетом формул (6.3), (6.5) рассчитываем потери активной мощности $\Delta P_{\Delta}(k_n)$ и реактивную мощность $Q_{\Delta}(k_n)$ в схеме «треугольник» для различных значений k_n , при этом значение коэффициента нагрузки варьируем от 0 до 1. Результаты расчетов сведены в табл. 6.1.

В этой же таблице приведены результаты расчетов по формулам (6.4), (6.8) потерь активной мощности $\Delta P_Y(k_H)$ и значений реактивной мощности $Q_Y(k_H)$ в схеме «звезда».

Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 6.2, 6.3.

Таблица 6.1

Результаты расчета

k_H	$\Delta P_{\Delta}(k_H)$, кВт	$Q_{\Delta}(k_H)$, квар	$\Delta P_Y(k_H)$, кВт	Q_Y , квар
0	0,76	7,47	0,25	2,49
0,1	0,77	7,52	0,30	2,64
0,2	0,82	7,67	0,44	3,09
0,3	0,90	7,92	0,67	3,84
0,4	1,01	8,27	1,00	4,88
0,5	1,15	8,72	1,42	6,23
0,6	1,32	9,27	1,93	7,87
0,7	1,52	9,91	2,53	9,81
0,8	1,75	10,66	3,23	12,06
0,9	2,01	11,51	4,02	14,60
1	2,31	12,45	4,90	17,44

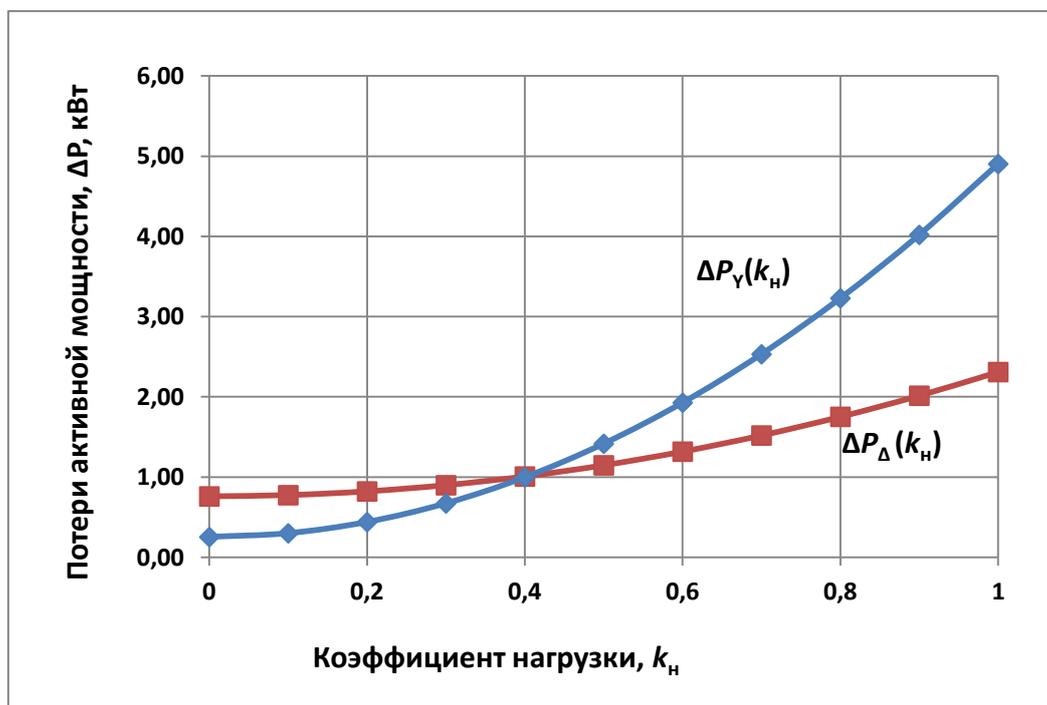


Рис. 6.2. Зависимость потерь активной мощности в схеме «треугольник» $\Delta P_{\Delta}(k_H)$ и в схеме «звезда» $\Delta P_Y(k_H)$ от коэффициента нагрузки

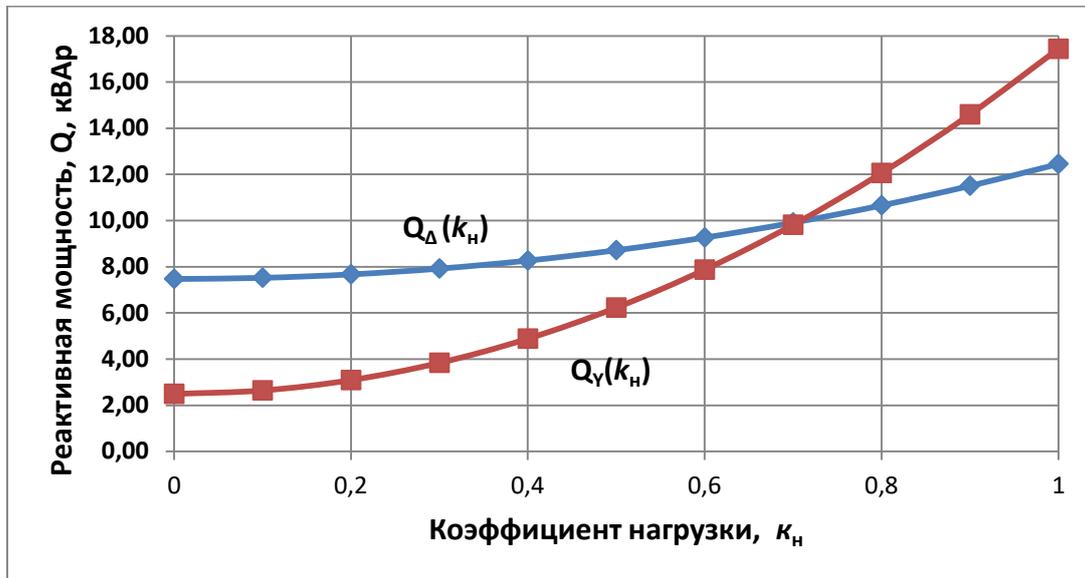


Рис. 6.3. Зависимость реактивной мощности в схеме «треугольник» $Q_\Delta(k_n)$ и в схеме «звезда» $Q_Y(k_n)$ от коэффициента нагрузки

Определим допустимую нагрузку двигателя в схеме «звезда» по условиям пуска. Пуск будет успешным, если минимальный момент двигателя в схеме «звезда» будет превышать момент статического сопротивления. Используя относительные единицы, это условие можно записать в следующем виде:

$$m_{minY} = M_{minY}/M_{НОМ} > M_c/M_{НОМ}.$$

В схеме «звезда» моменты, в том числе минимальный момент, в 3 раза меньше, чем в схеме «треугольник»:

$$m_{minY} = m_{min\Delta}/3 = 1,9/3 = 0,63.$$

Если учесть возможное снижение питающего напряжения на 10 %, то кратность минимального момента для схемы «треугольник» составит

$$m_{min\Delta U} = \left(\frac{U_1}{U_{1НОМ}}\right)^2 m_{min\Delta} = 0,9^2 \cdot 1,9 = 1,54.$$

Соответственно, для схемы «звезда»

$$m_{minYU} = m_{min\Delta U}/3 = 1,54/3 = 0,51.$$

Таким образом, для рассматриваемого двигателя при пуске по схеме «звезда» относительный момент сопротивления механизма $M_c/M_{ном}$ не должен превышать 0,51.

Если переключение с «треугольника» на «звезду» для конкретных условий обеспечивает снижение потерь активной мощности и известно время работы двигателя, то далее можно аналогично предыдущему примеру рассчитать стоимость сэкономленной электроэнергии и сравнить ее с дополнительными затратами на реализацию проекта. Более детальная оценка экономической эффективности проекта требует дополнительной информации, в частности, будет ли двигатель постоянно включен по схеме «звезда» или в процессе пуска и работы будет производиться переключение обмоток статора. В последнем случае требуются дополнительные затраты на создание релейно-контактной схемы переключения обмоток с использованием четырех контакторов.

