

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

---

**С.В. Гужов**

**МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ**

Учебное пособие

по курсам «Автоматизированные транспортно-технологические комплексы в энергетике», «Основы робототехники в энергетике», «Автоматизация систем теплоснабжения»  
для студентов, обучающихся по направлению  
13.04.01. «Теплоэнергетика и теплотехника»

Москва  
Издательство МЭИ  
2024

УДК 621.398  
ББК 32.965  
Г 936

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

Подготовлено на кафедре АСУ ТП

Рецензенты: зав. каф. автоматизированных систем управления тепловыми процессами МЭИ, к.т.н., доц. С.В. Мезин;  
зав. отделением автоматизации АО «ВТИ», к.т.н.  
Н.В. Зорченко

**Гужов, С.В.**

Г 936 Методы оптимального проектирования и управления транспортно-технологическими процессами: учеб. пособие / С.В. Гужов. – М.: Издательство МЭИ, 2024.– 52 с.

ISBN 978-5-7046-3081-4

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

Показаны некоторые способы пуска синхронных и асинхронных электрических двигателей, приведены их преимущества и недостатки. Изложены способы повышения энергетической эффективности при эксплуатации электрических двигателей. Приведены основы сравнительного анализа двигателей различных классов энергетической эффективности.

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

**УДК 621.398  
ББК 32.965**

ISBN 978-5-7046-3081-4

© С.В. Гужов, 2024

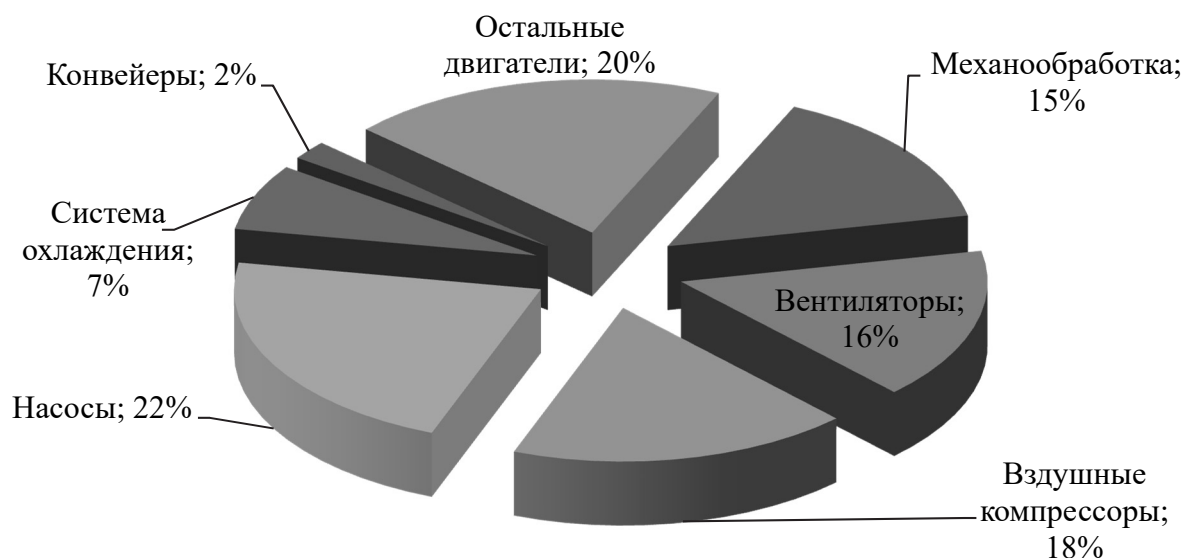
© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ВО ВСПОМОГАТЕЛЬНОМ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ.....	5
2. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ.....	7
2.1. Принцип действия и устройство.....	7
2.2. Режимы работы асинхронного двигателя.....	9
2.3. Определение основных параметров асинхронного двигателя.....	11
2.4. Пуск двигателя.....	12
3. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	14
3.1. Регулирование понижением напряжения питания.....	14
3.2. Регулирование изменением сопротивления цепи ротора.....	15
3.3. Тиристорные пусковые устройства (устройства плавного пуска).....	17
3.4. Использование устройств изменения частоты питания.....	18
4. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	21
4.1. Схема на контакторах «пуск/останов электропривода».....	21
4.2. Схема на контакторах «пуск электропривода по сигналу из пожарной системы».....	25
4.3. Схема на контакторах «пуск/останов электропривода запорной арматуры концевыми выключателями».....	26
4.4. Схема на контакторах «Прямой и реверсивный режим электропривода».....	29
4.5. Схема на контакторах «остановка электропривода противовключением».....	31
4.6. Сборка схемы «пуск электропривода в режиме звезда/треугольник».....	35
4.7. Схема на контакторах «щит аварийного переключения ЩАП20 для двух вводов.....	37
5. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	42
5.1. Корректный подбор электрического двигателя (переход на следующий класс энергетической эффективности АД).....	42
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	48

## ВВЕДЕНИЕ

Современный автоматизированный электропривод практически полностью соответствует потребностям отраслей промышленности, сельского хозяйства, систем жилищно-коммунального хозяйства, транспорта по качеству, функциональным характеристикам и надёжности. Современная промышленность выпускает все необходимые типоразмеры, обладающие возможностью подключения к устройствам регулирования, использующиеся во всех отраслях промышленности (рис. В1) [1]. Теплотехническая отрасль, включающая процессы генерации, транспорта и потребления тепловой энергии в промышленности и бытовом секторе, использует значительный по электрической мощности диапазон электродвигателей: от десятков тысяч киловатт до десятков ватт. Современные автоматизированные транспортно-технологические комплексы в энергетике используют электрические двигатели от десятков до сотен ватт и более. Например, Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат, использует в прокатных станах синхронные двигатели (СД) мощностью 30 МВт.



**Рис. В1. Разделение по энергопотреблению для конечных потребителей в промышленном производственном секторе Европейского Союза**

В настоящее время значительная часть электроприводов основного и вспомогательного оборудования, задействованного в автоматизированных транспортно-технологических комплексах в энергетике, функционирует в составе с управляющими системами. Настоящее пособие посвящено рассмотрению некоторых способов управления и повышения энергетической эффективности при эксплуатации электрических двигателей.

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

Распространенным типом оборудования, использующим электрические приводы, являются насосы. Циркуляционные насосы изготавливаются с сухим и мокрым ротором. Агрегаты с сухим ротором часто применяются для циркуляции теплоносителей в больших системах и имеют относительно высокий коэффициент полезного действия (КПД). Агрегаты с мокрым ротором, как правило, применяются для нужд горячего водоснабжения (ГВС), а также для перемещений теплоносителя у потребителя. Востребованность электроприводов для насосов объясняется большим числом задач по перекачке жидкостей в системах теплоснабжения и ГВС. Применяемые электрические приводы могут иметь мощность 0,09 кВт для насоса с подачей 1 м<sup>3</sup>/ч и напором 0,75 м. Для насоса с подачей 100 м<sup>3</sup>/ч и напором 30 м электрическая мощность составляет 11 кВт при частоте вращения ротора 1450 об./мин. [1]. Насосы часто используют в схемах индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) у потребителя, в которых электрическая машина обеспечивает принудительное перемещение теплового агента. Другой тип насосов - вакуумные насосы – используются, как правило, для откачки водяного пара, инертных газов и воздуха. При производительности 110 м<sup>3</sup>/ч потребляемая мощность составляет 3,7 кВт/об./мин., при 1500 м<sup>3</sup>/ч – 30 кВт [2].

В автоматизированных транспортно-технологических комплексах используются исполнительные механизмы и запорная арматура, в том числе управляемая дистанционно. В таком случае исполнительным механизмом является электрический двигатель, способный останавливать ротор точно в заданном положении.

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

Перечисленные электродвигатели характеризуются различным устройством и типом используемого тока, имеют разные габариты и эксплуатационные характеристики. Классификация типов электрических двигателей приведена на рис. 1 [4]. Диаграмма сравнения применения электрических двигателей в зависимости от их электрической мощности представлена на рис. 2.

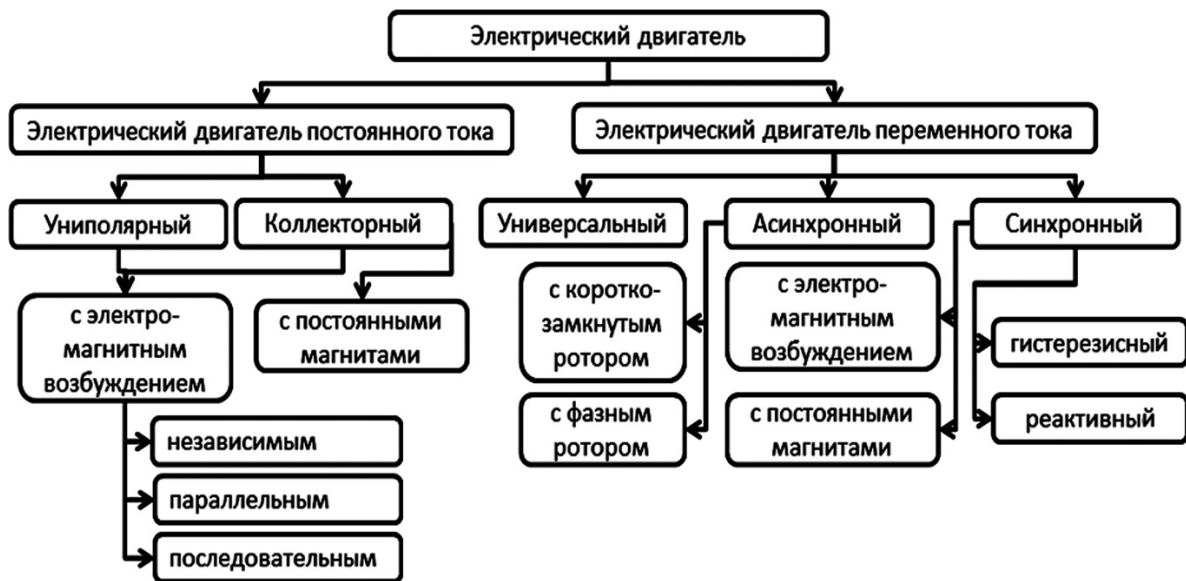


Рис. 1. Классификация электрических двигателей

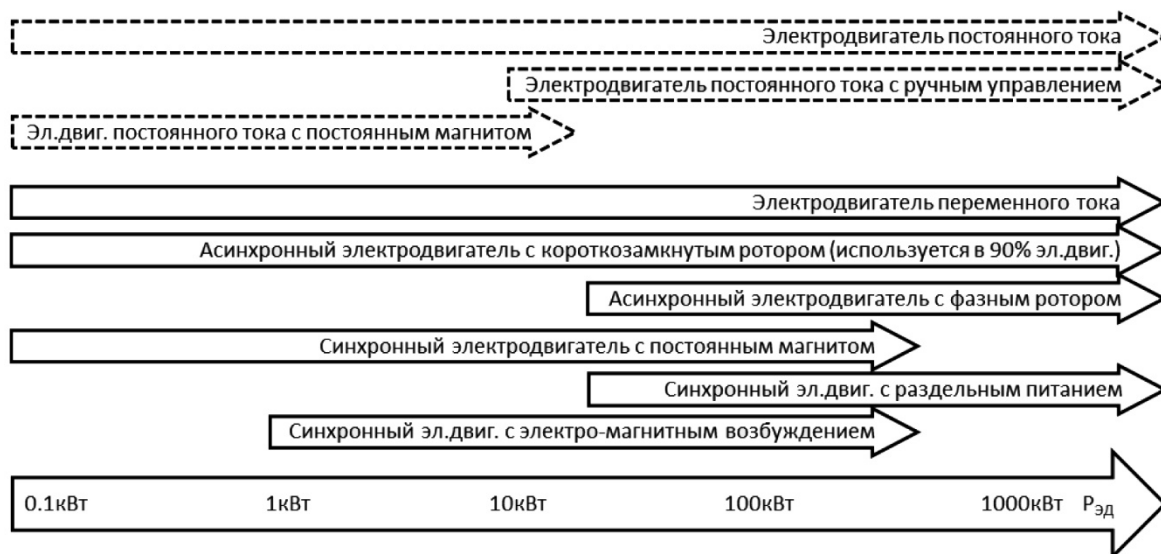


Рис. 2. Характерное применение электрических двигателей в зависимости от их электрической мощности

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

## 2. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

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

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

Электрические двигатели относятся к классу электромеханических преобразователей, конструкция которых позволяет преобразовывать электрическую энергию в механическую (двигательный режим). Поскольку все электрические машины обладают *свойством обратимости*, АД способен преобразовывать механическую энергию в электрическую (режим генератора). Вместе с этим, при проектировании машины её параметры оптимизируются к условиям эксплуатации в одном из режимов.

