С. А. Юсупова Т.О. Чигамбаев

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Алматы, 2019.

УДК 621. 28(31)
ББК 32.844я73
Д 31
Юсупова С.А Чигамбаев Т.О. Системы автоматизированного электропривода. Учебное пособие. – Алматы: , 2019 – 157 с.
Ил. 137. Табл. 8. Библиогр. – 24 назв.
ISBN 9965–758–22–0

Учебное пособие соответствует программе курса «Системы автоматизированного электропривода» для специальности Приборостроение». Учебное пособие. Оно стоит из трех разделов. В первом разделе рассмотрены устройство, принцип действия, статические характеристики и динамические свойства основных элементов электропривода. Во втором разделе рассмотрены статические характеристики и динамические свойства, методики оптимальной настройки регуляторов. В третьем разделе рассмотрены системы автоматизированного электропривода производственных механизмов: сделан анализ их работы, дана сравнительная оценка различных типов с учетом специфики работы производственных механизмов.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности «Приборостроение». Оно может быть полезным и другим специальностям, где изучается автоматизированный электропривод, а также специалистам по проектированию и эксплуатации систем электроприводов.

УДК 621. 28(31)
ББК 32.844я73
Рецензенты:
1. Е.Х. Абен, зав.каф. «Информационно – технического обеспечения ОВД», к.т.н, доцент.
2. С. С. Усупов, д-р техн.наук,проф., зав.каф «Механизация и автоматизация производственных процессов» АТУ.
3. М.А. Джаманбаев к.т.н., ассоциированный профессор кафедры «Механизация и автоматизация производственных процессов» АТУ.

Ä $\frac{2001000000}{00(05)-05}$

© , 2019

ВВЕДЕНИЕ

Развитие регулируемого электропривода неразрывно связано с развитием, различных отраслей народного хозяйства, с большими достижениями в области силовой преобразовательной техники и др. Достижения в области электроники нашли свое отражение в средствах защиты, контроля и управления систем электропривода и электроснабжения. Отечественной электротехнической промышленностью и рядом зарубежных фирм разработаны коммутационные аппараты нового поколения, комплектные распределительные устройства на напряжение свыше 1000 В и ниже 1000 В с системами защит, базирующихся на микропроцессорной технике. Создание силовых полностью управляемых полупроводниковых приборов позволило осуществить преобразование электрической энергии в формах, наиболее удобных для электропривода, что открыло широкие возможности для создания технически современных регулируемых электроприводов. Использование достижений микропроцессорной техники принципиально изменило элементную базу и функциональные возможности систем управления электроприводами.

Другой особенностью является повышение требований к характеристикам регулируемого электропривода, усложнение и расширение его функций, связанных с управлением технологическим процессом, и соответствующее возрастание сложности систем управления.

Автоматизированный электропривод практически уже давно оформился в самостоятельную отрасль, как в научном, так и в техническом отношениях. Он возник на стыке нескольких научных дисциплин - механики, электротехники, электроники, теории автоматического регулирования, вобрав в себя их методы и синтезировав собственную методологию как исследования, так и решения практических задач.

Материал учебного пособия представлен тремя разделами. В первой части учебного пособия рассмотрены устройство, принцип действия и механические характеристики электродвигателей. Рассмотрены так же устройства и характеристики различных типов датчиков и регуляторов.

Во втором разделе рассмотрены системы электропривода. Основное внимание уделено наиболее сложным и совершенным системам: ТП-Д, ТПЧ-АД и электроприводу с вентильным двигателем.

Статические характеристики и динамические свойства иллюстрированы графическим материалом.

Третий раздел посвящен автоматизированному электроприводу промышленных установок, используемых в различных областях народного хозяйства.

Значительное внимание при изложении материала книги уделено рушению практических задач, связанных с расчетом и построением механических характеристик, с разработкой и проектированием систем автоматического регулирования.

1. ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Электроприводом называется электромеханическая система (рисунок 1.1), включающая (в общем случае) электродвигатель Д, преобразователь П, и систему регулирования (датчики и регуляторы). Основное требование к электроприводу – обеспечение работы машин или механизмов наилучшим образом. При создании таких систем в первую очередь учитываются многие факторы: назначение, характер работы, условия электроснабжения, статические характеристики и динамические свойства элементов рабочего механизма и элементов электропривода. Создание систем электропривода, отвечающих требованиям рабочих механизмов достигается путем коррекции как статических характеристик и динамических свойств основных элементов электропривода, так и введением новых корректирующих устройств с требуемыми свойствами.