Проанализируйте полученные результаты для своего варианта и сделайте выводы по работе.

В выводах оцените для рассмотренного проекта:

- при каких значениях коэффициента нагрузки достигается эффект энергосбережения активной мощности;
- при каких значениях коэффициента нагрузки обеспечивается снижение реактивной мощности, потребляемой двигателем;
- какие ограничения накладываются по условиям пуска.

Вопросы для самопроверки

1. Как изменяется фазное напряжение при переключении обмоток статора АД с «треугольника» на «звезду»?
2. Почему при таком переключении ток двигателя возрастает?
3. Как влияет переключение обмоток статора на пусковой ток двигателя?
4. С какой целью стремятся снизить реактивную мощность двигателя?

7. КОМПЕНСИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СД

Поясним компенсирующую способность СД – свойство двигателя отдавать реактивную мощность, т.е. работать с опережающим коэффициентом мощности, с помощью упрощенных векторных диаграмм для неявнополюсного СД, показанных на рис. 7.1. Диаграммы строятся в соответствии с уравнением

$$\dot{U} = \dot{E} + J\dot{I}X_d, \quad (7.1)$$

где \dot{U} – вектор фазного напряжения,

\dot{E} – вектор ЭДС двигателя,

\dot{I} – вектор тока статора,

X_d – индуктивное сопротивление статора двигателя.

Построение диаграмм ведется в следующем порядке. Строится вектор фазного напряжения \dot{U} . Вектор \dot{E} строится отстающим относительно вектора \dot{U} на угол нагрузки Θ . Величина ЭДС двигателя (модуль вектора \dot{E}) в синхронном режиме определяется значением тока возбуждения. Предположим, что некоторому току возбуждения $I_{в1}$ соответствует значение \dot{E} , показанное на рис 7.1, а. В соответствии с уравнением (7.1) векторы \dot{U} , \dot{E} и $J\dot{I}X_d$ образуют треугольник ОАВ, как показано на рис. 7.1, а.

Для построения вектора \dot{I} тока статора предварительно выбирается его направление – со сдвигом на 90° (угол АСО) по часовой стрелке (с отставанием) относительно вектора падения напряжения $J\dot{I}X_d$. Масштабы тока и напряжения на диаграмме не связаны, и длина вектора \dot{I} выбирается произвольно. Как следует из рис. 7.1, а, в рассматриваемом случае вектор \dot{I} тока статора отстает на угол φ от вектора \dot{U} и может быть представлен в виде двух составляющих: активной \dot{I}_a , совпадающей по фазе с вектором \dot{U} , и реактивной \dot{I}_p , отстающей от вектора напряжения сети на 90° .

Таким образом, в рассматриваемой ситуации СД работает с отстающим углом φ , и потребляет из сети реактивный ток и реактивную мощность: $Q > 0$.

Вектор падения напряжения $J\dot{I}X_d$ можно представить в виде двух составляющих (см. рис. 7.1, а): одна из них – $J\dot{I}_a X_d$ определяется активной составляющей тока и опережает вектор напряжения \dot{U} на 90° , а вторая – $J\dot{I}_p X_d$ совпадает по направлению с вектором \dot{U} .

Активная составляющая тока I_a пропорциональна нагрузке СД и для постоянной нагрузки остается неизменной. При изменении величины тока возбуждения и, соответственно, изменении модуля ЭДС конец вектора \dot{E} скользит по линии MN , параллельной вектору напряжения и отстоящей от него на величину $\dot{I}_a X_d$ (см. рис. 7.1, а).

Если увеличивать ток возбуждения, то при некотором его значении I_{B0} конец вектора окажется на линии AA' . В этом случае вектор падения напряжения $J\dot{I}_p X_d$ будет лежать на линии AA' , а вектор тока, отстающий от него на 90° , по направлению совпадет с вектором напряжения U . Следовательно, ток двигателя и потребляемая из сети мощность будут чисто активными и минимальными при данной нагрузке.

Предположим, что ток возбуждения увеличен до некоторого значения $I_{B2} > I_{B0}$. В этом случае конец вектора \dot{E} переместится выше линии AA' . Вектор падения напряжения $J\dot{I}X_d$ и отстающий от него на 90° вектор тока примут положение, показанное на рис. 7.1, б. Вектор тока \dot{I} будет опережать вектор напряжения сети, реактивная составляющая тока I_p изменит знак – двигатель будет генерировать реактивную мощность. Генерируемую мощность считают отрицательной: $Q < 0$.

Таким образом, изменяя величину тока возбуждения, можно управлять величиной и знаком реактивной мощности СД. Современные СД рассчитаны на работу в номинальном режиме с опережающим $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9$.

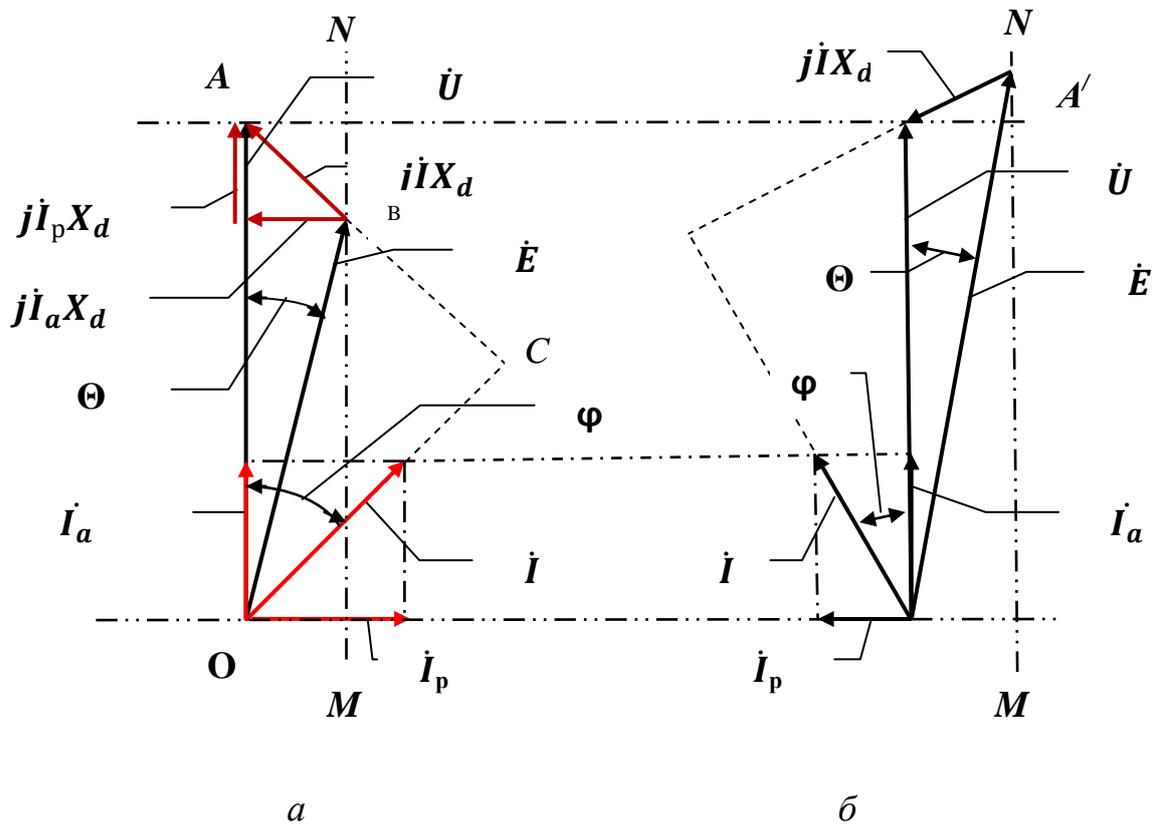


Рис. 7.1. Векторные диаграммы СД

Перейдем к количественным оценкам. На основании векторной диаграммы (она строится для одной фазы), показанной на рис. 7.1, *a*, можно записать:

$$U = E \cos \theta + I_p X_d, \quad (7.2)$$

откуда реактивная составляющая тока

$$I_p = \frac{U - E \cos \theta}{X_d}. \quad (7.3)$$

Учитывая, что СД трехфазный, реактивная мощность СД

$$Q = 3UI_p. \quad (7.4)$$

Значение угла нагрузки определяется из векторной диаграммы:

$$\sin \theta = \frac{I_a X_d}{E}; \Rightarrow \theta = \arcsin \frac{I_a X_d}{E}. \quad (7.5)$$