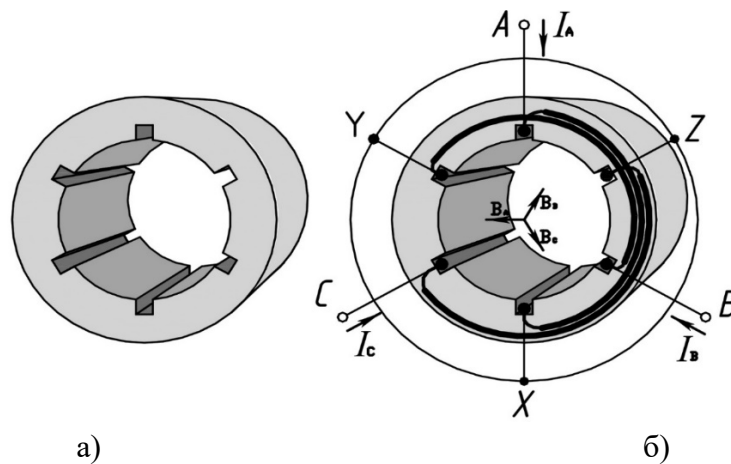
### 2.1. Принцип действия и устройство

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

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

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

Статор конструктивно состоит из корпуса, сердечника и обмоток. Корпус представляет собой полый цилиндр и практически не участвует в электромагнитных процессах электродвигателя. Его основная функция – обеспечение механической прочности и защита обмоток. На внутренней стороне корпуса закреплён сердечник, собранный из тонких листов электротехнической стали, с пазами для укладки трёхфазных обмоток (рис. 3а).



**Рис. 3. Конструктивная схема сердечника статора:**  
без обмоток (а) и с сосредоточенными обмотками (б)

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

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

Если разделить обмотку каждой фазы на две части и поместить её в удвоенное число пазов ротора так, чтобы начала и концы половин обмоток находились в пазах, смещённых по окружности статора на  $90^\circ$ , то при подключении к сети образуется магнитное поле с двойным числом полюсов.

Такое поле за один период частоты тока питающей электросети будет перемещаться в пространстве не на  $360^\circ$ , а на  $180^\circ$ . Электрические машины с удвоенным числом пар полюсов  $p_p$  имеют сниженную в два раза частоту вращения. Проведя аналогичные рассуждения легко видеть, что частота вращения  $\omega$  электропривода прямо пропорциональна частоте питающей сети и обратно пропорциональна числу пар полюсов магнитного поля  $p$ :

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

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

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

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

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

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

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

## 2.2. Режимы работы асинхронного двигателя

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

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

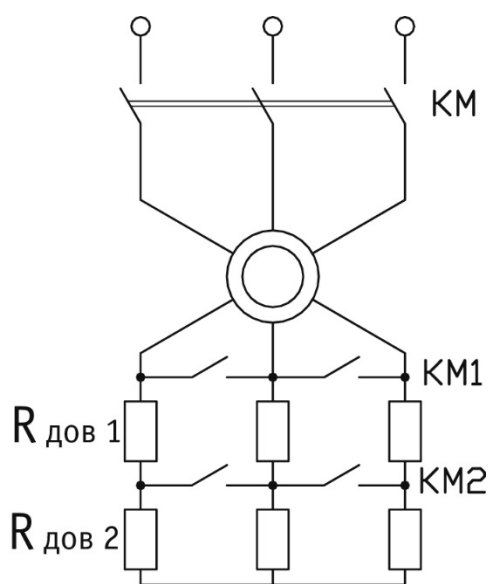
При неподвижном роторе  $s = 1$ .

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

При синхронном вращении  $s = 0$ . Синхронный режим вращения ротора называют идеальным холостым ходом. В этом режиме ротор вращается с частотой вращения магнитного поля статора. При скольжениях  $s < 0$  ротор двигателя вращается со скоростью выше синхронной. Для асинхронного

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

Двигатель потребляет и электрическую и механическую энергию, преобразуя их в тепловую  $W_T = W_{\text{Э}} + W_M$ . Тепловой режим противовключения является для АД тяжёлым, т.к. приводит к ухудшению свойств электротехнической стали, существенному перегреву и ускоренному старению изоляции. Наиболее простым решением перегрева двигателя является включение цепи якоря на добавочное сопротивление, находящееся вне двигателя (рис. 4).



**Рис. 4. Схема включения АД с включением цепи якоря на внешнее добавочное сопротивление**

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

### 2.3. Определение основных параметров асинхронного двигателя

В наиболее полных справочниках и в паспорте электрического двигателя приведены данные, позволяющие полностью описать АД. В случае отсутствия паспорта асинхронного двигателя и его справочных данных, некоторую информацию можно получить из информационной таблички (шильдика), расположенного на корпусе электрического двигателя (рис. 5, 6) [6]:

- |  |   |
|--|---|
| 1 – Заводской инвентарный номер двигателя;           | 15 – Температура окружающей среды, °С;                                    |
| 2 – Количество фаз;                                  | 16 – Сервис-фактор;   |
| 3 – Номинальное рабочее напряжение, В;               | 17 – Высота над уровнем моря, м;  |
| 4 – Режим эксплуатации;                              | 18 – Вес двигателя, кг;   |
| 5 – КПД, %;  | 19 – Спецификация на подшипник с приводной стороны и количество смазки;   |
| 6 – Габарит, мм;                                     | 20 – Спецификация на подшипник с неприводной стороны и количество смазки; |
| 7 – Степень защиты;                                  | 21 – Тип смазки;  |
| 8 – Класс изоляции;                                  | 22 – Схема электрических соединений;                                      |
| 9 – Температурный подъем, К;                         | 23 – Не указан на рисунке;  |
| 10 – Частота, Гц;                                    | 24 – Сертификационная маркировка;   |
| 11 – Номинальная мощность двигателя, Вт;             | 25 – Дата изготовления;   |
| 12 – Частота вращения при полной нагрузке, об./мин.; | 26 – Серийный номер.  |
| 13 – Номинальный рабочий ток, А;                     |   |
| 14 – Коэффициент мощности;                           |   |

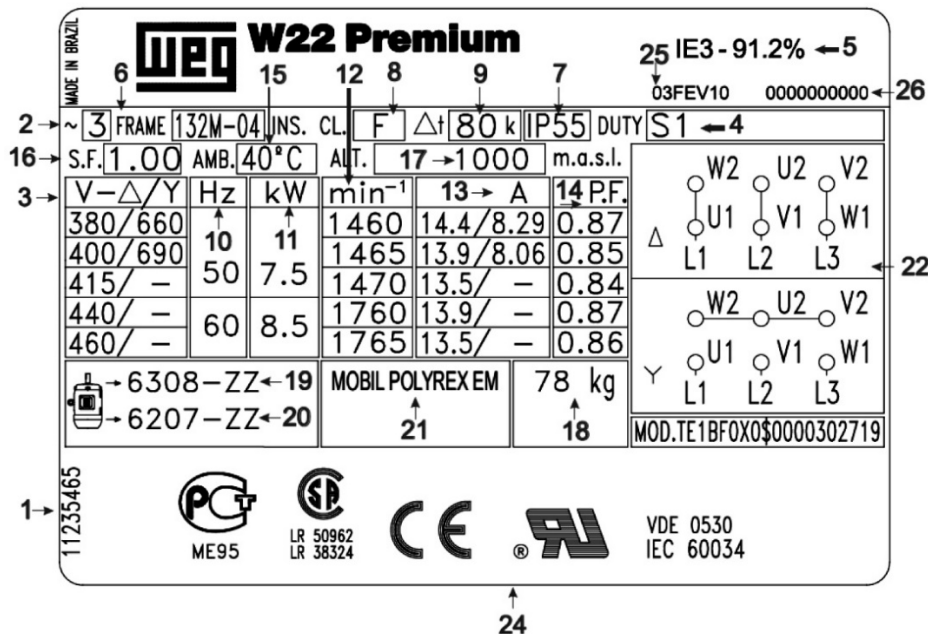


Рис. 5. Вид таблички на двигателях WEG W22 Premium габаритами от 63 до 132 мм

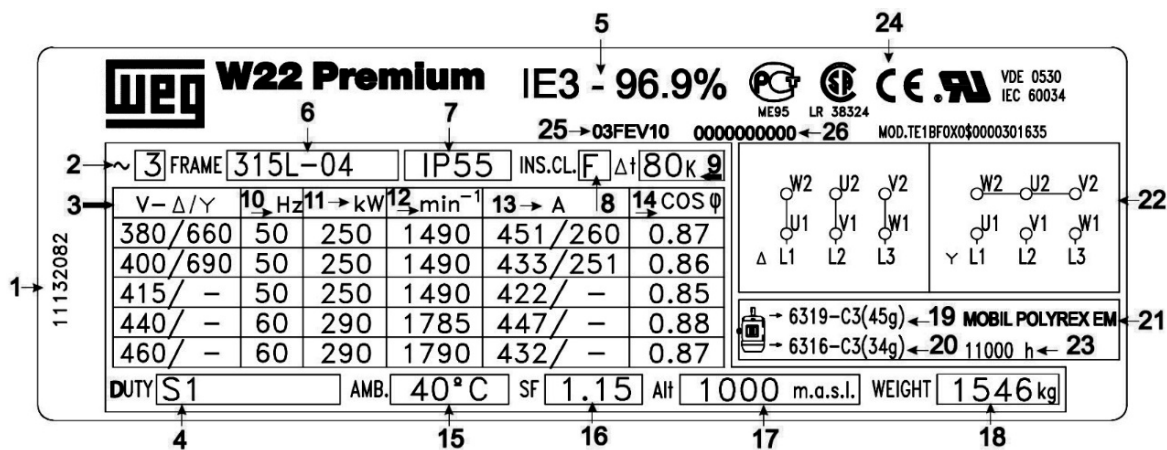


Рис. 6. Вид таблички на двигателях WEG W22 Premium габаритами от 160 до 355 мм

Полученная информация в дальнейшем может быть использована при эксплуатации АД.

#### 2.4. Пуск двигателя

Существует несколько способов пуска асинхронного двигателя. Наиболее простой способ – прямой пуск путём непосредственного включения обмоток АД в питающую сеть с помощью коммутационного устройства КМ (рис. 7). Прямой пуск позволяет включение двигателя без дополнительной электрической аппаратуры.

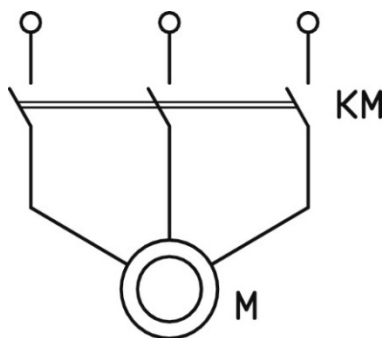
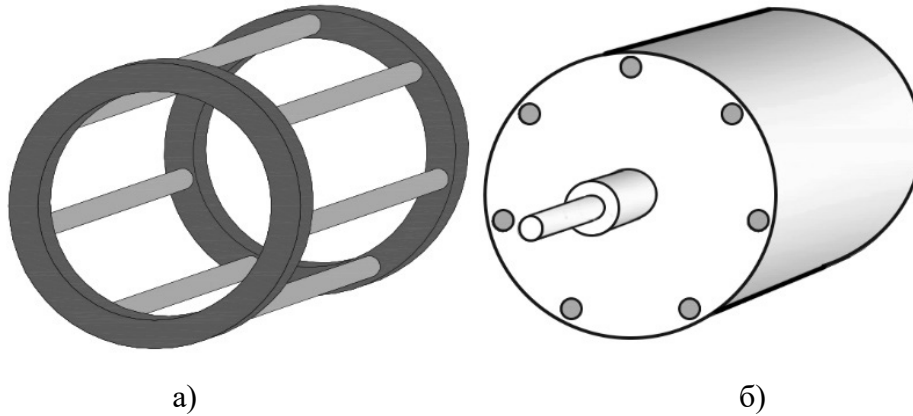


Рис. 7. Схема включения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при использовании контактного пускателя

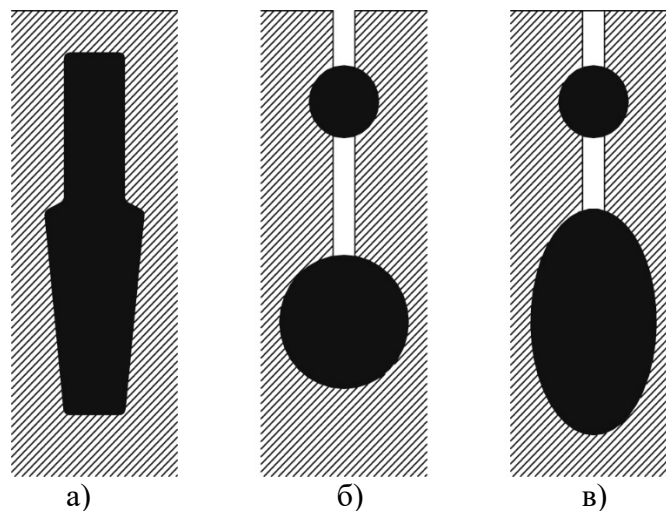
При запуске асинхронный двигатель развивает пусковой вращающий момент кратностью от 1,2 до 2,0 относительно номинального. Пусковые токи при этом имеют кратность от 3 до 7 и более от номинального тока, в зависимости от конструктивных особенностей двигателя. Пусковой ток большой кратности является главной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

Более мощные электрические двигатели включают посредством дополнительной пуско-регулирующей аппаратуры [7]. Конструкция таких двигателей предусматривает наличие в роторе одной либо нескольких замкнутых рамок из проводящего материала, объединённых в конструкцию «белчья клетка» (рис. 8).