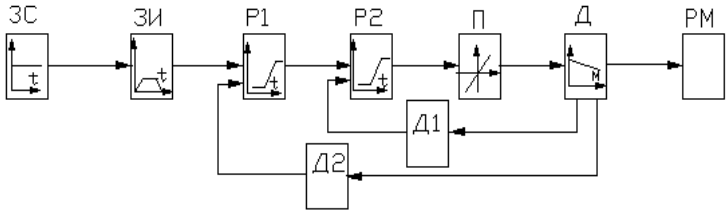


Рисунок 1.1 Функциональная схема электропривода

1.1 Машины постоянного тока

1.1.1 Устройство и принцип действия машин постоянного тока

Машины постоянного тока (рисунок 1.2), [5] как генераторы, так и двигатели, устроены одинаково. Их основными частями являются статор (станина с главными 5 и добавочными полюсами) и якорь. На главных полюсах расположена обмотка возбуждения 6. Чтобы уменьшить потери от вихревых токов, главные полюсы изготавливают из листов электротехнической стали. На сердечниках главных полюсов размещена обмотка возбуждения, представляющая собой катушки с медными изолированными проводами круглой или прямоугольной формы.

Якорь 3 представляет собой цилиндр, вращающийся в пространстве между полюсами. Он состоит из зубчатого сердечника, уложенной на нем обмотки якоря, коллектора 2 и щеточного аппарата (на схеме не показан).

Выводы секций обмотки якоря соединены с коллекторными пластинами.

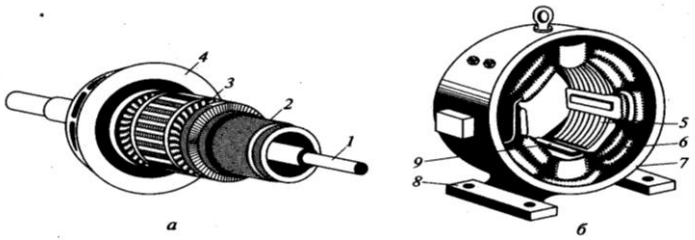


Рисунок 1.2 Машина постоянного тока: 1 – вал; 2 - коллектор; 3 - якорь; 4 - передний подшипниковый щит; 5 – главные полюсы; 6 – обмотка возбуждения; 7 - станина; 8 – лапа; 9 – дополнительный полюс

Подключение якорной цепи двигателя постоянного тока к источнику питания осуществляется посредством щеток, расположенных в щеткодержателях, способных перемещать щетки по окружности

Коллектор (рисунок 1.3) собирают из отдельных медных пластин 8 трапецеидального сечения (ламелей), изолированных друг от друга прокладками из твердого миканита. После сборки с помощью нажимного фланца 6, «ласточкина хвоста» 7 и шпильки 5 пластины коллектора закрепляются на стальной втулке 3, от которой они изолируются специальными манжетами 2 из формовочного миканита. Стальная втулка насаживается на вал 4. Чтобы не вызывать вибрацию щеток, коллектор должен иметь строго цилиндрическую форму, а миканитовые прокладки, устанавливаемые между пластинами, не должны выступать. Поэтому прокладки между пластинами коллектора профрезеровывают на 0,8 — 1,5 мм ниже поверхности коллектора. Секции обмотки якоря впаиваются в прорези, имеющиеся в выступающей части коллекторных пластин 1. Эти части пластин называются «петушками». Щетки изготовляют в виде прямоугольных брусков 4 (рисунок 1.4), помещенных в обойму 3 щеткодержателя. Для улучшения контакта коллектора с внешней цепью, щетки прижимаются к поверхности коллектора пружинами 2, имеющими щеточные канатники 1.

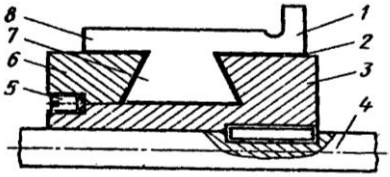


Рисунок 1.3

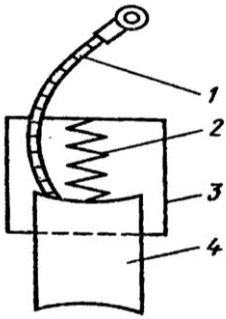
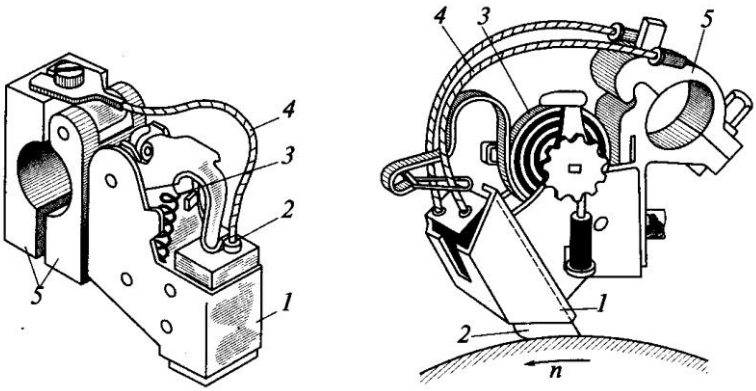


Рисунок 1.4

Наибольшее распространение получили два типа щеткодержателей (рисунок 1.4): с вертикальным (а) и горизонтальным (б) расположением щеток.