Значение индуктивного сопротивления X_d в каталогах, как правило, не приводится. Чтобы найти его, необходимо предварительно рассчитать для номинального режима:

– потребляемую из сети активную мощность

$$P_{1\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \eta_{\text{НОМ}}; \quad (7.6)$$

– потребляемую из сети полную мощность

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{P_{1\text{НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}}}; \quad (7.7)$$

– отдаваемую в сеть реактивную мощность при работе с опережающим $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$

$$Q_{\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}} = P_{1\text{НОМ}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{НОМ}}, \quad (7.8)$$

где

$$\varphi_{\text{НОМ}} = \arccos \cos \varphi_{\text{НОМ}};$$

– активную составляющую тока двигателя

$$I_{a.\text{НОМ}} = I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}; \quad (7.9)$$

– реактивную составляющую тока двигателя

$$I_{p.\text{НОМ}} = I_{\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}}; \quad (7.10)$$

– номинальный момент двигателя

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\frac{2\pi}{60} n_{\text{НОМ}}}. \quad (7.11)$$

– номинальное значение угла нагрузки

$$\theta_{\text{НОМ}} = \arcsin(1/K_M), \quad (7.12)$$

где K_M – кратность максимального момента.

На основании векторной диаграммы для номинального режима можно записать:

$$\operatorname{tg}\theta_{\text{ном}} = \frac{I_{\text{а.ном}}X_d}{U_{\text{ном}} + I_{\text{р.ном}}X_d}, \quad (7.13)$$

где

$$U_{\text{ном}} = U_{\text{ном.л}}/\sqrt{3}. \quad (7.14)$$

С учетом выражений (7.13), (7.14) найдем индуктивное сопротивление СД:

$$X_d = \frac{U_{\text{ном}}\operatorname{tg}\theta_{\text{ном}}}{I_{\text{а.ном}} - I_{\text{р.ном}}\operatorname{tg}\theta_{\text{ном}}}. \quad (7.15)$$

На основании той же векторной диаграммы номинальное значение ЭДС можно представить в следующем виде:

$$E_{\text{ном}} = \frac{I_a X_d}{\sin\theta_{\text{ном}}}. \quad (7.16)$$

Коэффициент передачи СД по току возбуждения

$$K_I = E_{\text{ном}}/I_{\text{в.ном}}. \quad (7.17)$$

Значение ЭДС при заданном токе возбуждения

$$E = K_I I_{\text{в}}. \quad (7.18)$$

Задание 7. Требуется рассчитать зависимость тока статора СД, реактивной мощности и коэффициента мощности от тока возбуждения при работе с номинальной нагрузкой на валу. Варианты заданий приведены в табл. 7.1.

Технические данные двигателей СД2 ($\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$ опережающий)

№ вар.	Тип двигателя	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	$U_{\text{НОМ.л}}$, В	$I_{\text{НОМ}}$, А	$\eta_{\text{НОМ}}$, %	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$I_{\text{В.НОМ}}$, А	$U_{\text{В.НОМ}}$, В
1	СД2-85/35-4У3	630	1500	6000	71,5	94,5	1,7	186	36
2	СД2-85/35-4О4	560	1500	6000	63,5	94,5	1,75	172	34
3	СД2-85/43-4У3	800	1500	6000	90,0	95,0	1,65	187	41
4	СД2-85/43-4О4	710	1500	6000	80,0	95,0	1,7	172	38
5	СД2-85/55-4У3	1000	1500	6000	112,0	95,5	1,7	183	47
6	СД2-85/55-4О4	900	1500	6000	101,0	95,4	1,75	170	43
7	СД2-74/41-6У3	315	1000	6000	36,0	94,2	1,7	157	25
8	СД2-74/41-6О4	280	1000	6000	32,0	94,3	1,7	144	23
9	СД2-74/47-6У3	400	1000	6000	45,5	94,6	1,7	169	30

Пример 7

Поясним методику и последовательность расчетов на примере варианта 9. Синхронный двигатель типа СД2-74/47-6У3 имеет следующие паспортные данные: $P_{\text{НОМ}} = 400$ кВт; $n_{\text{НОМ}} = 1000$ об/мин; номинальное линейное напряжение $U_{\text{НОМ.л}} = 6$ кВ; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$ (опережающий); номинальный КПД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,946$; номинальный ток статора (якоря) $I_{\text{НОМ}} = 45,5$ А; кратность максимального момента $K_M = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} = 1,7$; номинальный ток возбуждения $I_{\text{В.НОМ}} = 169$ А; номинальное напряжение возбуждения $U_{\text{В.НОМ}} = 30$ В.

По формулам (7.6)–(7.12) выполняем предварительные расчеты. Рассчитываем для номинального режима:

– потребляемую из сети активную мощность

$$P_{1\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{400}{0,95} = 423 \text{ кВт};$$

– потребляемую из сети полную мощность

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}} \cos\varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{400}{0,946 \cdot 0,9} = 470 \text{ кВА};$$

– отдаваемую в сеть реактивную мощность при работе с опережающим $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$

$$Q_{\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}} = 470 \cdot 0,435 = 206 \text{ квар,}$$

где

$$\varphi_{\text{НОМ}} = \arccos \cos \varphi_{\text{НОМ}} = \arccos 0,9 = 0,450 \text{ рад;}$$

$$\sin \varphi_{\text{НОМ}} = \sin 25,8 = 0,435;$$

– активную составляющую тока двигателя

$$I_{\text{а.НОМ}} = I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 45,5 \cdot 0,9 = 40,9 \text{ А;}$$

– реактивную составляющую тока двигателя

$$I_{\text{р.НОМ}} = I_{\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}} = 45,5 \cdot 0,435 = 19,8 \text{ А;}$$

– номинальный момент двигателя

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\frac{2\pi}{60} n_{\text{НОМ}}} = \frac{400}{0,1047 \cdot 1000} = 3,81 \text{ кН} \cdot \text{м;}$$

– номинальное значение угла нагрузки

$$\theta_{\text{НОМ}} = \arcsin(1/K_M) = \arcsin(1/1,7) = 0,629 \text{ рад.}$$

Индуктивное сопротивление СД по формуле (7.15) составит

$$X_d = \frac{U_{\text{НОМ}} \operatorname{tg} \theta_{\text{НОМ}}}{I_{\text{а.НОМ}} - I_{\text{р.НОМ}} \operatorname{tg} \theta_{\text{НОМ}}} = \frac{3464 \cdot \operatorname{tg} 0,629}{40,9 - 19,8 \cdot \operatorname{tg} 0,629} = 95,0 \text{ Ом,}$$

где

$$U_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ.л}}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ В.}$$

Номинальное значение ЭДС по формуле (7.16)

$$E_{\text{НОМ}} = \frac{I_{\text{а.НОМ}} X_d}{\sin \theta_{\text{НОМ}}} = \frac{40,9 \cdot 95,0}{\sin 0,629} = 6613 \text{ В.}$$

Коэффициент передачи СД по току возбуждения по формуле (7.17) составит

$$K_I = E_{\text{НОМ}} / I_{\text{в.НОМ}} = 6613 / 169 = 39,1 \text{ В/А.}$$

Далее полученные результаты используем для расчета искомых зависимостей тока статора, реактивной мощности и коэффициента мощности СД от тока возбуждения при работе с номинальной нагрузкой на валу.