а) б)  
**Рис. 8. Белчья клетка (а) и принципиальное изображение ротора (б) АД с белчьей клеткой**

Протекание по проводнику белчьей клетки значительных пусковых токов вызывает явление вытеснения тока из центра проводника к его поверхности. Данное свойство также используют для увеличения пускового момента посредством изготовления проводников трапециевидного сечения с соотношением ширины к высоте около 1:10 (рис. 9а). Наиболее целесообразным решением является разделение «белчьей клетки» на две обмотки: нижней рабочей и верхней – пусковой (рис. 9б, 9в). Преимущество подобных АД состоит в увеличенной характеристике пускового момента. Недостаток – относительная сложность изготовления и высокая стоимость.



а) б) в)  
**Рис. 9. Некоторые виды сечений проводников белчьей клетки глубокопазных АД**

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

### **3. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

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

#### **3.1. Регулирование понижением напряжения питания**

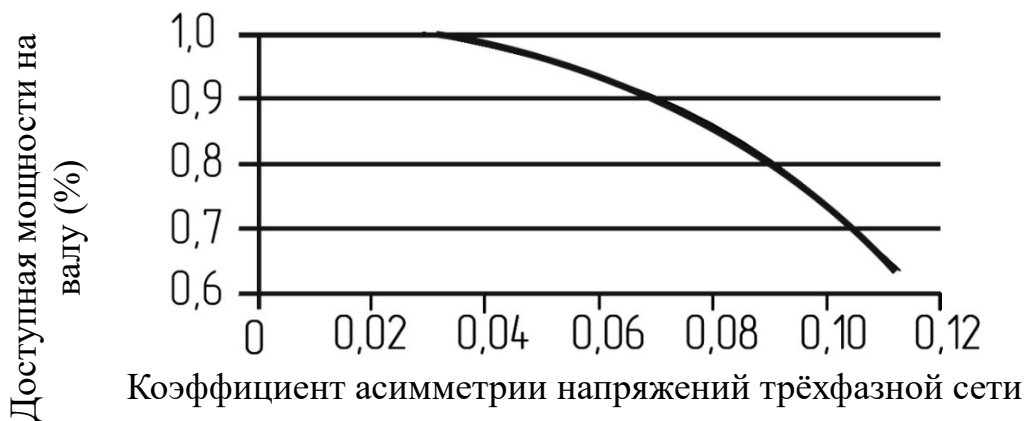
При снижении напряжения питания сети сохраняется значение критического скольжения, но снижается максимальный момент двигателя. При наличии на валу двигателя постоянной механической нагрузки скорость вращения вала будет также уменьшаться. Описанный случай возможен, например, в слабых электрических сетях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

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

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

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

Для трёхфазных электрических двигателей необходимо осуществлять одновременное регулирование напряжений каждой из фаз, что достигается применением специальных преобразователей. В случае несимметричного снижения напряжения мощность на валу снижается существенно (рис. 10).



**Рис. 10. Зависимость мощности на валу ротора от коэффициента асимметрии напряжений трёхфазной сети**

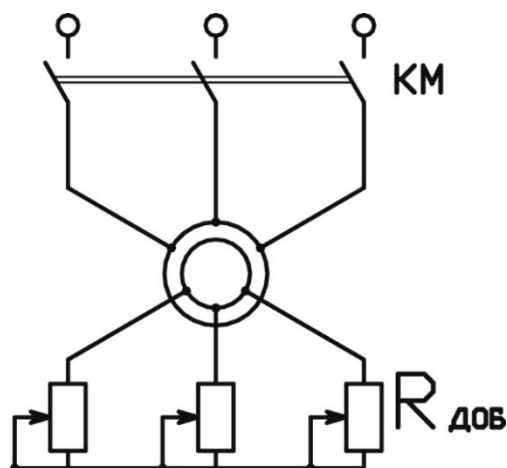
К недостаткам способа регулирования скорости вращения АД изменением напряжения также относятся:

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

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

### **3.2. Регулирование изменением сопротивления цепи ротора**

Способ также называется реостатным регулированием и применяется для АД с фазным ротором. Способ состоит во включении в цепь ротора разделённого на секции резистора, ступени которого переключаются либо регулировочными контактами, либо путём реостатного изменения сопротивления (рис. 11).



**Рис. 11. Схема силовых цепей асинхронного электропривода с добавочными активными сопротивлениями в цепи обмотки ротора**

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

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

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

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

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

- эксплуатация АД с включенными сопротивлениями приводит к существенным потерям электрической энергии в добавочном сопротивлении, что экономически нецелесообразно;
- с увеличением добавочного сопротивления точность регулирования скорости вращения ротора снижается;
- при снижении нагрузочного момента на валу ротора диапазон возможного регулирования скорости вращения снижается. При скоростях вращения ниже  $0,25\omega_0$  и в режимах, близких к режиму холостого хода, регулирование становится практически невозможным.

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

### 3.3. Тиристорные пусковые устройства (устройства плавного пуска)

Целесообразным способом обеспечения плавности пуска асинхронного электрического двигателя является использование в их структурах тиристорных пусковых устройств, называемых также устройствами плавного пуска. Тиристорное пусковое устройство (ТПУ) представляет собой адаптированный к электромеханическим характеристикам АД регулятор напряжения переменного тока с фазовым управлением (рис. 12). Представленная схема обеспечивает изменения время открытия и закрытия тиристоров VS1-VS6, что позволяет задавать начальное и конечное фазовые значения питающего напряжения.

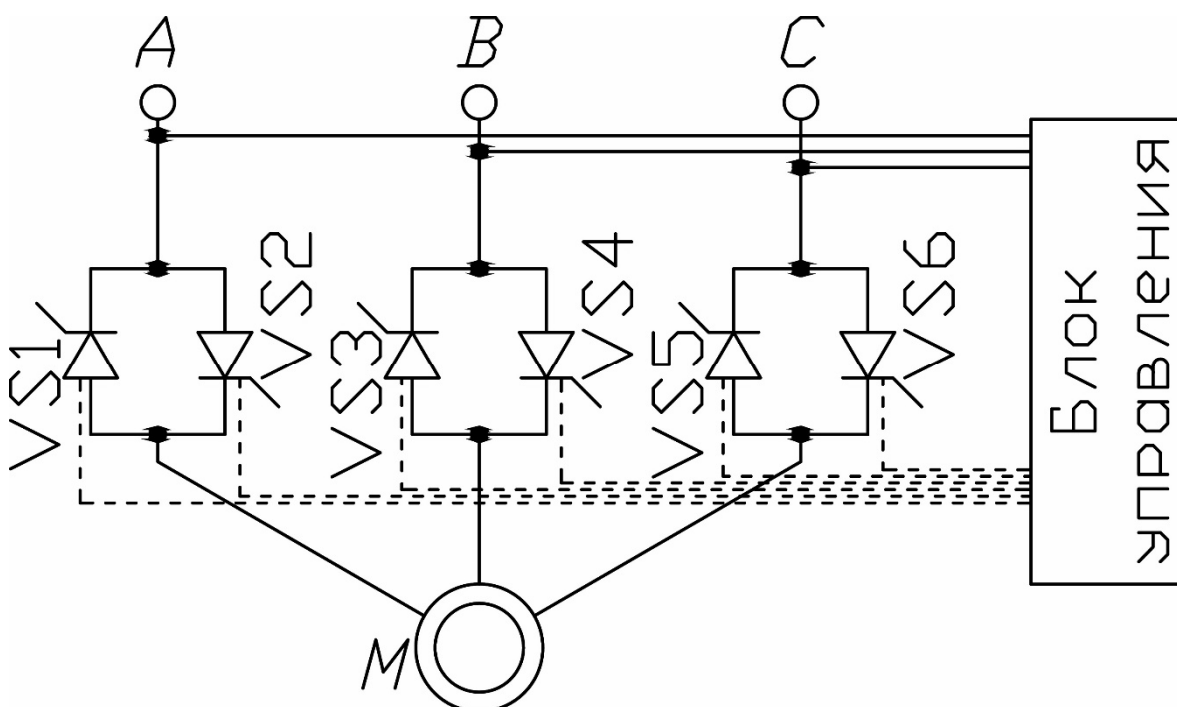


Рис. 12. Функциональная схема асинхронного электропривода с тиристорным пусковым устройством

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

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

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

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

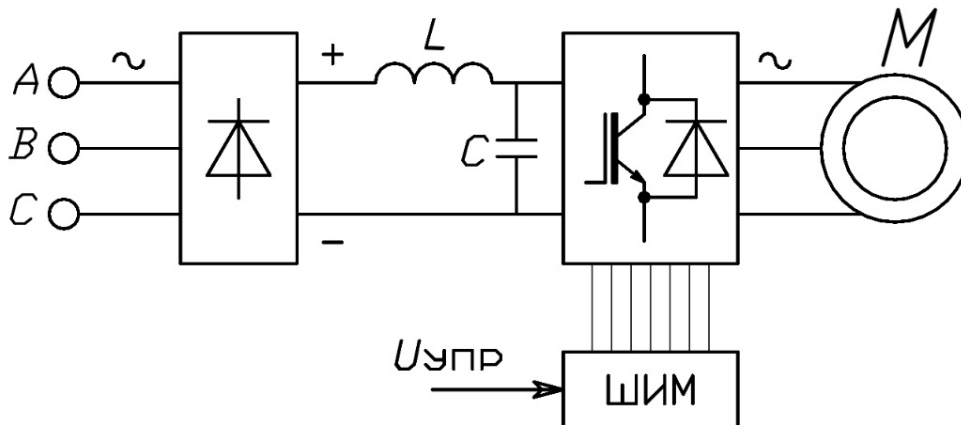
### **3.4. Использование устройств изменения частоты питания**

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

Наиболее целесообразное энергосберегающее мероприятие – включение между питающей сетью и электрической машиной устройства изменения частоты питания. Принцип действия частотного регулирования электрического привода (ЧРП) состоит в регулировании полупроводниковым преобразователем частоты питающей сети. Системы ЧРП-АД по типу связи с питающей сетью бывали с непосредственной связью, но сейчас выпускаются только со звеном постоянного тока. ЧРП со звеном постоянного тока, в свою очередь, изготавливаются как автономные инверторы тока (АИТ) и как автономные инверторы напряжения (АИН). АИН содержат выпрямитель сетевого напряжения, фильтр гармоник тока и напряжения питающей сети, и инвертор, преобразующий постоянное напряжение в переменное напряжение требуемой частоты посредством команд от широтно-импульсного модулятора (ШИМ) (рис. 13).

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

- возможность обеспечения плавного пуска и изменения скорости вращения, что существенно повышает комфортность лифтовых механизмов;
- возможность косвенного контроля по моделям теплового режима регулируемого электрического двигателя, недопущение его перегрева, а, значит, увеличение срока безаварийной работы;
- возможность регулирования скорости вращения двигателей мощностью от десятков ватт до десятков мегаватт;
- возможность более точной подстройки переходных электротехнических процессов при регулировании электродвигателя к механическим характеристикам редуктора, что обеспечивает бесшумность и долговечность работы механической составляющей приводной установки;
- несущественные различия массогабаритных показателей АД с ЧРП и обыкновенных электрических двигателей.



**Рис. 13. Упрощенная схема преобразователя частоты асинхронного двигателя**

Основными недостатками являются:

- низкий коэффициент мощности системы ЧРП-АД ( $\cos\varphi \approx 0,15$ );
- ЧРП производит значительный фон гармонических составляющих напряжения и тока в групповую сеть электродвигателя;
- сложности при генерации частот, незначительно отличающихся от частоты питающей сети.