а б

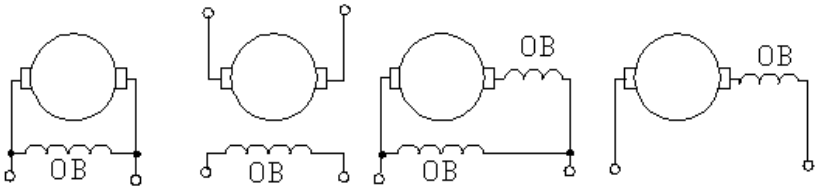
Рисунок 1.5 Расположение щеток в щеткодержателях: а – радиальное; б – наклонное.

Траверсу можно поворачивать и, следовательно, изменять положение щеток по отношению к полюсам машины. Коллектор можно рассматривать в качестве преобразователя частоты, связывающего сеть постоянного тока с обмоткой якоря, через которую проходит переменный ток.

На главных полюсах размещаются обмотки возбуждения. В зависимости от способа включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря машины постоянного тока могут иметь независимое,

параллельное, последовательное и смешанное возбуждение.

Графическое изображение машин постоянного тока с различным способом включения обмоток возбуждения показано на рисунке 1.6



а б в г

Рисунок 1.6 Способы включения обмоток возбуждения:
а–параллельное; б–независимое; в – смешанное, г - последовательное

Машина постоянного тока обратима. При наличии тока в обмотке возбуждения и вращении якоря она преобразует механическую энергию в электрическую, т.е. работает генератором. При подведении напряжения к якорной цепи взаимодействие тока якоря с магнитным потоком, создаваемым обмоткой возбуждения, образуется вращающий момент, и электрическая машина преобразует электрическую энергию в механическую, т.е. работает двигателем. Для оценки электромеханических свойств двигателей при работе в двигательном и тормозном режимах используют механические и электромеханические характеристики.

1.1.2 Электромеханические свойства двигателей постоянного тока[2]

При работе электрической машины в двигательном режиме аналитические выражения характеристик двигателя могут быть получены из уравнения равновесия напряжений в якорной цепи.

$$Ud - I_я R - E = 0 \qquad (1.1)$$

где $I_я$ – ток в якорной цепи;

$R = R_я + R_{ко} + R_{дп}$ - суммарное сопротивление якорной цепи;

$E = c\Phi\omega$ -ЭДС двигателя.

Подставляя значение E в уравнение (1.1) и решая его относительно угловой скорости ω, получим аналитическое выражение зависимости угловой скорости от величины тока якоря

$$\omega = \frac{U_d}{k\phi} - \frac{R}{k\phi} I \ . \qquad (1.2)$$

Эта зависимость называется электромеханической характеристикой.

Для получения аналитического выражения ω=f(м) (механической характеристики) воспользуемся зависимостью момента М от тока I и магнитного потока Ф.

$$M = k\Phi I \qquad (1.3)$$

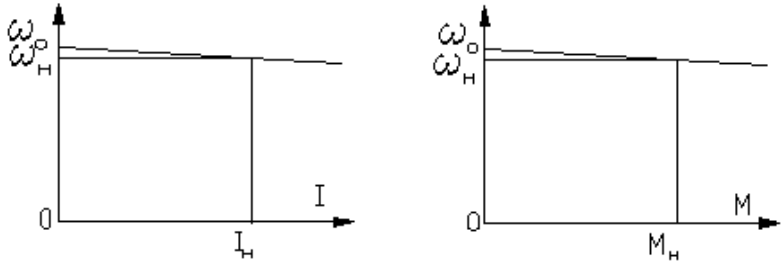
Подставляя значение тока из уравнения (1.3) в уравнение (1.2), получим уравнение механической характеристики

$$\omega = \frac{U_d}{k\phi} - \frac{R}{k^2 \ \phi^2} M \ .$$

(1.4)

Построенные по уравнениям (1.2) и (1.4) характеристики двигателя имеют вид, приведенный на рисунке 1.7.

Характеристики двигателей подразделяются на естественные и искусственные. Характебристики, полученные при номинальном напряжении на обмотке якоря ($U = U_н$), номинальном магнитном потоке ($Ф = Ф_н$) и при отсутствии дополнительных резисторов в якорной цепи, называются естественными.



а б

Рисунок 1.7 Характеристики двигателя постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением: а- электромеханическая, б – механическая характеристики

При изменении любого из параметров в уравнениях (1.2) и (1.4) характеристики двигателя будут отличаться от естественной. Это свойство

двигателей постоянного тока используют для искусственного получения требуемых характеристик и регулирования частоты их вращения.

Различают три способа регулирования частоты вращения двигателей:

- изменением напряжения, подводимого к якорной цепи;
- изменением магнитного потока основных полюсов;
- введением в цепь якоря дополнительного резистора (реостатный способ).