В паспортных данных приводится только значение номинального тока возбуждения. Чтобы определиться с задаваемым диапазоном его изменения, найдем на основании векторной диаграммы значение ЭДС E_0 , при котором реактивная составляющая тока будет равна нулю:

$$E_0 = \sqrt{(I_{a.\text{ном}} X_d)^2 + U_{\text{ном}}^2} = \sqrt{(40,9 \cdot 95)^2 + 3464^2} = 5209 \text{ В},$$

а также соответствующий ток возбуждения

$$I_{\text{в0}} = \frac{E_0}{K_I} = \frac{5209}{39,1} = 133 \text{ А}.$$

Разбиваем весь интервал изменения тока возбуждения от номинального $I_{\text{в.ном}} = 169 \text{ А}$ до $I_{\text{в0}} = 133 \text{ А}$ на 8–10 интервалов. В рассматриваемом примере шаг изменения тока возбуждения принят равным 4 А (табл. 7.2). В таблице выделено значение, равное $I_{\text{в0}}$. Задаем значения тока возбуждения с принятым шагом от $I_{\text{в.ном}}$ до $I_{\text{в0}}$. Этому диапазону изменения тока возбуждения соответствует режим работы СД с отдачей реактивной мощности (точнее при $I_{\text{в0}}$ реактивная мощность становится равной нулю). Для анализа характеристик при меньших токах возбуждения дополнительно задаем 6–8 точек для тока возбуждения, меньшего $I_{\text{в0}}$, с тем же шагом.

Далее для каждого значения тока возбуждения рассчитываем:

- E по формуле (7.18);
- угол θ по формуле

$$\theta = \arcsin(I_{a.\text{ном}} X_d / E);$$

(С учетом номинальной нагрузки двигателя значение активного тока в расчетах принимается неизменным $I_a = I_{a.\text{ном}} = 40,9 \text{ А}$);

- реактивный ток

$$I_p = \frac{U_{\text{ном}} - E \cos \theta}{X_d};$$

– ПОЛНЫЙ ТОК

$$I = \sqrt{I_{a.\text{НОМ}}^2 + I_p^2};$$

– реактивную мощность, квар,

$$Q = 3U_{\text{НОМ}}I_p10^{-3};$$

– коэффициент мощности

$$\cos\varphi = I_{a.\text{НОМ}}/I.$$

Принято считать потребляемую (индуктивную) реактивную мощность положительной, а генерируемую (емкостную) – отрицательной. При расчетах по приведенным формулам соответствующие знаки реактивного тока и мощности получаются автоматически.

Таблица 7.2

Результаты расчета

I_B, A	E, B	$\Theta, \text{рад}$	I_p, A	I, A	$Q, \text{квар}$	$\cos\varphi$
169	6613	0,63	-19,8	45,5	-206	0,90
165	6456	0,65	-17,8	44,6	-185	0,92
161	6300	0,67	-15,7	43,9	-163	0,93
157	6143	0,69	-13,6	43,1	-141	0,95
153	5987	0,71	-11,4	42,5	-119	0,96
149	5830	0,73	-9,2	42,0	-96	0,98
145	5674	0,76	-7,0	41,5	-73	0,99
141	5517	0,78	-4,7	41,2	-49	0,99
137	5361	0,81	-2,4	41,0	-25	1,00
133	5204	0,84	0,1	41,0	0	1,00
129	5048	0,88	2,6	41,0	27	1,00
125	4892	0,92	5,2	41,3	55	0,99
121	4735	0,96	8,0	41,7	84	0,98
117	4579	1,02	11,0	42,4	115	0,97
113	4422	1,08	14,3	43,4	149	0,94
109	4265	1,15	18,0	44,8	188	0,92

По полученным результатам на рис. 7.2, 7.3 построены соответствующие графики.

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы по работе.

В выводах отметьте:

- какие значения имеют коэффициент мощности и ток двигателя при токе возбуждения $I_{в0}$;
- для каких значений токов возбуждения угол φ опережающий, а реактивный ток и реактивная мощность отрицательны;
- какие области на графиках соответствуют генерации реактивной мощности.