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

Внедрение систем ЧРП в городских насосных станциях водоснабжения дает экономию электроэнергии 20–50%.

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

- экономии транспортируемого продукта за счет снижения непроизводительных расходов до 25%;
- снижении аварийности гидравлической или пневматической сети за счет поддержания минимально необходимого давления;
- снижении уровня шума, создаваемого технологическим оборудованием.

Значительное снижение момента нагрузки при снижении скорости вращения приводного двигателя обеспечивает существенную экономию электроэнергии (до 50%) при использовании регулируемого электропривода и позволяет создать принципиально новую технологию транспортировки воды, воздуха и т.д., обеспечивающую эффективное регулирование производительности агрегата.

Кроме того, поддержание в системе минимально необходимого давления приводит к существенному уменьшению непроизводительных расходов транспортируемого продукта и снижению аварийности гидравлических и пневматических сетей.

Невысокие требования к качеству регулирования давления и расхода обуславливают возможность применения наиболее простых и, следовательно, относительно недорогих преобразователей. Положительным моментом является также то, что преобразователь частоты может быть легко внедрен в уже существующую установку без какой-либо реконструкции системы в целом.

Сочетание высокой экономичности регулирования и относительно низкой стоимости оборудования обеспечивает минимальный срок его окупаемости (6–12 месяцев).

## **4. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

### **Указания по технике безопасности**

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированные системы управления тепловыми процессами» и ознакомившиеся с настоящими указаниями. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

2. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.

3. Сборку схемы осуществлять исправными соединительными проводами, используя при этом приведенные в лабораторной работе принципиальные схемы экспериментов.

4. Собранная цепь проверяется преподавателем и может включаться только по его разрешению и при его наблюдении. О включении напряжения предупреждают всех членов бригады, выполняющих работу.

5. Изменения схемы производят только при выключенном напряжении на стенде, а вновь собранная схема перед подачей на неё напряжения проверяется преподавателем.

6. По окончании испытания или при перерыве в работе схему отключают от напряжения питания. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

7. При возникновении неисправностей, а также в случае появления запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или оборудования, следует незамедлительно прекратить работу с лабораторным стендом, выключив его из сети, и обратиться к преподавателю или обслуживающему персоналу.

### **Содержание отчета**

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю. В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- 1) название и цель лабораторной работы;
- 2) перечень используемой аппаратуры;
- 3) электрическая схема соединений;
- 4) порядок выполнения работы.

#### **4.1. Схема на контакторах «пуск/останов электропривода»**

У каждого электрического двигателя есть рабочие ограничения. Превышение данных ограничений в конечном итоге приводит к выходу его из строя и поломке системы привода, следствием чего являются отключение и простои. Такие потребители, которые преобразует электрическую энергию в механическую, могут стать причиной электрического или механического отказов.

Отказ электрической части:

– перегрузка, падение напряжения, перекос и обрывы фазы, приводят к колебаниям потребляемого тока;

– короткие замыкания, при которых ток достигает значительной величины, могут вывести из строя потребителя.

Отказ механической части:

– заклинивание ротора, однократные или продолжительные перегрузки вызывают повышение тока двигателя и опасный нагрев его обмоток.

Убытки от этих отказов могут быть большими. Они включают в себя производственные потери, потери сырья, ремонт производственного оборудования, некачественное производство и задержки поставки. Экономической необходимостью для конкурентоспособности бизнеса является снижение убытков от простоя и брака.

Эти отказы также могут иметь серьезные последствия для безопасности людей, находящихся в прямом или косвенном контакте с двигателем.

Для предотвращения таких отказов или, как минимум, для снижения их воздействия, а также предотвращения повреждений оборудования и нарушения электропитания необходима защита (рис. 14, табл. 1).

Она отключает оборудование от питающей сети посредством отключающего устройства, которое реагирует на изменения электрических показателей (напряжение, ток и т.д.).

#### **Контрольные вопросы и задания**

1. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе пуска электропривода?

2. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе останова электропривода?

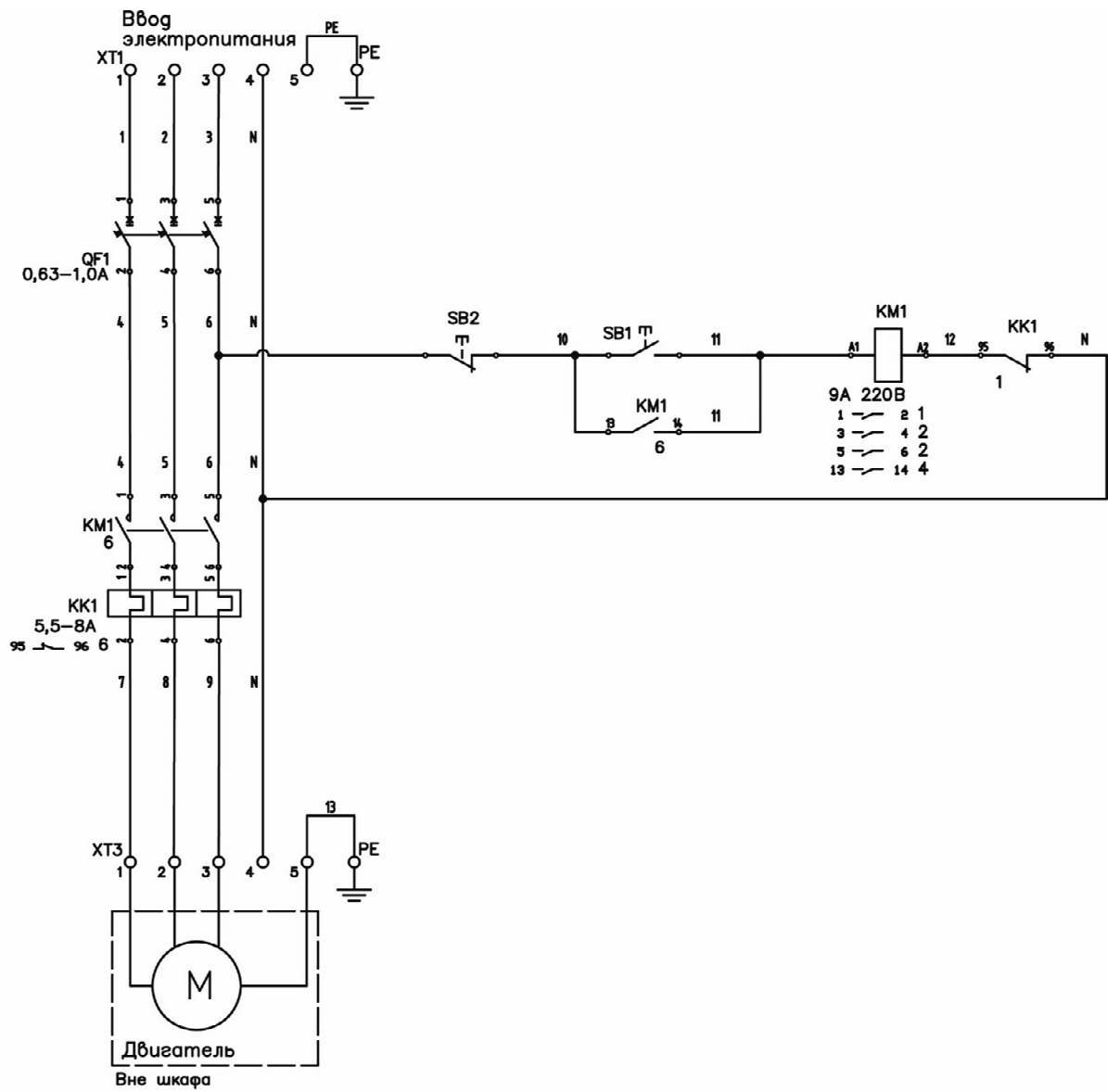
3. Покажите нормально замкнутые контакты.

4. Покажите нормально разомкнутые контакты.

5. Какими достоинствами и недостатками обладает приведённая схема?

**Состав элементов схемы автоматизации пуска/останов  
электропривода**

<b>№</b>	<b>Позиционные обозначения</b>	<b>Описание</b>	<b>Каталожный номер ЕКФ</b>	<b>Количество, ед.</b>
1	QF1	Автомат пуска двигателя АПД-32 0, 63-1, 0А ЕКФ PROxima	apd2-0.63-1.0	1
2	KM1	Контактор КМЭ малогабаритный 9А 220В 1NO ЕКФ PROxima	ctr-s-9-220	1
3	KK1	Реле тепловое РТЭ-1312 5,5-8А ЕКФ PROxima	rel-1312-5.5-8	1
4	SB1	Кнопка ВА31 зеленая NO ЕКФ PROxima	xb2-ba31	1
5	SB2	Кнопка ВА42 красная NC ЕКФ PROxima	xb2-ba42	1
6	XT3	Колодка клеммная ЕК-2, 5/25 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-2.5/25	1
7	XT1	Колодка клеммная ЕК-4/32 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-4/32	1
8	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.4/35gy	3
9	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.5/35b	1
10	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35b	1
11	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35gy	3



## 4.2. Схема на контакторах «пуск электропривода по сигналу из пожарной системы»

Существует схема управления электропривода по сигналу из пожарной системы (рис. 15, табл. 2).

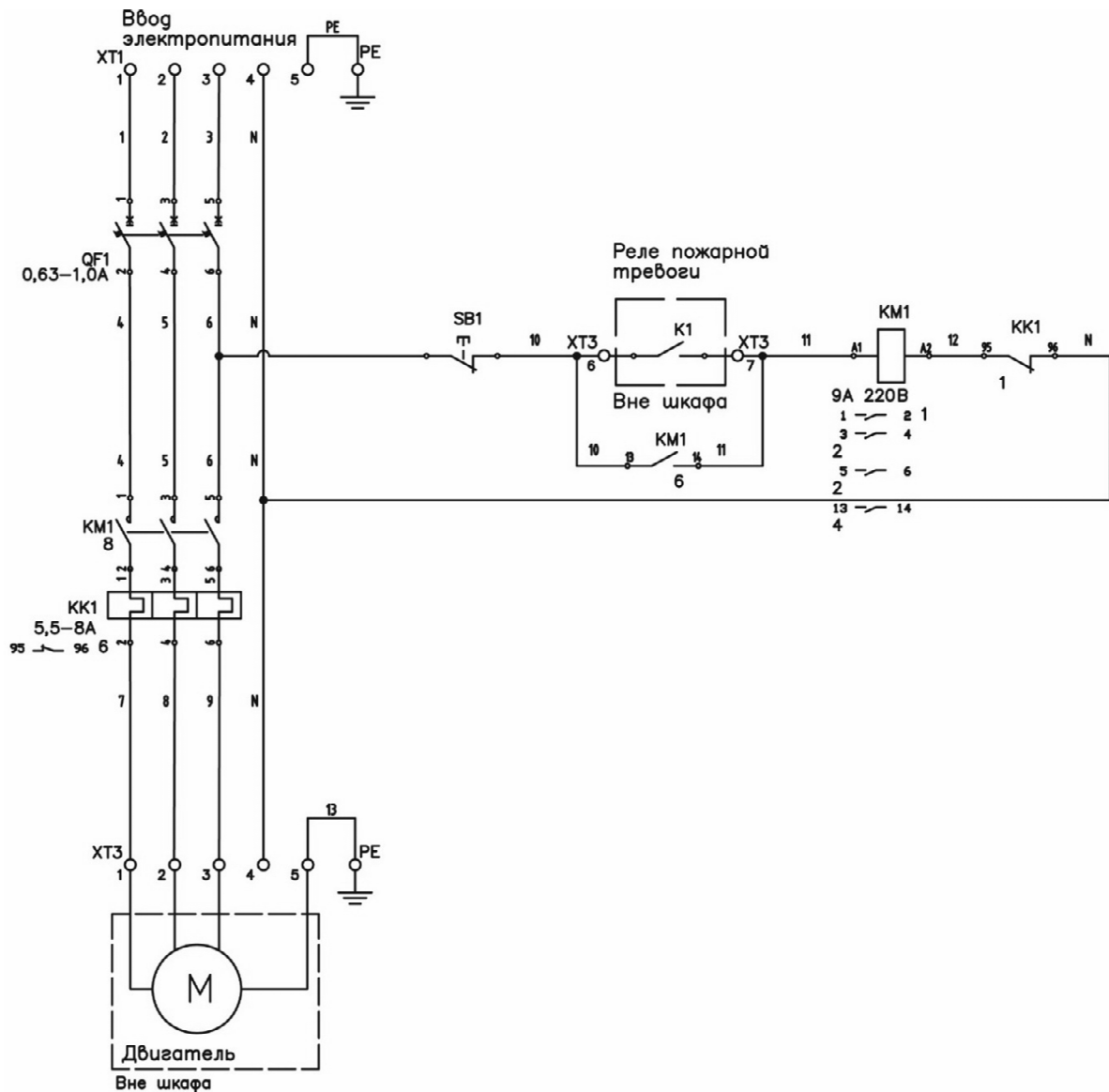


Рис. 15. Схема автоматизации пуск электропривода по сигналу пожарной тревоги

**Состав элементов схемы автоматизации пуск электропривода по сигналу пожарной тревоги**

№	Позиционные обозначения	Описание	Каталожный номер ЕКФ	Количество, ед.
1	QF1	Автомат пуска двигателя АПД-32 0, 63-1, 0А ЕКФ PROxima	apd2-0.63-1.0	1
2	KM1	Контактор КМЭ малогабаритный 9А 220В 1NO ЕКФ PROxima	ctr-s-9-220	1
3	KM1	Реле тепловое РТЭ-1312 5,5-8А ЕКФ PROxima	rel-1312-5.5-8	1
4	SB1	Кнопка ВА42 красная NC ЕКФ PROxima	xb2-ba42	1
5	XT3	Колодка клеммная ЕК-2, 5/25 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-2.5/25	1
6	XT1	Колодка клеммная ЕК-4/32 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-4/32	1
7	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.4/35gy	5
8	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.5/35b	1
9	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35b	1
10	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35gy	3