Для оценки эффективности различных способов регулирования частоты вращения всех типов электрических двигателей используют несколько общих показателей: диапазон, плавность, направление и экономичность регулирования.

Диапазон регулирования. Отношение максимальной скорости к минимальной ($D = \omega_{мах} / \omega_{мин}$) при номинальном значении момента статической нагрузки и заданной перегрузочной способности принято называть диапазоном регулирования. Определение диапазона регулирования поясняется механическими характеристиками, приведенными на рисунке 1.8,а.

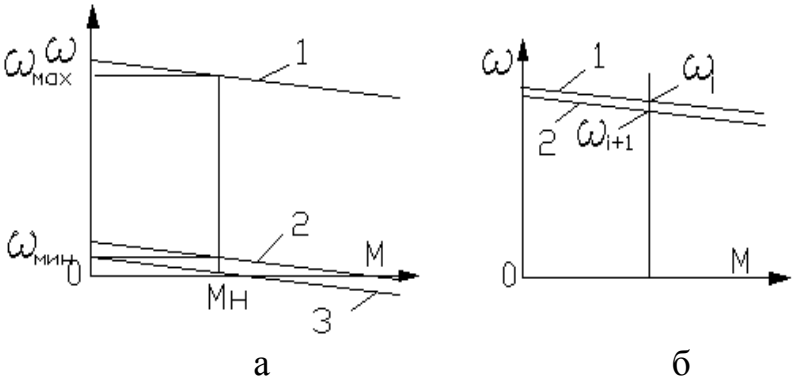


Рисунок 1.8 Иллюстрация показателей регулирования частоты вращения: а – диапазона регулирования; б - плавности регулирования

Максимальная частота вращения двигателя $\omega_{мах}$ принимается на характеристике 1, ограничивающей сверху диапазон регулирования, при $M = M_н$. Диапазон регулирования снизу ограничивает характеристика, на которой обеспечивается заданная перегрузочная способность ($K_м = M_{мах}/M_н$). При заданной величине $M_{мах} = 2M_н$ минимальная частота вращения $\omega_{мин}$ находится на характеристике 2. Все характеристики, расположенные ниже этой, не обеспечивают заданной перегрузочной способности двигателя.

Принято диапазон регулирования частоты вращения выражать в виде отношения, например 5: 1, 80 : 1 и др.

Плавность регулирования. Плавность регулирования частоты вращения двигателей оценивается коэффициентом плавности $К_{пл}, = \omega_{i+1} / \omega_i$, представляющим собой отношение угловых скоростей на двух соседних искусственных механических характеристиках (рисунок 1.8,б), где

$\Delta\omega = (\omega_i - \omega_{i+1})$ – минимальная ступень изменения частоты вращения двигателя, в пределах которой ω не регулируется. Чем ближе $К_{пл}$ к 1, тем выше плавность регулирования и качество системы электропривода.

Направление регулирования. Различают направление регулирования «Вверх» и «Вниз» от основной характеристики. Регулирование только в «Вверх» или «Ввниз» называется одно зонным регулированием. При двухзонном регулировании частота вращения двигателя регулируется как «Вверх», так и «Вниз» от номинальной угловой скорости.

Экономичность регулирования. Этот показатель определяется затратами на создание системы электропривода и на поддержание ее в работоспособном состоянии в течении всего периода эксплуатации.

Основными составляющими эксплуатационных расходов являются стоимость потерь электроэнергии при регулировании и дополнительные затраты на приобретение оборудования. Перечисленные показатели в основном используются при сравнительной оценки различных способов регулирования частоты вращения всех типов двигателей.

1.1.3 Способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока

Из уравнений (1.2) и (1,4) следует, что искусственные характеристики двигателя постоянного тока можно получать путем изменения трех параметров: напряжения U, подводимого к якорю, магнитного потока Ф и сопротивления якорной цепи $R_{яц}$ (путем введения в якорную цепь дополнительного резистора)

В зависимости от параметра, используемого для регулирования частоты вращения двигателя, различают три способа: изменением напряжения на якоре, изменением магнитного потока и введением в цепь якоря дополнительных резисторов (реостатный способ). Примем, что при регулировании скорости изменением одного из параметров, другие параметры остаются неизменными.

Регулирование частоты вращения двигателя ω *изменением напряжения на якоре.* $U = Var$ $Ф=const$, $R_{доп.}$ - 0.

Характеристики (1.2) и (1.4) линейны и для их построения достаточно иметь две точки. В качестве этих точек обычно принимают

1. $\omega = \omega_0$; I = 0. 2. $\omega = \omega_н$; I = $I_н$

для построения электромеханической характеристики.

1. $\omega = \omega_0$; M = 0. 2. $\omega = \omega_н$; M = $M_н$

для построения механической характеристики.

При идеальном холостом ходе (M = 0) угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = U/ k\Phi_н. \qquad (1.5)$$

Из (1.5) следует, что частота вращения и напряжение на якоре находятся в прямой зависимости. Т.е. частота вращения двигателя будет изменяться так же, как напряжение на якоре.