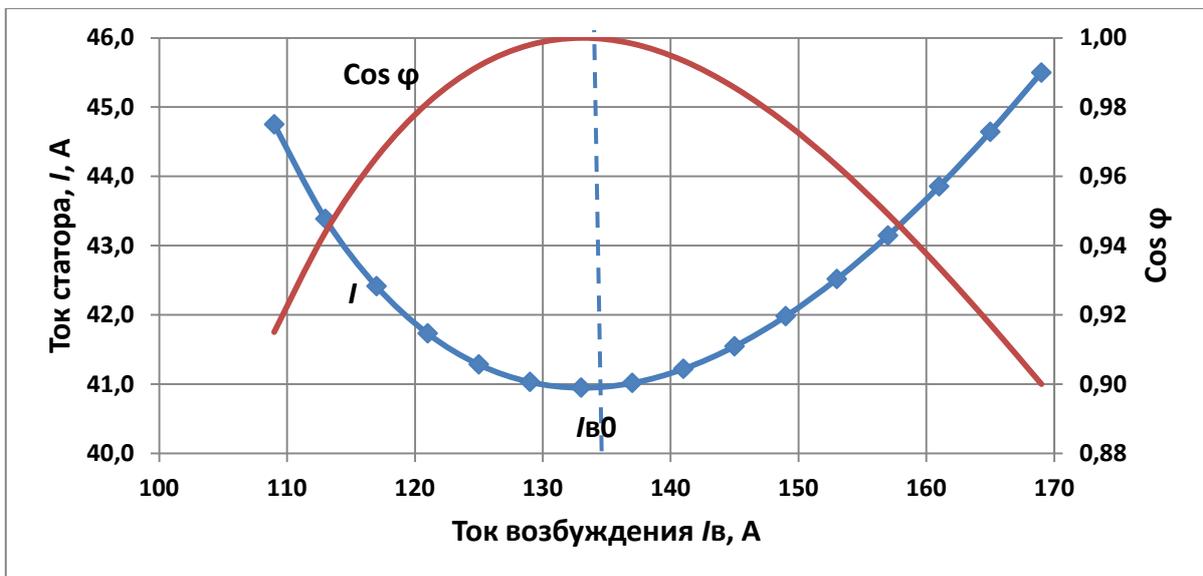


Рис. 7.2. Зависимость тока и коэффициента мощности СД от тока возбуждения

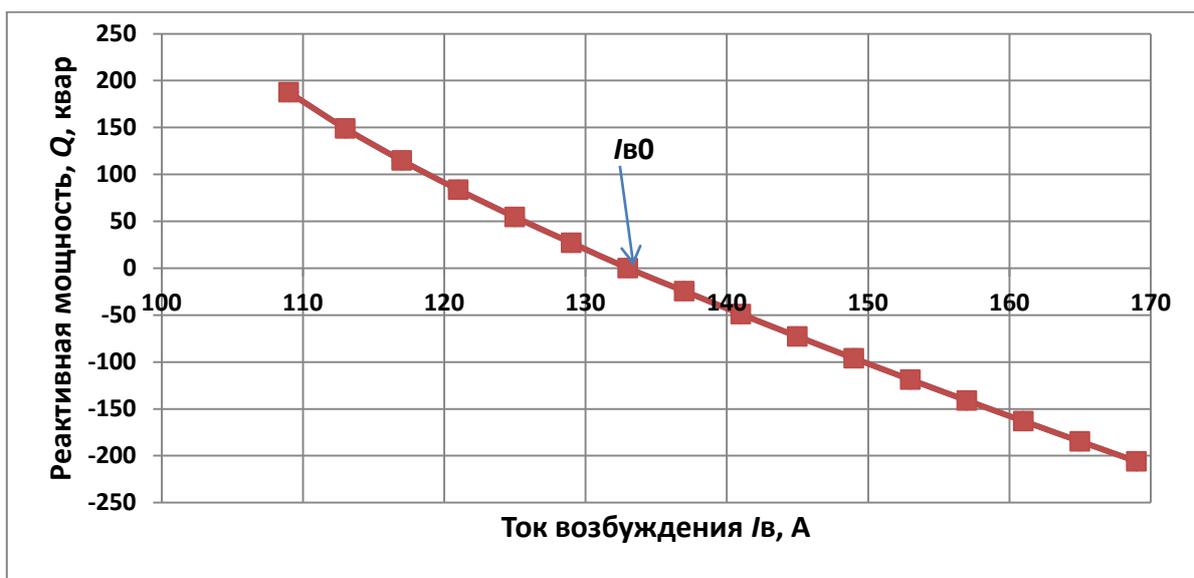


Рис. 7.3. Зависимость реактивной мощности СД от тока возбуждения

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под компенсирующей способностью СД?
2. За счет чего можно изменять величину и знак реактивной мощности СД?
3. Почему при значении тока возбуждения $I_{в0}$ ток статора СД минимален?
4. На какой режим работы по реактивной мощности рассчитаны современные СД?

8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СД В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Электроустановки переменного тока в большинстве случаев потребляют как активную, так и реактивную мощность. Активная составляющая идет на создание полезной работы и связана с преобразованием электрической энергии в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и др.). Реактивная мощность Q не выполняет полезной работы, она служит лишь для создания магнитных полей в электродвигателях, трансформаторах и т.д. Реактивная составляющая увеличивает полную мощность (см. рис. 1.1)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (8.1)$$

и, соответственно, полный ток, который, протекая по элементам электрической сети, вызывает в них дополнительные потери мощности и электрической энергии. Кроме того, циркуляция реактивной мощности снижает пропускную способность линий электропередач и трансформаторов.

В связи с этим компенсация реактивной мощности является одним из эффективных энергосберегающих мероприятий.

Для компенсации реактивной мощности наиболее широко используются батареи конденсаторов, синхронные двигатели, синхронные компенсаторы.

Как показано в предыдущем разделе, СД, выполняя свою основную функцию по приведению в движение рабочих машин и механиз-

мов, могут дополнительно генерировать реактивную мощность. Причем ее величину можно изменять плавно (в отличие от конденсаторных батарей) за счет управления током возбуждения. К недостаткам СД как источников реактивной мощности следует отнести то, что потери на генерацию реактивной мощности в них существенно больше, чем в конденсаторах.

Как уже отмечалось, одним из энергетических показателей электродвигателей является *коэффициент мощности*, определяемый в соответствии с треугольником мощностей (см. рис. 1.1) по выражению

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}. \quad (8.2)$$

В энергетике в последние годы используется другой показатель – *коэффициент реактивной мощности*, определяемый как отношение реактивной мощности к активной:

$$\operatorname{tg}\varphi = Q/P. \quad (8.3)$$

Отметим, что в случае, когда реактивная мощность равна нулю, коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg}\varphi = 0$, а коэффициент мощности $\cos\varphi = 1$. Если при постоянной активной мощности реактивная мощность увеличивается, то $\operatorname{tg}\varphi$ также увеличивается, а $\cos\varphi$ уменьшается.

В настоящее время для создания экономической заинтересованности потребителей электроэнергии в компенсации реактивной мощности приказом Минпромэнерго РФ № 49 от 22.02.2007 установлены предельные значения коэффициента реактивной мощности, приведенные в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Предельные значения коэффициента реактивной мощности

Положение точки присоединения потребителя к электрической сети	$\operatorname{tg} \varphi$	$\cos\varphi$
Напряжением 110 кВ	0,50	0,877
Напряжением 35 кВ	0,40	0,921
Напряжением 6-20 кВ	0,40	0,921
Напряжением 0,4 кВ	0,35	0,939

В этой же таблице для справки приведены соответствующие значения $\cos\varphi$. Превышение предельных значений $\operatorname{tg}\varphi$ ведет к увеличению тарифа на электроэнергию.

Выбор рациональных средств компенсации реактивной мощности должен производиться на основе конкретной схемы электроснабжения и характеристик электроприемников. Фрагмент системы электроснабжения с высоковольтными синхронными и асинхронными двигателями и батареями конденсаторов (БК) приведен на рис. 8.1.

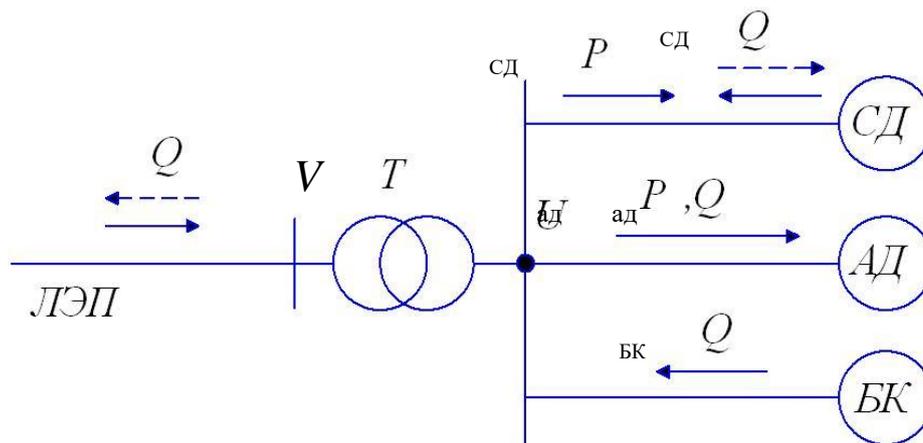


Рис. 8.1. Фрагмент системы электроснабжения

В общем случае можно рассматривать ситуацию, когда к шинам подстанции $U = 6$ (10) кВ подключены n синхронных двигателей и m асинхронных двигателей.

Активная и реактивная мощность асинхронных и синхронных двигателей в номинальном режиме может быть рассчитана по формулам (1.2), (1.3) или (7.6), (7.8). Воспользуемся последними.

Активная и реактивная мощность, потребляемая одним АД в номинальном режиме:

$$P_{\text{ад}1} = P_{\text{ад.ном}} / \eta_{\text{ад.ном}}; \quad (8.4)$$

$$Q_{\text{ад}1} = P_{1\text{ном}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{ад.ном}}, \quad (8.5)$$

где

$$\varphi_{\text{ад.ном}} = \arccos \cos \varphi_{\text{ад.ном}}.$$

Активная и реактивная мощность, потребляемая m АД в номинальном режиме:

$$P_{ад} = mP_{ад1}; \quad (8.6)$$

$$Q_{ад} = mQ_{ад1}. \quad (8.7)$$

Значение активной мощности, потребляемой одним СД из сети,

$$P_{сд1} = P_{сд,ном}/\eta_{сд,ном}. \quad (8.8)$$

Реактивная мощность (без учета знака), которую может отдавать в сеть СД при работе в номинальном режиме с опережающим $\cos \varphi_{сд,ном} = 0,9$,

$$Q_{сд1} = P_{1ном} \operatorname{tg} \varphi_{сд,ном}. \quad (8.9)$$

Активная мощность n СД

$$P_{сд} = nP_{сд1}. \quad (8.10)$$

Реактивная мощность, которую может отдавать в сеть n СД,

$$Q_{сд,н} = nQ_{сд,1}. \quad (8.11)$$

На рис. 8.2 показаны треугольники мощностей, иллюстрирующие проводимые расчеты.

Без учета СД и батарей конденсаторов коэффициент реактивной мощности на шинах подстанции будет определяться углом φ_1 (рис. 8.2, а).