**Контрольные вопросы и задания**

1. Опишите функционирование автоматизации схемы при процессе пуска электропривода.
2. Опишите функционирование автоматизации схемы при процессе останова электропривода.
3. Покажите нормально замкнутые контакты.
4. Покажите нормально разомкнутые контакты.
5. Какими достоинствами и недостатками обладает приведённая схема?

**4.3. Схема на контакторах «пуск/останов электропривода запорной арматуры концевыми выключателями»**

Концевой выключатель – это механическое реле, использующееся, например, в цепях управления электрическим приводом, и приводимое в действие при помощи непосредственного механического контакта / воздействия на часть электрической машины. Когда некоторый контакт или движущаяся часть исполнительного механизма достигает заданного положения, происходит срабатывание приводной системы на предмет её включения либо отключения.

На рисунке 16, табл. 3 приведена схема управления реверсивным двигателем запорной арматуры с пуском в сторону открытия, закрытия от кнопок и остановкой двигателя в крайних положениях концевыми выключателями.

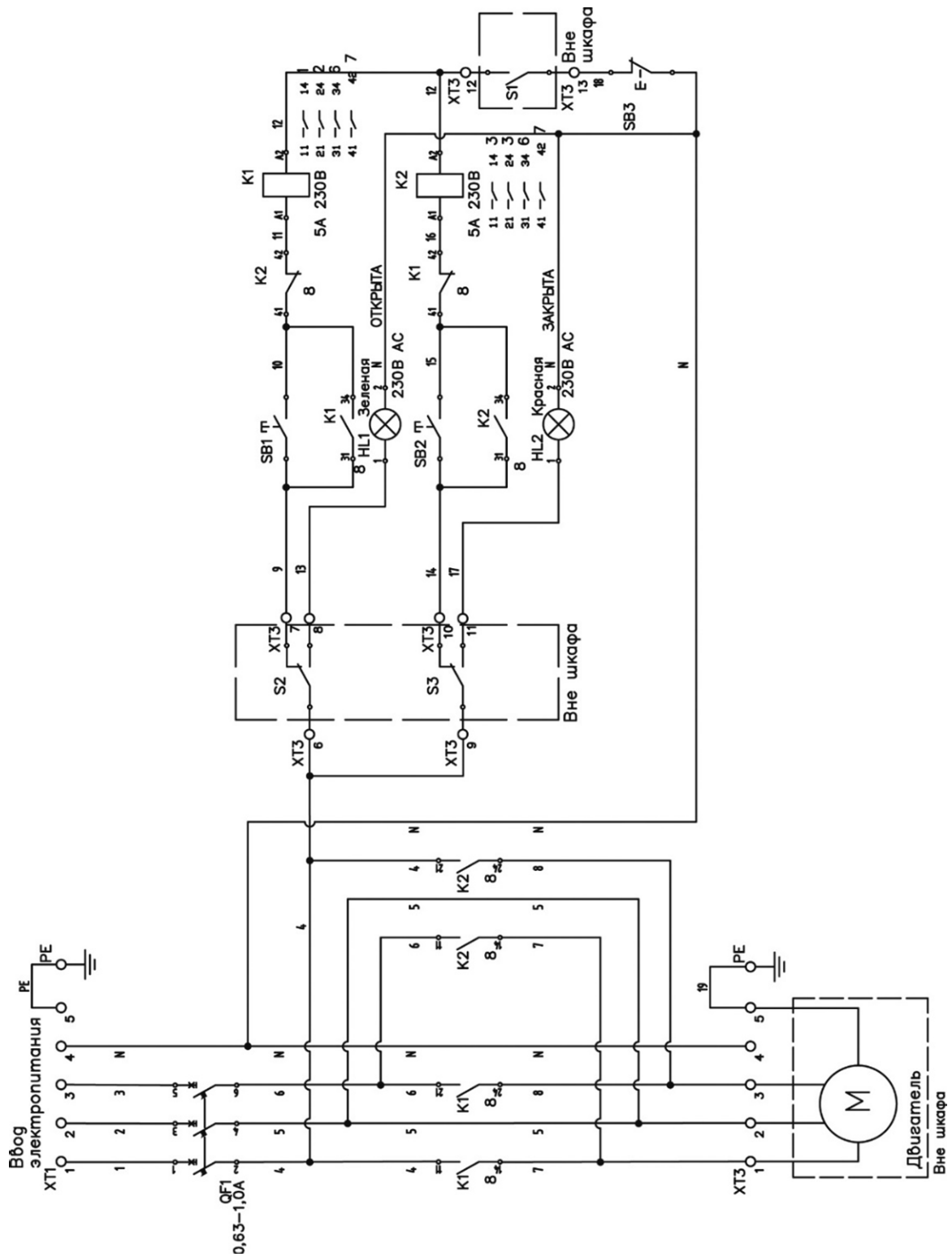


Рис. 16. Схема автоматизации пуск/останов электропривода концевыми выключателями

**Состав элементов схемы автоматизации пуска/останов  
электропривода концевыми выключателями**

№	Позиционные обозначения	Описание	Каталожный номер ЕКФ	Количество, ед.
1	QF1	Автомат пуска двигателя АПД-32 0, 63-1, 0А ЕКФ PROxima	apd2-0.63-1.0	1
2	K1, K2	Реле промежуточное RPA 22/4 5А 230В АС ЕКФ AVERES	гра-22-4-230АС	2
3	K1, K2	Разъем для реле РМ4 22/4 ЕКФ AVERES	rm4-22-4	2
4	HL1	Матрица светодиодная AD16-22HS зеленая ЕКФ PROxima	ledm-ad16-g	1
5	HL2	Матрица светодиодная AD16-22HS красная ЕКФ PROxima	ledm-ad16-r	1
6	SB1, SB2	Кнопка ВА31 зеленая NO ЕКФ PROxima	xb2-ba31	2
7	SB3	Кнопка ВА42 красная NC ЕКФ PROxima	xb2-ba42	1
8	XT3	Колодка клеммная ЕК-2, 5/25 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-2.5/25	1
9	XT1	Колодка клеммная ЕК-4/32 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-4/32	1
10	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.4/35gy	11
11	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.5/35b	1
12	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35b	1
13	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35gy	3

**Контрольные вопросы и задания**

1. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе пуска электропривода?
2. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе останова электропривода?
3. Покажите нормально замкнутые контакты.
4. Покажите нормально разомкнутые контакты.
5. Как можно описать принцип действия концевого выключателя?

#### 4.4. Схема на контакторах «Прямой и реверсивный режим электропривода»

Схема, как правило, имеет силовой блок и реверсивный модуль (рис. 17, табл. 4).

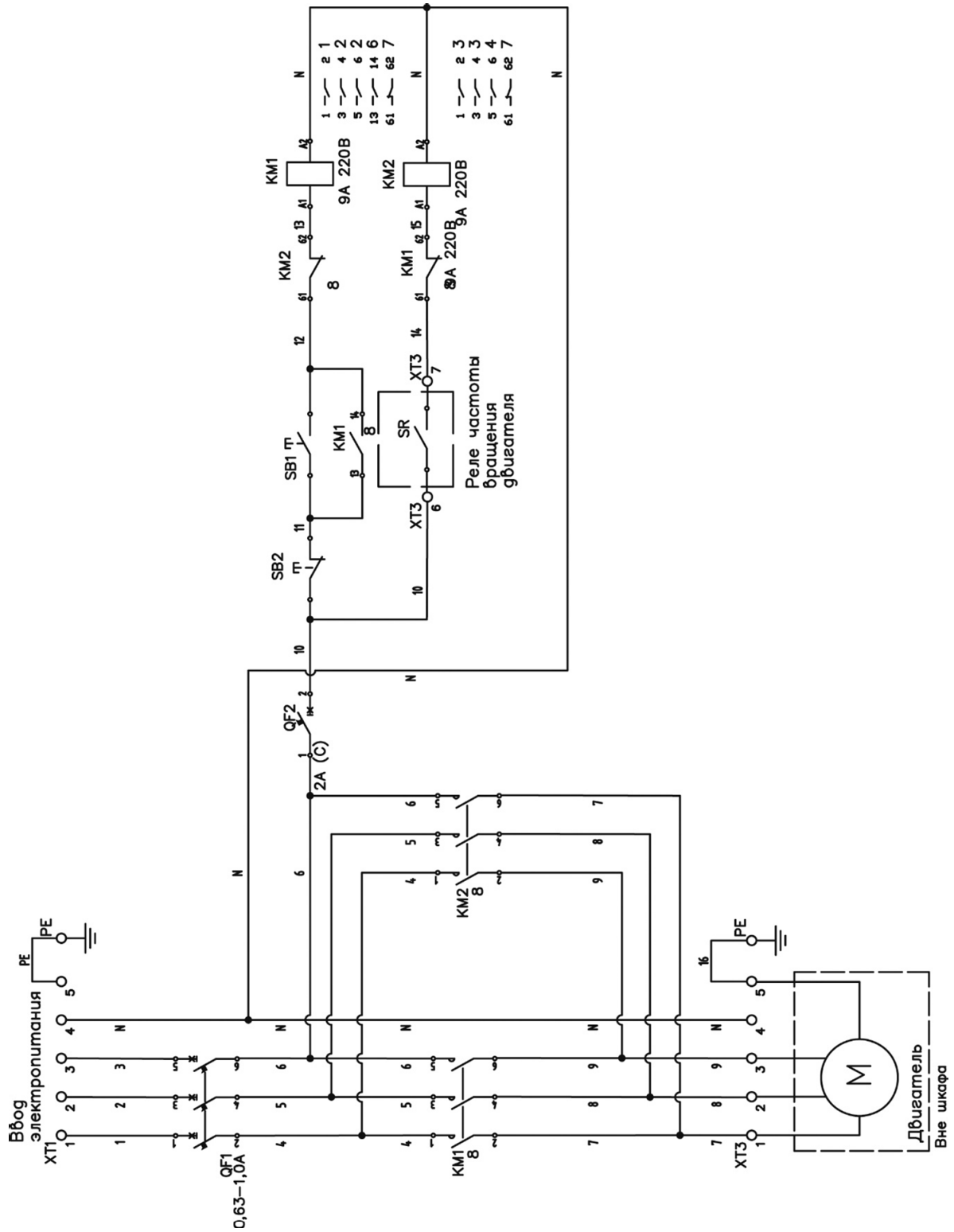


Рис. 17. Схема автоматизации прямой и реверсивный режим электропривода

**Состав элементов схемы автоматизации прямой и реверсивный режим электропривода**

№	Позиционные обозначения	Описание	Каталожный номер ЕКФ	Количество, ед.
1	QF1	Автомат пуска двигателя АПД-32 0, 63-1, 0А ЕКФ PROxima	apd2-0.63-1.0	1
2	KM1, KM2	Контактор КМЭ малогабаритный 9А 220В 1NO ЕКФ PROxima	ctr-s-9-220	2
3	KM1, KM2	Приставка контактная ПКЭ-11 NO+NC ЕКФ PROxima	ctr-sc-23	2
4	KM1, KM2	Реле тепловое РТЭ-1312 5,5-8А ЕКФ PROxima	rel-1312-5.5-8	2
5	SB1, SB2	Кнопка ВА31 зеленая NO ЕКФ PROxima	xb2-ba31	2
6	SB3	Кнопка ВА42 красная NC ЕКФ PROxima	xb2-ba42	1
7	XT3	Колодка клеммная ЕК-2, 5/25 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-2.5/25	1
8	XT1	Колодка клеммная ЕК-4/32 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-4/32	1
9	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.4/35gy	3
10	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.5/35b	1
11	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35b	1
12	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35gy	3

Силовой блок управляет пуском/остановкой, осуществляя защиту от короткого замыкания и тепловую защиту. Блок реверсирования никогда не коммутируется под нагрузкой, поэтому отсутствует электрический износ контактов. Кроме того, нет необходимости в механической блокировке, так как электромагнит обладает двумя устойчивыми состояниями, а к держателю реверсивного контакта нет доступа, поэтому его положение нельзя изменить.