Величину $k\Phi_н$ определяется из выражения

$$k\Phi_н = (U_н - R_я I_н)/ \omega_н. \qquad (1.6)$$

Величины $U_н$, $I_н$, $n_н$, $\eta_н$ и $R_я$ приводятся в каталожных данных двигателей. Другие параметры, отсутствующие в справочной литературе на двигатели, определяют из выражений

$$R_я = 0{,}5\,(1-\eta_н)\frac{U_н}{I_н}.\ \text{Ом}, \qquad (1.7)$$

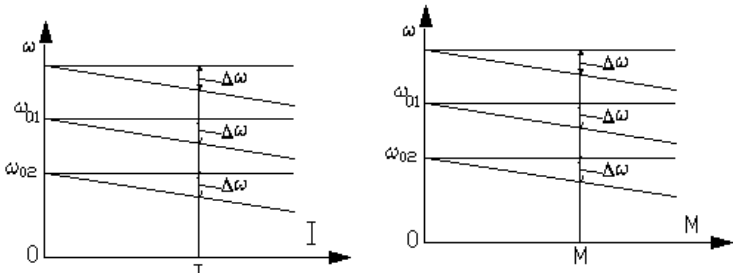
$$\omega_н = \pi\ n_н/30,\ \text{рад/с}, \qquad (1.8)$$

$$M_н = 9550\ P_н/ n_н.\ \text{Н·м}. \qquad (1.9)$$

Величина падения частоты вращения при изменении нагрузки от 0 до $I_н$ или $M_н$

$$\Delta\omega = R\ I_н/ k\Phi_н \text{ и } \Delta\omega = R\ M_н/ k\Phi_н$$

не зависит от величины напряжения, подводимого к якорю (при постоянном магнитном потоке). Поэтому все характеристики, полученные при различных величинах напряжения на якоре, имеют одинаковый наклон (рисунок 1.9).



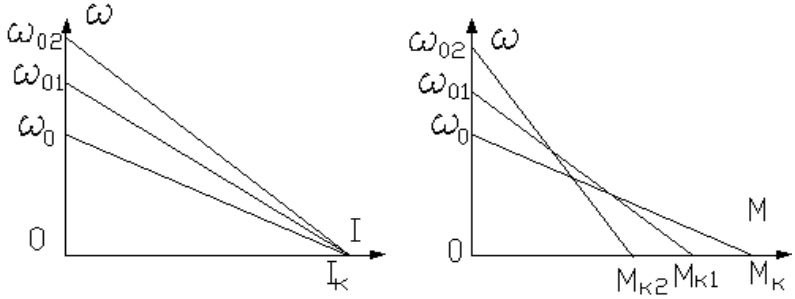
а б

Рисунок 1.9 Характеристики двигателя при регулировании напряжением на якоре: а – электромеханические; б – механические

Регулирование частоты вращения двигателя изменением магнитного потока. Для оценки этого способа регулирования снова обратимся к уравнениям (1.2) и (1.4). Т.е. и при этом способе регулирования характеристики двигателя также линейны и для их построения достаточно, иметь две определенные координаты: 1. ω_0 = U/kФ; I= 0; 2. ω =0; I=$I_к$. (для электромеханической характеристики) и 1. ω_0 = U/ kФ; M = 0; 2. ω =0; M=$M_к$. (для механической характеристики).

Из уравнения ω_0 = U/kФ следует, что изменением магнитного потока можно реализовать двух зонное регулирование: при Ф $\rhd$ $Ф_н$ частота вращения будет регулироваться «Вниз» и наоборот. Однако частоту вращения «Вниз» изменением магнитного потока не регулируют по двум причинам: 1) при номинальном токе возбуждения магнитный поток находится на кривой намагничивания в области насыщения; 2) обмотка возбуждения рассчитывается на номинальный ток возбуждения. Даже при кратковременной перегрузке по току перегрев обмотки может привести к повреждению ее изоляции. Поэтому частоту вращения двигателя регулируют только ослаблением магнитного потока, т.е. «Вверх» от номинальной частоты. В тех случаях, когда необходимо двух зонное регулирование, используют два способа: изменением напряжения на якоре и ослаблением магнитного потока.

Характеристики двигателя, полученные при ослаблении магнитного потока, приведены на рисунке 1.10



а б

Рисунок 1.10 Характеристики двигателя: а – Электромеханическая; б - механическая

Из электромеханических характеристик (рисунок 1.10, а) следует: 1) величина тока короткого замыкания $I_к$ определяется только величиной напряжения на якоре и сопротивлением якорной цепи; 2) угловую скорость ослаблением поля можно повышать при любой нагрузке. Механические характеристики (рисунок 1.10, б) показывает, что повышение частоты

вращения при ослаблении магнитного тока происходит только на холостом ходу и при малых нагрузках (до 15%). Достоинством этого способа является простота реализации и возможность организовать двух зонное регулирование частоты вращения. Широкое применение этот способ находит в электроприводе механизмов с повторно кратковременным режимом работы. Здесь имеется большое количество интервалов работы двигателя на холостом ходу и при малых нагрузках.