Наиболее экономичным режимом работы самого СД является работа с $\cos \varphi = 1$ – в этом случае ток статора СД минимален и, соответственно, минимальны потери в двигателе и в сети, к которой он подключен.

Если СД будут работать в таком режиме, то реактивная мощность, потребляемая от источника питания, останется неизменной, равной $Q_{ад}$, а в треугольнике мощностей к активной мощности АД $P_{ад}$ добавится активная мощность СД $P_{сд}$ (рис. 8.2, б).

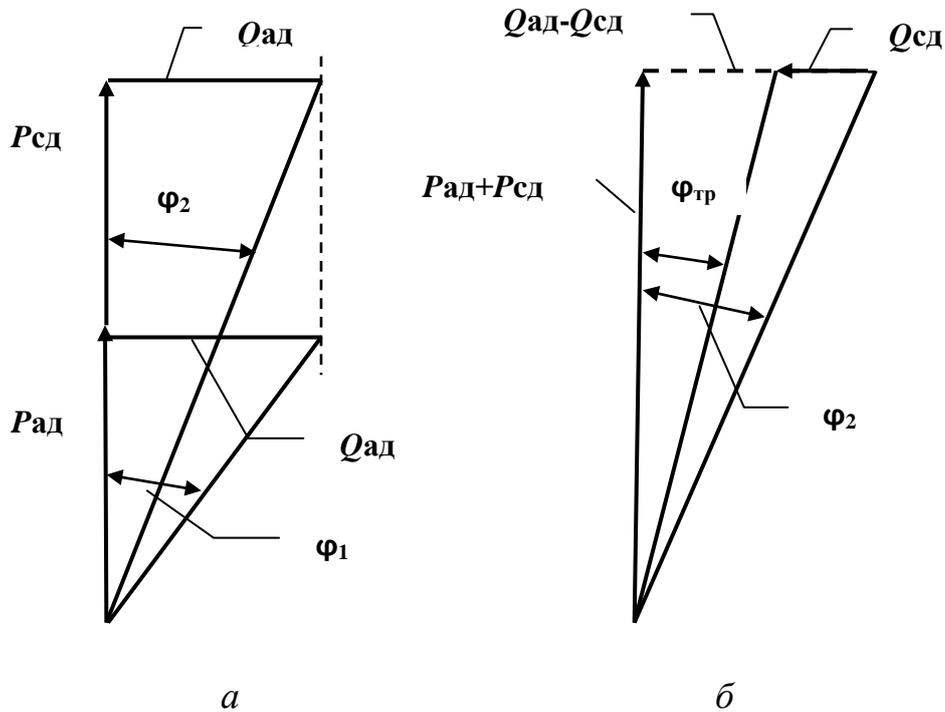


Рис. 8.2. Треугольники мощностей

В результате угол φ станет равным φ_2 , т.е. коэффициент реактивной мощности на шинах подстанции естественным образом уменьшится и может оказаться близким к требуемому.

Возможен и другой вариант, когда такой режим работы СД не обеспечит требуемое значение $\text{tg}\varphi_{\text{тр}}$. Тогда следует определить значение реактивной мощности СД (или БК), необходимое для достижения $\text{tg}\varphi_{\text{тр}}$.

В соответствии с рис. 8.2, б требуемое значение коэффициента реактивной мощности определяется соотношением

$$\text{tg}\varphi_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{ад}} - Q_{\text{сд}}}{P_{\text{ад}} + P_{\text{сд}}},$$

откуда требуемая реактивная мощность СД

$$Q_{\text{сд.тр}} = Q_{\text{ад}} - (P_{\text{ад}} + P_{\text{сд}})\text{tg}\varphi_{\text{тр}}. \quad (8.12)$$

Если реактивная мощность СД в номинальном режиме $Q_{\text{сд.н}}$ оказывается больше требуемой, то необходимый режим компенсации может быть достигнут за счет использования только компенсирующей способности СД. В этом случае необходимое значение $Q_{\text{сд.тр}}$ ус-

танавливается за счет выбора соответствующей величины тока возбуждения. Расчеты зависимости реактивной мощности СД от тока возбуждения выполнены в предыдущем разделе.

Если же $Q_{сд.н}$ оказывается меньше требуемой, то добиться требуемого коэффициента реактивной мощности на шинах подстанции только за счет СД не удастся – необходимо дополнительно использовать батареи конденсаторов.

Использование батарей конденсаторов в случае, когда компенсирующая способность двигателя достаточна для обеспечения $\text{tg}\varphi_{\text{тр}}$, является альтернативным вариантом. Сравнение вариантов проводится на основе экономического анализа. Оцениваются дополнительные затраты на генерацию реактивной мощности СД и дополнительные затраты на покупку и монтаж батарей конденсаторов, а также генерацию ими реактивной мощности. Кроме того, следует учитывать, что управление током возбуждения СД осуществляется с помощью типовых тиристорных преобразователей (возбудителей), обеспечивающих возможность стабилизации различных переменных, в частности, коэффициента мощности в узле нагрузки, к которому подключен СД. В этом случае при изменении режима работы системы электроснабжения автоматически изменяются ток возбуждения и генерируемая реактивная мощность СД, что обеспечивает поддержание заданного значения коэффициента мощности и номинального напряжения на шинах подстанции. Для экономической оценки этих положительных свойств СД как средства компенсации реактивной мощности необходим специальный анализ.

На генерацию реактивной мощности СД дополнительно затрачивается активная мощность. Ее величина приближенно может быть рассчитана по выражению [11]

$$\Delta P_Q = D_1 \frac{Q_{сд}}{Q_{сд.н}} + D_2 \left(\frac{Q_{сд}}{Q_{сд.н}} \right)^2, \quad (8.13)$$

где D_1, D_2 – приводимые в справочниках постоянные для данного двигателя величины [11];

$Q_{\text{сд}}$, $Q_{\text{сд.н}}$ – генерируемая и номинальная реактивная мощность СД.

Для известного времени T_p работы СД в течение года дополнительные годовые затраты на генерацию реактивной мощности составят

$$Z_{\text{сд}} = c_{\text{ээ}} T_p \Delta P_Q, \quad (8.14)$$

где $c_{\text{ээ}}$ – тариф на электроэнергию, руб/кВт·час.

В случае использования батарей конденсаторов можно рассматривать вариант, при котором СД работает с $\text{tg}\varphi = 0$ и $Q_{\text{сд}} = 0$, а требуемая реактивная мощность обеспечивается конденсаторными установками. Величина этой мощности совпадает с рассчитанной по выражению (8.12) для СД:

$$Q_{\text{бк.тр}} = Q_{\text{сд.тр}}. \quad (8.15)$$

С учетом величины $Q_{\text{бк.тр}}$ выбирается компенсирующее устройство необходимой мощности (табл. 8.4) и определяется его цена $\Pi_{\text{ку}}$. Потери активной мощности в батареях конденсаторов рассчитываются по выражению

$$\Delta P_{\text{ку}} = k_{\text{ку}} Q_{\text{ку}}, \quad (8.16)$$

где $k_{\text{ку}}$ – удельные потери мощности в компенсирующем устройстве; для установок напряжением выше 1000 В $k_{\text{ку}} = 0,0025 - 0,005$ кВт/квар.

Дополнительные годовые затраты на потери активной мощности в батареях конденсаторов

$$Z_{\text{ку}} = c_{\text{ээ}} T_p \Delta P_{\text{ку}}. \quad (8.17)$$

Сравнивая дополнительные затраты $Z_{\text{сд}}$ и $Z_{\text{ку}}$ с учетом стоимости $\Pi_{\text{ку}}$ батарей конденсаторов, можно сделать предварительные выводы о целесообразности использования вариантов компенсации с использованием СД и батарей конденсаторов.

Возможно и совместное использование батарей конденсаторов и компенсирующей способности СД, позволяющего плавно регулировать величину реактивной мощности.