## **Контрольные вопросы и задания**

1. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе эксплуатации электропривода в прямом режиме?
2. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе эксплуатации электропривода в реверсивном режиме?
3. Покажите нормально замкнутые контакты.
4. Покажите нормально разомкнутые контакты.
5. Какими достоинствами и недостатками обладает приведённая схема?

### **4.5. Схема на контакторах «остановка электропривода противовключением»**

Во многих системах двигатели останавливаются свободным выбегом. Время остановки зависит только от моментов инерции и сопротивления механизма привода. Однако время часто необходимо сократить, и электрическое торможение является простым и эффективным решением. По сравнению с системами механического и гидравлического торможения у нее есть преимущество, заключающееся в стабильности и в отсутствии износа деталей.

### **Торможение противовключением**

Двигатель отключается от питающей сети и в то время, как он все еще продолжает вращаться, он снова подключается к сети в режиме реверса (рис. 18, табл. 5). Это очень эффективный способ торможения с крутящим моментом выше, чем пусковой крутящий момент, который должен быть закончен достаточно быстро, чтобы предотвратить запуск двигателя в противоположном направлении. Для управления остановкой при приближении скорости к нулю используются несколько приборов автоматики:

- датчики прекращения трения, центробежный датчик остановки;
- реле времени;
- измеритель частоты или реле напряжения ротора (для двигателей с контактными кольцами) и т.д.

Необходимо быть уверенным, что двигатель с короткозамкнутым ротором может выдержать торможение противовключением с требуемой нагрузкой. Не считая механический удар, этот процесс подвергает ротор высокому тепловому воздействию, так как энергия, вырабатываемая при

каждом торможении (энергия скольжения от сети и кинетическая энергия) рассеивается в роторе. Тепловая нагрузка при торможении в три раза больше, чем при наборе скорости. При торможении пики тока и крутящего момента существенно выше, чем при пуске.

Для плавного торможения при противовключении в каждой фазе статора часто устанавливается последовательно резистор. Это снижает крутящий момент и ток до значений, как при пуске двигателя. У торможения противовключением так много недостатков, что эта система используется только для маломощных двигателей.

Для ограничения пикового значения тока и крутящего момента, перед переходом двигателя с контактными кольцами в режим противовключения, необходимо в цепь ротора включить резисторы, используемые для пуска, и иногда требуется добавить дополнительные резисторы в цепь ротора. Значение тормозного момента легко отрегулировать правильным выбором резистора в цепи ротора.

В момент переключения тока напряжение ротора практически в два раза больше, чем при остановленном роторе, что иногда заставляет предпринять специальные меры по изоляции.

Так же как и в случае с короткозамкнутыми двигателями, большое количество энергии выделяется в цепи ротора. Она полностью рассеивается (за вычетом некоторых потерь) в резисторах.

Двигатель может быть остановлен автоматически при помощи одного из указанных выше приборов, или с помощью реле контроля напряжения или частоты в цепи ротора.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе эксплуатации пуска электропривода.
2. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе останова электропривода.
3. Покажите нормально замкнутые контакты.
4. Покажите нормально разомкнутые контакты.
5. Какими достоинствами и недостатками обладает приведённая схема?



**Состав элементов схемы автоматизации остановка электропривода  
противовключением**

<b>№</b>	<b>Позиционные обозначения</b>	<b>Описание</b>	<b>Каталожный номер ЕКФ</b>	<b>Количество, ед.</b>
1	QF1	Автомат пуска двигателя АПД-32 0, 63-1, 0А ЕКФ PROxima	apd2-0.63-1.0	1
2	QF2	Автоматический выключатель 1P 2А (С) 4,5kА ВА 47-63 ЕКФ PROxima	mcb4763-1-02C-pro	1
3	KM1, KM2	Контактор КМЭ малогабаритный 9А 220В 1NO ЕКФ PROxima	ctr-s-9-220	2
4	KM1, KM2	Приставка контактная ПКЭ-11 NO+NC ЕКФ PROxima	ctr-sc-23	2
5	SB1	Кнопка ВА31 зеленая NO ЕКФ PROxima	xb2-ba31	1
6	SB2	Кнопка ВА42 красная NC ЕКФ PROxima	xb2-ba42	1
7	XT3	Колодка клеммная ЕК-2, 5/25 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-2.5/25	1
8	XT1	Колодка клеммная ЕК-4/32 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-4/32	1
9	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.4/35gy	5
10	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.5/35b	1
11	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35b	1
12	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35gy	2

#### 4.6. Сборка схемы «пуск электропривода в режиме звезда/треугольник»

Пуск двигателей переключением «звезда/треугольник» возможен в двигателях (при выведенных всех шести концах обмотки статора), предназначенных работать по схеме соединения обмоток статора в «треугольник» (рис. 19, табл. 6) и приводящих в ход механизмы с малыми пусковыми моментами.

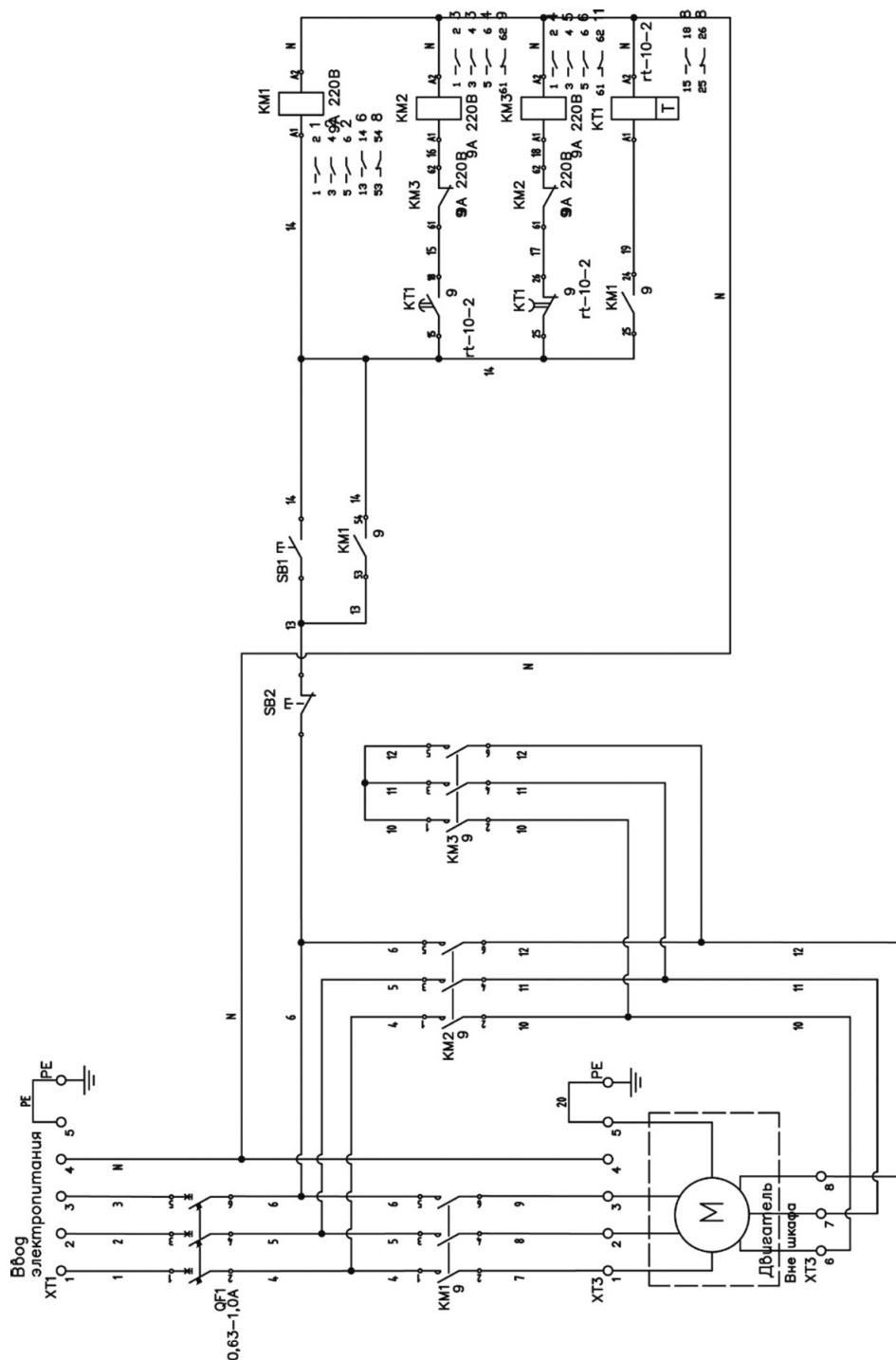


Рис. 19. Схема автоматизации пуск электропривода в режиме звезда и треугольник

**Состав элементов схемы автоматизации пуск электропривода  
в режиме звезда и треугольник**

№	Позиционные обозначения	Описание	Каталожный номер ЕКФ	Количество, ед.
1	QF1	Автомат пуска двигателя АПД-32 0, 63-1, 0А ЕКФ PROxima	apd2-0.63-1.0	1
2	KM1, KM2, KM3	Контактор КМЭ малогабаритный 9А 220В 1NO ЕКФ PROxima	ctr-s-9-220	3
3	KM1, KM2, KM3	Приставка контактная ПКЭ-11 NO+NC ЕКФ PROxima	ctr-sc-23	3
4	KT1	Реле времени (10 устанавл. функц.) RT-10-2 ЕКФ PROxima	rt-10-2	1
56	SB1	Кнопка ВА31 зеленая NO ЕКФ PROxima	xb2-ba31	1
7	SB2	Кнопка ВА42 красная NC ЕКФ PROxima	xb2-ba42	1
8	XT3	Колодка клеммная ЕК-2, 5/25 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-2.5/25	1
9	XT1	Колодка клеммная ЕК-4/32 JXB земля (аналог БЗН) ЕКФ PROxima	plc-ek-4/32	1
10	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.4/35gy	6
11	XT3	Колодка клеммная JXB-2.5/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.5/35b	1
12	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 синяя ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35b	1
13	XT1	Колодка клеммная JXB-4/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-4/35gy	3

У таких двигателей на шильдике должно быть указано «Δ/Υ 380/660 В» либо «Δ/Υ 220/380 В». Если на период пуска обмотку статора переключить на схему «звезда», а питающее напряжение оставить тем же, что и при схеме «треугольник», то напряжение на фазу уменьшится в 1,73 раза.

После разгона двигателя происходит подключение обмотки статора по схеме «треугольник». Линейный ток при соединении «треугольником» больше в 3 раза линейного тока при соединении «звездой».

Данный способ запуска асинхронного двигателя применяется в тех случаях, когда присутствует небольшая нагрузка, либо двигатель работает на холостом ходу.