В приводе спускоподъемных агрегатов буровых установок ослаблением магнитного потока достигается работа с постоянной мощностью, т.е. более полное использование мощности двигателей.

Реостатное регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока с независимым возбуждением ввиду его множества недостатков не находит широкого практического применения. Основная область применения этого способа – машины и механизмы, получающие питание от нерегулируемых источников постоянного тока: рудничные электровозы, трамваи и троллейбусы.

1.1.4 Способы торможения двигателей постоянного тока

Электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения имеют три способа электрического торможения: рекуперативное, динамическое, противовключением.

При любом из перечисленных способов торможения электрическая машина работает в генераторном режиме. Переключение машины постоянного тока из двигательного режима в режим динамического торможения, поясняется схемой и характеристиками, приведенными на рисунках 1.11.

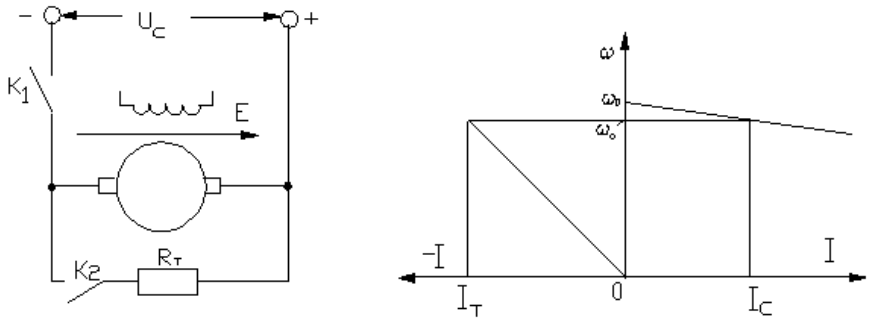


Рисунок 1.11 Динамическое торможение: а – электрическая схема; б - характеристики

Исходное состояние схемы: ключ K_1 замкнут, ключ K_2 разомкнут. Машина работает в двигательном режиме с током нагрузки I_c и частотой

вращения ω_c. До переключения ток нагрузки определяется выражением

$$I_c = \frac{U - E}{R + R_t}, \qquad (1.10)$$

После перевода двигателя в режим динамического торможения (размыканием ключа K_1 и замыканием ключа K_2) ток в якорной цепи изменяет направление

$$I_т = \frac{-E}{R + R_T}, \qquad (1.11)$$

где $E = k\Phi\omega_c$, $R_т$ - сопротивление дополнительного резистора, подключенного к двигателю. Подставив значение E в уравнение (1.11) и решив его относительно ω, получим

$$\omega = -\frac{R + R_T}{k\Phi} I \qquad (1.12)$$

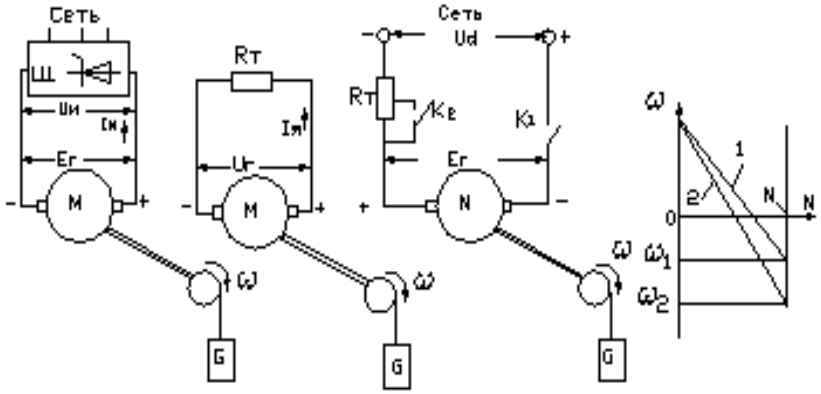
Зависимость частоты вращения ω от тока якоря I, представленная выражением (1.12), является электромеханической характеристикой двигателя в режиме динамического торможения. Характеристику $\omega = f(M)$ получим, подставив значение тока $I = M/k\Phi$ в уравнение (1.12).

$$\omega = -\frac{R + R_T}{k^2\Phi^2} M . \qquad (1.13)$$

Уменьшение тормозного момента по мере снижения частоты вращения является основным недостатком этого способа.

Для иллюстрации и сравнительной оценки различных способов торможения воспользуемся основным механизмом установки глубокого бурения- спускоподъемным агрегатом. Этот агрегат основное время работает в тормозном режиме. Тля создания тормозного момента в период опускания груза могут быть использованы все три способа торможения

Схемы, обеспечивающие электрическое торможение при работе на опускание груза (колонны труб и др.) приведены на рисунке 1.12.