Для детального анализа необходима более полная информация о характеристиках системы электроснабжения.

Задание 8. К шинам подстанции 6 кВ подключены n синхронных двигателей и m асинхронных двигателей (табл. 8.2, 8.3). Необходимо проанализировать целесообразность использования различных средств компенсации реактивной мощности.

Таблица 8.2

Технические данные высоковольтных СД типа СДН, номинальное напряжение $U_{1л.ном} = 6$ кВ, $n_c = 1000$ об/мин, коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном} = 0,9$ (опережающий)

№ вар.	$P_{ном},$ кВт	$\eta_{ном},$ %	$D_1,$ кВт	$D_2,$ кВт	Количество, n
1	2000	96,1	8,06	7,53	2
2	2500	96,5	8,13	7,74	2
3	2500	96,5	8,13	7,74	1
4	3200	96,7	10,30	8,91	1
5	3200	96,7	10,30	8,91	1
6	4000	96,4	14,10	11,80	1
7	4000	96,4	14,10	11,80	1
8	2000	96,1	8,06	7,53	2
9	2500	96,5	8,13	7,74	1

Таблица 8.3

Технические данные двигателей А4, номинальное напряжение $U_{1л.ном} = 6$ кВ

№ вар.	$P_{ном},$ кВт	$n_c,$ об/мин	$\eta_{ном},$ %	$\cos\varphi_{ном}$	$I_{ном},$ А	Количество, m
1	400	1500	95,5	0,89	113	8
2	500	1500	94,7	0,88	58	8
3	630	1500	95,2	0,88	72,5	7
4	800	1500	95,2	0,88	92	8
5	1000	1500	95,5	0,89	113	8
6	315	1000	93,6	0,85	38	12
7	400	1000	94	0,86	47,5	10
8	500	1000	94,4	0,86	59,5	9
9	630	1000	94,7	0,86	74,5	8

Пример 8

Поясним методику и последовательность расчетов для варианта 9. К шинам подстанции подключен синхронный двигатель со следующими паспортными данными: $P_{\text{ном}} = 2500$ кВт; номинальное линейное напряжение $U_{\text{ном.л}} = 6$ кВ; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$ (опережающий); номинальный КПД $\eta_{\text{ном}} = 0,965$.

Кроме того, к шинам подстанции подключены 8 АД типа А4. Номинальные данные АД:

$$P_{\text{ном}} = 630 \text{ кВт}; U_{\text{ном.л}} = 6 \text{ кВ}; I_{\text{ном}} = 74,5 \text{ А}; \eta_{\text{ном}} = 0,947; \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,86.$$

Рассчитываем по формулам (8.4), (8.5) активную и реактивную мощность, потребляемую одним АД в номинальном режиме:

$$P_{\text{ад1}} = P_{\text{ад.ном}} / \eta_{\text{ад.ном}} = 630 / 0,947 = 665 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{ад1}} = P_{\text{ад1}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{ад.ном}} = 630 \cdot \operatorname{tg} 0,535 = 395 \text{ квар},$$

где

$$\varphi_{\text{ад.ном}} = \arccos \cos \varphi_{\text{ад.ном}} = \arccos 0,86 = 0,535 \text{ рад.}$$

Активная и реактивная мощность, потребляемая $m=8$ АД в номинальном режиме:

$$P_{\text{ад}} = m P_{\text{ад1}} = 8 \cdot 665 = 5322 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{ад}} = m Q_{\text{ад1}} = 8 \cdot 395 = 3158 \text{ квар.}$$

Значение активной мощности, потребляемой одним СД из сети, по формуле (8.8):

$$P_{\text{сд1}} = P_{\text{сд.ном}} / \eta_{\text{сд.ном}} = 2500 / 0,965 = 2591 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность (без учета знака), которую может отдавать в сеть СД при работе в номинальном режиме с опережающим $\cos \varphi_{\text{сд.ном}} = 0,9$:

$$Q_{\text{сд1}} = P_{\text{сд1}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{сд.ном}} = 2591 \cdot \operatorname{tg} 0,451 = 1255 \text{ квар};$$

$$\varphi_{\text{сд.ном}} = \arccos \cos \varphi_{\text{сд.ном}} = \arccos 0,9 = 0,451 \text{ рад.}$$

Рассмотрим некоторые варианты решения задачи.

1. Рассчитаем, каким будет коэффициент мощности на шинах подстанции, если СД будет работать с $\cos\varphi = 1$.

Реактивная мощность на шинах подстанции в этом случае

$$Q = Q_{ад} = 3158 \text{ квар.}$$

Суммарная активная мощность АД и СД

$$P = P_{ад} + P_{сд} = 5322 + 2591 = 7913 \text{ кВт.}$$

Тангенс угла φ при этом составит

$$\operatorname{tg}\varphi = Q/P = 3158/7913 = 0,40.$$

Полученное значение коэффициента реактивной мощности совпадает с требуемым $\operatorname{tg}\varphi_{\text{тр}} = 0,4$ (см. табл. 8.1).

Таким образом, в рассмотренной ситуации *нецелесообразно* использовать компенсирующую способность СД. Достаточно обеспечить работу СД с $\cos\varphi_{сд} = 1$, $\operatorname{tg}\varphi_{сд} = 0$.

2. Рассмотрим другую ситуацию, когда для достижения требуемого значения коэффициента мощности приходится использовать компенсирующую способность СД. Предположим, что к шинам подстанции подключены 10 АД. Их суммарная активная и реактивная мощность составит:

$$P_{ад} = 10P_{ад1} = 10 \cdot 665 = 6650 \text{ кВт;}$$

$$Q_{ад} = 10Q_{ад1} = 10 \cdot 395 = 3950 \text{ квар.}$$

Суммарная активная мощность

$$P = P_{ад} + P_{сд} = 6650 + 2591 = 9243 \text{ кВт.}$$

Без использования средств компенсации значение коэффициента реактивной мощности

$$\operatorname{tg}\varphi = Q/P = 3950/9243 = 0,43$$

превышает предельное значение.

По формуле (8.12) рассчитываем реактивную мощность, которую должен генерировать СД с учетом требуемого коэффициента мощности:

$$Q_{\text{сд.тр}} = Q_{\text{ад}} - (P_{\text{ад}} + P_{\text{сд}}) \text{tg}\varphi_{\text{тр}} = 3950 - 9243 \cdot 0,4 = 250 \text{ квар.}$$

Если рассчитанное значение существенно, как в рассматриваемом примере, отличается от $Q_{\text{сд.ном}}$, вырабатываемой СД в номинальном режиме, можно, используя результаты предыдущей работы, определить, каким при этом должен быть ток возбуждения СД.

По формуле (8.13) рассчитаем активную мощность, затрачиваемую на генерацию реактивной мощности:

$$\Delta P_Q = D_1 \frac{Q_{\text{сд}}}{Q_{\text{сд.н}}} + D_2 \left(\frac{Q_{\text{сд}}}{Q_{\text{сд.н}}} \right)^2 = 8,13 \frac{250}{1255} + 7,74 \left(\frac{250}{1255} \right)^2 = 1,93 \text{ кВт.}$$

Здесь значения D_1 , D_2 взяты из табл. 8.1, а реактивная мощность СД принята равной требуемой: $Q_{\text{сд}} = Q_{\text{сд.тр}}$.

Для времени работы СД $T_p = 5000$ час в течение года в указанном режиме и тарифе на электроэнергию $c_{\text{ээ}} = 4$ руб/кВт·час дополнительные годовые затраты на генерацию реактивной мощности по формуле (8.14) составят

$$Z_{\text{сд}} = c_{\text{ээ}} T_p \Delta P_Q = 4 \cdot 5000 \cdot 1,93 = 38600 \text{ руб.}$$

3. Наряду с компенсацией реактивной мощности с помощью СД возможен альтернативный вариант компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных установок. По требуемой мощности $Q_{\text{бк.тр}} = Q_{\text{сд.тр}} = 250$ квар выбираем две установки УКРМ-150 квар (см. табл. 8.4, стоимости указаны для 2018 г.). Стоимость двух установок составит 283,2 тыс. руб.