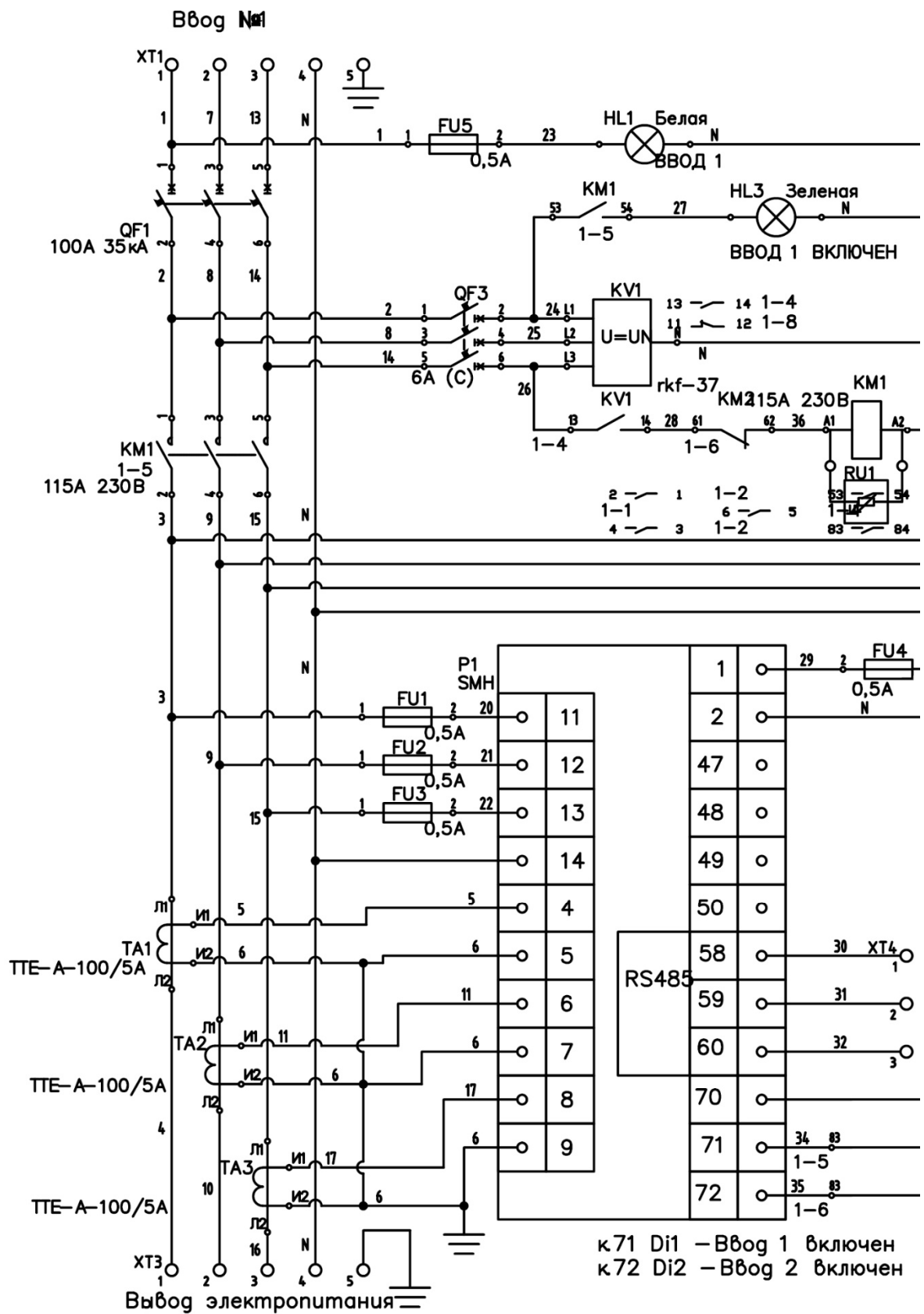
Это связано с тем, что при уменьшении фазного напряжения в 1,73 раза, согласно выражению для пускового момента, момент уменьшается в три раза, а этого недостаточно, чтобы совершить пуск с нагрузкой на валу.

### **Контрольные вопросы и задания**

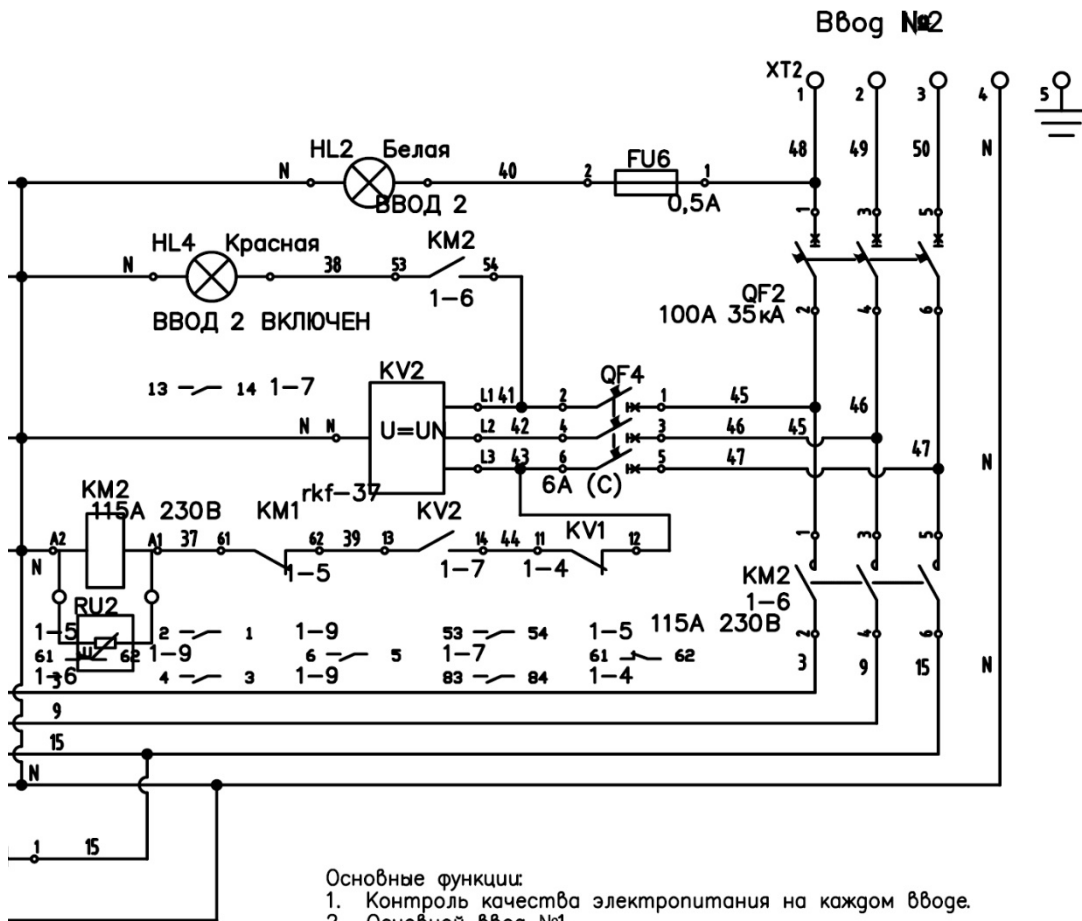
1. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе эксплуатации электропривода в режиме «звезда»?
2. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе эксплуатации электропривода в режиме «треугольник»?
3. Покажите нормально замкнутые контакты.
4. Покажите нормально разомкнутые контакты.
5. Какими достоинствами и недостатками обладает приведённая схема?

#### **4.7. Схема на контакторах «щит аварийного переключения ЩАП20 для двух вводов»**

Для обеспечения электропитания двигателя по I категории при наличии двух вводов используется схема «щит аварийного переключения для двух вводов» (рис. 20, табл. 7).

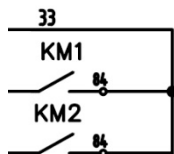


**Рис. 20. Схема автоматизации «щит аварийного переключения  
ЩАП20 для двух вводов»**



**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ  
ПРИБОР SMH  
С ЖК ДИСПЛЕЕМ**

**Канал передачи  
данных по  
интерфейсу  
RS485,  
протокол  
Modbus RTU**



Основные функции:

1. Контроль качества электропитания на каждом вводе.
2. Основной ввод №1.
3. Автоматическое переключение на ввод №2 при отклонении напряжения на вводе №1 от номинальных заданных значений.
4. Автоматическое переключение с резервного (ввод №2) на основной ввод (ввод №1) при восстановлении качества электропитания.
5. Электрическая и механическая блокировка контакторов от одновременного включения.
6. Световая сигнализация:
  - 6.1. Наличие напряжения на вводе №1 – HL1.
  - 6.2. Наличие напряжения на вводе №2 – HL2
  - 6.3. Электропитание по основному вводу (Ввод №1 включен) – HL3.
  - 6.4. Электропитание по резервному вводу (Ввод №2 включен) – HL4.
7. Измерение, индикация и передача параметров электрического тока на выходе схемы АВР с помощью многофункционального измерительного прибора SMH. Передаваемые параметры по Modbus RTU:
  - Среднеквадратичные значения тока и напряжения, частота, активная, реактивная и полная мощности, активная и реактивная энергии в прямом и обратном направлениях;
  - Коэффициенты мощности;
  - Усредненная активная и реактивная мощность;
  - Гармоники;
  - Коэффициент гармонических искажений;
  - Пиковые значения.
  - Состояние контакторов вводов.

**Состав элементов схемы автоматизации «щит аварийного  
переключения ЩАП20 для двух вводов»**

№	Позиционные обозначения	Описание	Каталожный номер ЕКФ	Количество, ед.
1	QF1 QF2	Выключатель автоматический ВА-99 160/100А 3Р 35кА ЕКФ PROxima	mccb99-160-100	2
2	QF3 QF4	Автоматический выключатель 3Р 6А (С) 6ка ВА 47-63 ЕКФ PROxima	mcb4763-6-3-06C-pro	2
3	KM1 KM2	Контактор КТЭ 115А 230В NO ЕКФ PROxima	ctr-b-115	2
4		Приставка контактная ПКЭ-22 2NO+2NC ЕКФ PROxima	ctr-sc-25	2
5		Устройство блокировочное КТЭ 115-150 ЕКФ	ctr-k-01	1
6	RU1, RU2	Варистор VDR-20D471 (S20K300), 470 В (300Vac/385Vdc), 250 Дж	VDR-20D471	2
7	P1	Многофункциональный измерительный прибор SMH с жидкокристаллическим дисплеем	sm-963h	1
8	TA1 TA2 TA3	Трансформатор тока ТТЕ-А-100/5А класс точности 0,5 ЕКФ PROxima	tte-a-100	3
9	KV1 KV2	Реле контроля фаз RKF-37 ЕКФ PROxima	rkf-37	2
10	FU1 FU2 FU3 FU4 FU5 FU6	Плавкая вставка цилиндрическая ПВЦ (10x38) 0,5А ЕКФ PROxima	pvc-10x38-0,5	6
11		Предохранитель-разъединитель для ПВЦ 10x38 1Р (с индикацией) ЕКФ PROxima	pr-10-38-1	6
12	HL3	Матрица светодиодная AD16-22HS зеленая ЕКФ PROxima	ledm-ad16-g	1
13	HL4	Матрица светодиодная AD16-22HS красный 230 В AC ЕКФ PROxima	ledm-ad16-r	1
14	HL1 HL2	Матрица светодиодная AD16-22HS белый 230 В AC ЕКФ PROxima	ledm-ad16-w	2
15	XT4	Колодка клеммная JXB-2.5/35 серая ЕКФ PROxima	plc-jxb-2.4/35gy	3

№	Позиционные обозначения	Описание	Каталожный номер ЕКФ	Количество, ед.
16		Заглушка для JXB-2,5/35 ЕКФ PROxima	sak-2.5-35	1
17	XT1 XT2 XT3	Клемма силовая вводная КСВ 16-50 синяя ЕКФ PROxima	plc-kvs-16-50-blue	3
18	XT1 XT2 XT3	Клемма силовая вводная КСВ 16-50 серая ЕКФ PROxima	plc-kvs-16-50-gray	9
19	XT1 XT2 XT3	Клемма силовая вводная КСВ 16-50 желто-зеленая ЕКФ PROxima	plc-kvs-16-50-y-green	3
20	–	Маркеры для JXB с нумерацией 1-10 (10 шт.) ЕКФ PROxima	dek-35-1-10	1
21	–	DIN-рейка перфорированная (800мм.) ЕКФ PROxima	adr-80	2
22	–	Канал кабельный перфорированный (ВхШ: 60х60мм.)	kk60-60	2
23	–	Щит с монтажной панелью ЩМПг-120.75.30 (ЩРМ-6) IP54 PROxima	mb24-6	1
24	–	Канал кабельный перфорированный (ВхШ: 60х40мм.)	kk60-40	1
25	–	Держатель для маркировки клеммных групп PROxima	ahdw-2-38	4
26	–	Зажим на DIN-рейку пластиковый 1 винт EW ЕКФ PROxima	ahdw-ew	10
27	–	Сальник PG42 IP54 (20 шт) d отв. 53 мм / d провод. 32-38 мм ЕКФ PROxima	plc-pg-42	3

### Основные функции

1. Контроль качества электропитания на каждом вводе.
2. Основной ввод №1.
3. Автоматическое переключение на ввод №2 при отклонении напряжения на вводе №1 от номинальных заданных значений.
4. Автоматическое переключение с резервного (ввод №2) на основной ввод (ввод №1) при восстановлении качества электропитания.
5. Электрическая и механическая блокировка контакторов от одновременного включения.
6. Световая сигнализация.
  - 6.1. Наличие напряжения на вводе №1 – HL1.
  - 6.2. Наличие напряжение на вводе №2 – HL2.