а б в г

Рисунок 1. 12 К пояснению режимов торможения: а–рекуперативного, б – динамического; в – противовключением, г-характеристики двигателя при торможении противовключением

В схеме на рисунке 1.12,а тиристорный преобразователь (ТП) работает в инверторном режиме и ток в цепи якоря, создающий тормозной момент, определяется выражением

$$I_и = (U_г - U_и)/R_э, \qquad (1.14)$$

где $U_и$ – выходное напряжение ТП, работаюего в инверторном режиме; $R_э = R_т + R_я$ - сопротивление силовой цепи.

Создаваемый током инвертора $I_и$ тормозной момент $M_т$ можно изменять регулированием напряжения инвертора в широких пределах и плавно регулировать скорость опускания груза. Из рассмотренного следует, что применение регулируемого источника питания, способного работать в инвертором, ведомым сетью, позволяет реализовать торможение с передачей энергии в сеть в широком диапазоне частоты вращения двигателя.

В схеме, приведенной на рисунке 1.12,б, после растормаживания механизма генератор под действием груза будет вращаться в сторону его опускания с нарастающей частотой. С таким же темпом будет возрастать ток генератора $I_г = U_г/R$, и тормозной момент $M_т = k\Phi I_г$.,. После достижения $M_т$ величины момента, $M_G = r_б G$ груз будет опускаться с постоянной скоростью. Очевидно, что с увеличением сопротивления резистора $R_т$ тормозной момент будет уменьшаться, равенство $M_G = r_б G$ будет наступать при большей скорости, т.е. возрастет скорость опускания груза. В настоящее время

существуют устройства на полупролводниковых приборах, обеспечивающие плавное регулирование величины сопротивления якорной цепи генератора. Рассмотренный способ относится к динамическому торможению, при котором энергия, вырабатываемая генератором, расходуется в тормозном резисторе и в обмотках якоря.

Процесс торможения противовключением реализуется в схеме на рисунке 1.12,в. При питании двигателей постоянного тока от нерегулируемого источника на период пуска и при необходимости регулировать частоту вращения под нагрузкой в якорную цепь включают реостаты (реостатный способ регулирования). При этом способе жесткость (наклон) характеристик и величина пускового момента зависят от величины сопротивления дополнительного резистора, включенного в якорную цепь. На рисунке 1.12.г показаны две характеристики 1- при замкнутом ключе $К_2$ и 2 – при разомкнутом ключе.

Если включить электрическую машину на подъем тяжелого груза, создаваемый момент которого будет превышать пусковой момент двигателя, то под его действием двигатель будет вращаться с возрастающей скоростью в противоположную сторону до установления равновесия $М_т = М_г$. В этом случае величина тока якоря будут определяться выражениям

$$I = (U_г + U_п)/(R_т + R_г) \qquad (1.15)$$

При работе на характеристике 1 в установившемся режиме вращение двигателя, работающего в генераторном режиме, будет происходить с частотой вращения ω_1. Очевидно что, если перевести двигатель на характеристику 2 размыканием ключа $К_2$, то равенство моментов $М_т = М_г$ наступит при частоте вращения двигателя ω_2 и опускание груза будет происходить с большей скоростью, чем при работе на характеристике 1. Плавность опускания груза будет зависеть от плавности регулирования величины сопротивления резистора $R_т$.

Недостатком этого сособа торможения является большой расход электроэнергии. В процессе торможения на дополнительном резисторе $R_т$., имеющим значительно большую величину сопротивления, чем при динамическом торможении. расходуется энергия генератора и сети.

Пример 1.1. Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения рассчитать и построить характеристики ω=f(I), ω=f(M): 1) естественные; 2) искусственные при $U=0,7U_н$; $U = 0,5U_н$; 3) при ослабленном магнитном потоке $Ф=0,5\ Ф_н$.: Пспортные данные двигателя: $P_н$ = 35 кВт; $U_н$ = 220 В; $I_н$ = 185 А; $n_н$ = 575 об/мин.

$$\eta_н = 1000\ P_н/ U_н\ I_н = 1000\cdot 35/220\cdot 185= 0,86,.$$

$R_я = 0,5(1-0,86)U_н./185 = 0,0835$ Ом,

$M_н = 9550 \cdot P_н / n_н = 9550 \cdot 35/575 = 585$ Н·м (59,63 кГ·м),

$$КФ_н = \frac{U_н - I_н R_z}{n_н} = \frac{220 - 185 \bullet 0,0835}{575} = 0,36$$

$0,5\ КФ_н = 0,18.$

$n_0 = U_н / КФ_н = 220/0,36 = 611$ об/мин.,

$n_0^{!} = 0,75\ U_н / КФ_н = 458$ об/мин.,

$n_0^{!!} = 0,5\ U_н / КФ_н = 305$ об/мин.,

$I_г = U_н / R_я = 220/0,0835 = 2634$ А

$M_к = КФ_н\ I_г = 0,36 \cdot 2634 = 948$ кГ·м (9302 Н·м)