Стоимость конденсаторных установок, руб.

Установки для компенсации реактивной мощности		
	нерегулируемые (УККРМ-7)-6,3/10,5 кВ	
1	УКРМ-150 кВАр напольное исп.	141600
2	УКРМ-300 кВАр напольное исп.	160800
3	УКРМ-400 кВАр напольное исп.с отечественн. Комплект.	169700
4	УКРМ-400 кВАр напольное исп.с импортной компл.	171400
5	УКРМ-450 кВАр напольное исп.	184100
6	УКРМ600 кВАр напольное исп.	227000
7	УКРМ-750 кВАр напольное исп.	234300
8	УКРМ 900 кВАр напольное исп.с отеч. Компл.	200200
9	УКРМ-900 кВАр напольное исп. С импортн. Компл	255400
10	УКРМ 1050 кВАр напольное исп.	309900
11	УКРМ-1200 кВАр напольное исп.	328400
12	УКРМ-1350 кВАр напольное исп.	335900
13	УКРМ-1500 кВАр напольное исп.	395100
14	УКРМ -1800 кВАр напольное исп.с отеч. Компл.	332500
15	УКРМ-1800 кВАр напольное исп. С импортн. Компл	439400
16	УКРМ -2100 кВАр напольное исп.	482600
17	УКРМ -2250 кВАр напольное исп.	488800
18	УКРМ-2400 кВАр напольное исп. С импортн. Компл	547700
19	УКРМ -2700 кВАр напольное исп.	585900
20	УКРМ-3150 кВАр напольное исп. С импортн. Компл	673100
21	УКРМ -3600 кВАр напольное исп.	746800

Потери активной мощности в компенсирующем устройстве рассчитываются по выражению (8.16):

$$\Delta P_{\text{ку}} = k_{\text{ку}} Q_{\text{ку}} = 0,004 \cdot 250 = 1 \text{ кВт},$$

где $k_{\text{ку}}$ – удельные потери мощности в компенсирующем устройстве; для установок напряжением выше 1000 В $k_{\text{ку}} = 0,0025-0,005$ кВт/квар.

Дополнительные годовые затраты на потери активной мощности в конденсаторной установке по формуле (8.17) составят

$$Z_{\text{ку}} = c_{\text{ээ}} T_{\text{р}} \Delta P_{\text{ку}} = 4 \cdot 5000 \cdot 1 = 20000 \text{ руб.}$$

Для предварительной оценки найдем стоимость затрат на компенсацию реактивной мощности с помощью СД, например за 10 лет:

$$10 \cdot Z_{\text{сд}} = 10 \cdot 38,6 = 386 \text{ тыс. руб.}$$

За тот же период стоимость потерь активной мощности в конденсаторной установке плюс ее стоимость составит

$$C_{\text{ку}} + 10 \cdot 20 = 283,2 + 10 \cdot 20 = 483,2 \text{ тыс. руб.}$$

Сравнивая полученные результаты, можно сделать предварительные выводы о целесообразности различных вариантов компенсации. Для детального анализа, как уже отмечалось, требуется дополнительная информация о режиме работы и параметрах системы электроснабжения.

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы по работе.

В выводах отметьте, какой вариант компенсации реактивной мощности для конкретных исходных данных является наиболее рациональным. Обоснуйте свой выбор.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается задача компенсации реактивной мощности?
2. Перечислите средства компенсации.
3. Укажите достоинства и недостатки СД как средства компенсации реактивной мощности.
4. Назовите показатели, характеризующие потребление реактивной мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В методическом издании рассмотрены методы классификации асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором по показателям энергетической эффективности, используемые в отечественной и зарубежной практике. Проведен анализ соответствия энергетических характеристик различных типов асинхронных электродвигателей требованиям нормативных документов для отдельных классов энергоэффективности.

Обсуждаются вопросы использования энергосберегающих двигателей, исследованы их характеристики и рассмотрена методика технико-экономического анализа целесообразности использования таких двигателей с учетом их режимов работы.

Исследованы условия, при выполнении которых может быть достигнуто сокращение потерь электроэнергии за счет переключения соединения статорных обмоток асинхронного двигателя со схемы «треугольник» на схему «звезда».

Проанализирована целесообразность замены двигателей, работающих с низким коэффициентом загрузки, на двигатели меньшей мощности.

Рассмотренные методы не исчерпывают все возможные способы совершенствования показателей энергетической эффективности режимов работы нерегулируемых электроприводов с асинхронными двигателями. С другими методами решения этой задачи можно ознакомиться по литературе.

Следует также иметь в виду, что для многих механизмов существенно больший технико-экономический эффект может быть достигнут при переходе от нерегулируемого привода к частотно-регулируемому. Эти вопросы выходят за рамки данного пособия, с ними можно ознакомиться по литературным источникам, в частности, приведенным в библиографическом списке.

В пособии рассмотрены также вопросы повышения энергетической эффективности режимов работы систем электроснабжения за

счет использования компенсирующей способности синхронных двигателей. Исследована зависимость реактивной мощности, генерируемой синхронными двигателями, от тока возбуждения, приведена методика оценки целесообразности использования батарей конденсаторов и синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности в узлах нагрузки систем электроснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Браславский, И.Я. Обоснование энергосберегающих технологий по результатам обследования электроприводов промышленных предприятий / И.Я. Браславский В.В. Куцин, Е.Г. Казаков // Тр. III межотраслевой научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии». – Новоуральск, 2002.
2. Государственная программа РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 г.».
3. Ильинский, Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с. – ISBN 978-5-7695-2849-1.
4. Кацман, М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. – М.: Высш. шк., 2003. – 469 с. ISBN 5-7695-1117-6.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31605-2012 Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности. Межгосударственный стандарт. (Дата введения 2015-01-01)
6. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронных машин по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество. – № 4. – 1998. – С. 38–42.
7. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 54413-2011. Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE). (Дата введения 2912-06-01)
8. Онищенко, Г.Б. Электрический привод / Г.Б. Онищенко – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 288 с. – ISBN 978-5-7695-4919-9.
9. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с. – ISBN 5-283-00531-3.
10. Технический каталог/Электродвигатели А4.
<http://www.electrotermosvar.ru/attachments/article/144/product-a4.pdf>
11. Федоров, О.В. Основы технико-экономического выбора электроприводов промышленных установок / О.В. Федоров, Э.Л. Карпова. – Н. Новгород: Изд-во ГГУ, 1991. – 164 с. – ISBN 5-230-04121-8.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	4
1. Энергетические характеристики асинхронных электродвигателей	6
2. Показатели энергетической эффективности АД. Классы энергоэффективности	11
3. Зависимость КПД и потерь мощности АД от нагрузки	21
4. Исследование эффективности использования энергосберегающих двигателей	28
5. Оценка целесообразности замены малозагруженного АД на двигатель меньшей мощности	37
6. Исследование энергоэффективности переключения обмоток статора со схемы «Треугольник» на схему «Звезда»	43
7. Компенсирующая способность СД	52
8. Использование компенсирующей способности СД в системах электропитания	62
Заключение.....	75
Библиографический список.....	77

Учебное издание

АБАКУМОВ Александр Михайлович

Энергосбережение в нерегулируемом электроприводе

Редактор *Ю.А. Петропольская*
Компьютерная верстка *И.О. Миняева*
Выпускающий редактор *Н.В. Беганова*

Подп. в печать 31.03.20
Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная
Усл. п. л. 4,59. Уч.-изд. л. 4,54
Тираж 50 экз. Рег. № 52/20

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
443100 г. Самара, Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100 г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8