6.3. Электропитание по основному вводу (Ввод №1 включен) – HL3.

6.4. Электропитание по резервному вводу (Ввод №2 включен) – HL4.

7. Измерение, индикация и передача параметров электрического тока на выходе схемы АВР с помощью многофункционального измерительного прибора SMH. Передаваемые параметры по Modbus RTU.

7.1. Среднеквадратичные значения тока и напряжения, частота, активная, реактивная и полная мощности, активная и реактивная энергии в прямом и обратном направлениях;

7.2. Коэффициенты мощности;

7.3. Усредненная активная и реактивная мощность;

7.4. Гармоники;

7.5. Коэффициент гармонических искажений;

7.6. Пиковые значения.

7.7. Состояние контакторов вводов.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе эксплуатации электропривода в режиме «первый ввод»?

2. Как можно описать функционирование автоматизации схемы при процессе эксплуатации электропривода в режиме «первый ввод»?

3. Покажите нормально замкнутые контакты.

4. Покажите нормально разомкнутые контакты.

5. Какими достоинствами и недостатками обладает приведённая схема?

## **5. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

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

Эффективным использованием энергетических ресурсов называют достижение экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдении требований к охране окружающей природной

среды. Под повышением энергетической эффективности при эксплуатации электрических двигателей в дальнейшем будем понимать решение задач по снижению объемов потребляемой электрической энергии при сохранении выполнения задач, поставленных перед установкой, включающей рассматриваемый АД [9].

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

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

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

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

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

Соотношение потерь электрической энергии в АД различной мощности неодинаково. С увеличением мощности двигателя увеличиваются добавочные потери, растут потери на трение и вихревые токи. Потери в статоре уменьшаются (рис. 21).

Потери в двигателе на различных режимах его загрузки также различаются (рис. 22). С увеличением величины момента нагрузки на валу увеличиваются добавочные потери и Омические потери в обмотках статора.

Потери в сердечнике ротора, а также потери на трение и вихревые токи остаются практически неизменными при любой нагрузке АД. При нагрузке около 50% суммарные переменные потери электроэнергии становятся равны суммарным постоянным потерям двигателя.

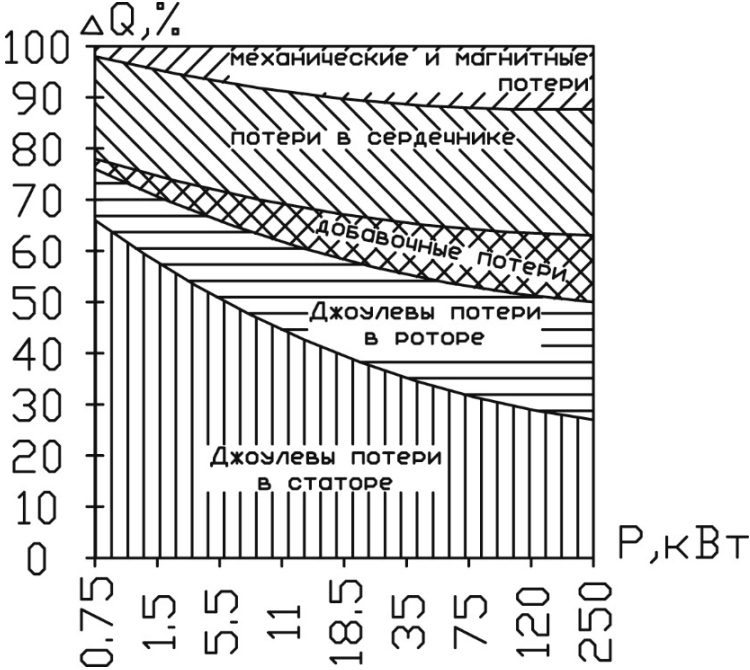


Рис. 21. Потери в асинхронных электрических машинах относительно их мощности

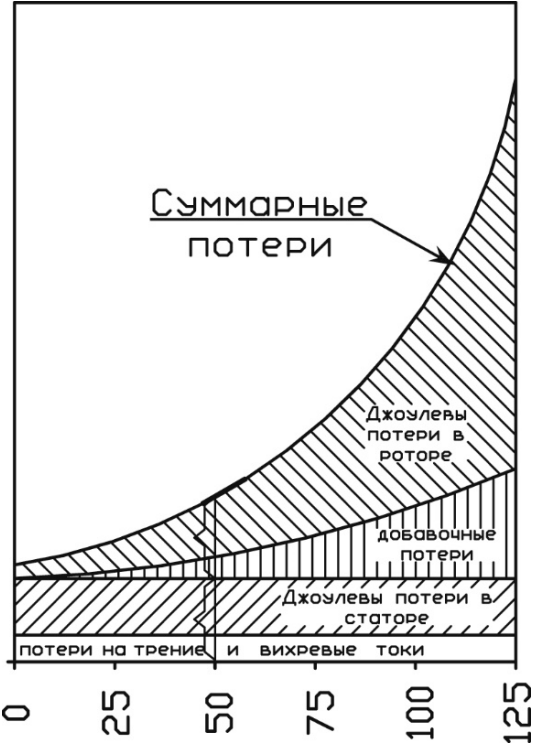


Рис. 22. Потери в асинхронных электрических машинах относительно их загрузки

Чем больше нагрузка двигателя, тем больше потери в обмотке статора, и тем сильнее греется корпус двигателя. Поэтому важно не производить дополнительную окраску кожухов электрических двигателей, поскольку дополнительный слой краски ухудшает отвод тепла.

Неоднократная дополнительная окраска корпусов электродвигателей приводит к их перегреву и ускоренному износу изоляции.

К настоящему моменту созданы и введены в действие ключевые стандарты, содержащие основные положения по тестированию энергоэффективности электрических приводов.

Стандарты, например, содержат технические инструкции по применению энергоэффективных двигателей с постоянной и регулируемой скоростью [10].

Отдельный стандарт устанавливает методы определения эффективности путём испытаний, а также определяет порядок метода расчёта удельных потерь [11] для всех двигателей постоянного тока, синхронных и асинхронных двигателей переменного тока всех габаритов [12].

Стандарт позволяет определить энергоэффективность системы на основании конкретных критериев, как, например, профиля скорости / нагрузки, профиля эксплуатации, типа и конструкции привода.

Устанавливает пределы максимальных потерь компонентов или общих потерь системы электропривода. Стандарт также описывает методологию определения потерь.

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

Используется стандарт [14], определяющий классы энергоэффективности для односкоростных электродвигателей переменного тока с прямым пуском.

Стандарт также приводит в соответствие различные классы эффективности (рис. 23), используемые в мире, и устанавливает уровни КПД для двигателей в сети 50 и 60 Гц числом полюсов от 2 до 8 и мощностями от 120 Вт до 1 МВт. Особенность стандарта состоит в отсутствии различий между технологиями изготовления электрических двигателей.

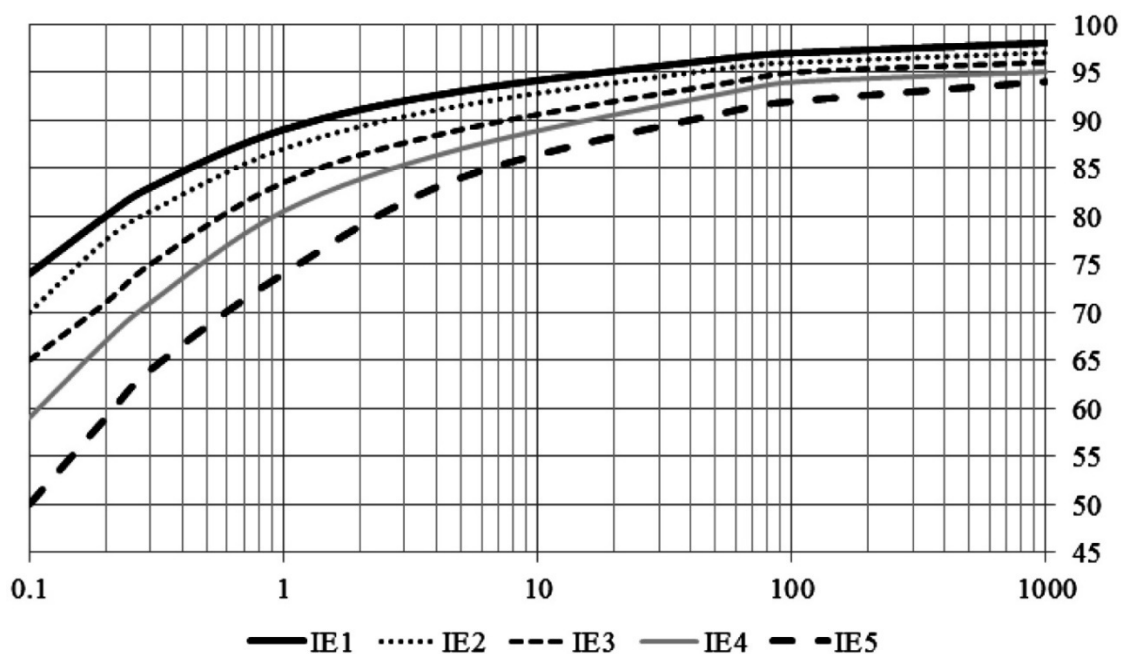


Рис. 23. Зависимость минимальных требований к КПД АД (%) от их электрической мощности (кВт)

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

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

- улучшение механического КПД конечного пользователя;
- снижение потерь при механической передаче путём качественной технической эксплуатации и своевременного выполнения регламентных работ;
- снижение потерь электрической энергии в распределительной сети путём целесообразного сокращения длин и увеличений сечения проводников;
- регулирование крутящего момента двигателя посредством использования устройств изменения частоты питания;
- улучшение таких показателей качества электрической энергии, как колебания напряжения, снижение фона высших гармоник тока и напряжения.

## Контрольные вопросы и задания

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

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Техническая информация Циркуляционные насосы типа ЦНЛ. URL: <http://www.agregat-nasos.spb.ru/teh21.shtml>
2. Насосы для химической промышленности ООО «ЭНЦЕ инжиниринг». URL: [http://www.ence-pumps.ru/vodokoltsevye\\_vakuumnye\\_nasosy.php#dry\\_vacuum\\_pumps\\_adj\\_pitch\\_params](http://www.ence-pumps.ru/vodokoltsevye_vakuumnye_nasosy.php#dry_vacuum_pumps_adj_pitch_params)
3. Продукция ООО «Лутос»: <http://www.lutos.cz/ПРОДУКТЫ.htm>
4. Дементьев, Ю.Н. Электрический привод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010.
5. Получение электрической энергии в системах тепло- и водоснабжения на основе рекуперации избыточного магистрального давления. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/1095-Poluchenie-elektricheskoy-energii-v-sistemah-teplo>
6. Технический каталог. Европейский рынок. Трёхфазные электродвигатели. URL: <http://en-res.ru/document/elektrodvigateli-weg-dokumentaciya.html>
7. Москаленко, В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко. – М.: Высшая школа, 1991.
8. Усольцев, А.А. Общая электротехника: учеб. пособие / А.А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.
9. Методические рекомендации по расчету эффектов от реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности / под ред. Е.Г. Гашо. – М.: Аналитический центр при правительстве Российской Федерации, 2016.
10. ГОСТ ИЕС/ТС 60034-31-2015 Машины электрические вращающиеся. Часть 31. Выбор энергоэффективных двигателей, включая приводы с регулирующей скоростью.
11. ГОСТ ИЕС 60034-2-1-2017 Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава).

12. ГОСТ IEC 60034-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики.

13. EN 50598-3 Экодизайн для систем силовых приводов, пускателей двигателей, силовой электроники и их приложений. Часть 3. Количественный подход к экологичности конструкций путем оценки жизненного цикла, включая правила категоризации продукции и содержание деклараций по защите окружающей среды.

14. ГОСТ IEC 60034-30-1-2016 «Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности асинхронных трёхфазных короткозамкнутых двигателей (IE-коды).

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

*Учебное издание*

**Гужов Сергей Вадимович**

**МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ**

Учебное пособие

Редактор С.В. Казакова  
Компьютерная верстка О.А. Копыловой

---

Подписано в печать	18.10.24.	Печать ризография	Формат 60x84 1/16
Печ. л. 3,25.	Тираж 70 экз.	Изд. № 24у-117	Заказ №

---

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

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**