$n_j^{!} = U_н / 0,5 \cdot КФ_н = 220/0,18 = 1222$ об/мин,

Характеристики, построенные по данным расчетов приведены на рисунка 1.13 и 1.14

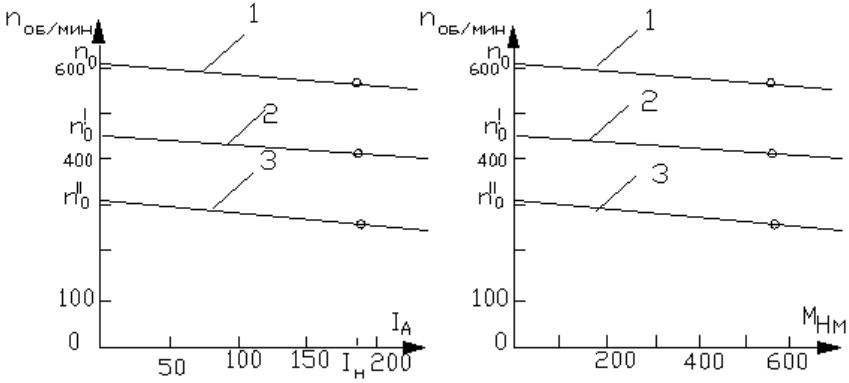
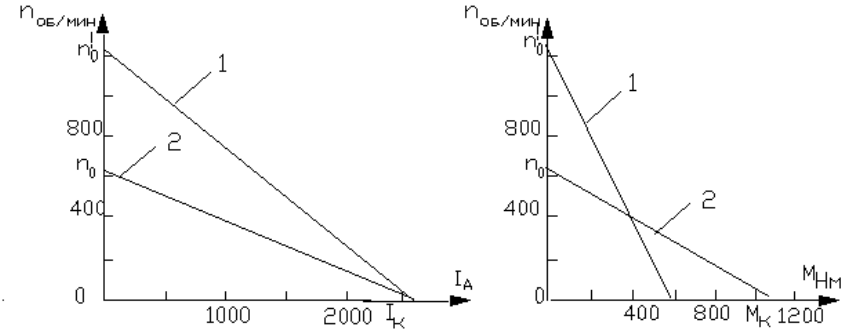


Рисунок 1.13 Характеристики двигателя: а- электромеханические (1-естественная; 2,3 – при пониженном напряжении);б – механические (1 естественная, 2,3 – при пониженном напряжении).



а б

Рисунок 1.14 Характеристики двигателя: а – Электромеханические (1 - при Ф =0,5$Ф_н$), 2 - есткственная); б- механические характеристики – при Ф =0,5$Ф_н$, 2 – естественная)

1.2 Асинхронные двигатели

1.2.1 Устройство и принцип действия

Асинхронные двигатели, также как и двигатели постоянного тока, состоят из неподвижной части, называемой статором, и вращающейся части, называемой ротором.

Асинхронные двигатели выпускаются двух типов, отличающихся конструкцией ротора. На рисунке 1.15 показана конструктивная схема поперечного разреза асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.. Его статор состоит из станины 1, сердечника 2 и обмотки статора 3. Сердечник ротора 4 запрессован на вал 5. На выходные концы вала насажены подшипники 6, установленные в подшипниковом щите 7.

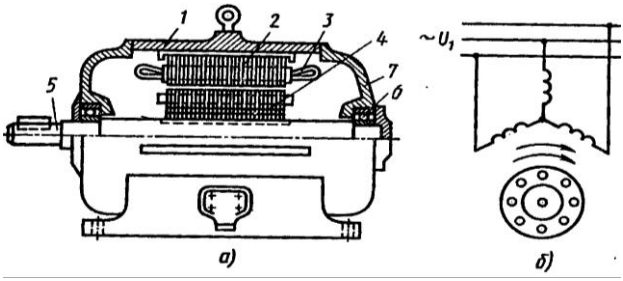
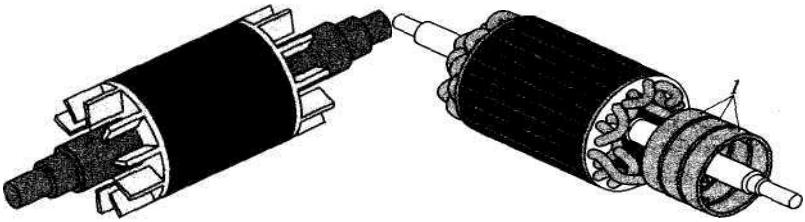


Рисунок 1.15 Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором:

а – поперечный разрез; б – схема включения

Сердечник статора представляет собой полый цилиндр с пазами на внутренней поверхности. В пазы уложены три фазные обмотки 2 (рисунок 1,15,а), сдвинутые друг относительно друга на 120^0.

Обмотка ротора бывает двух типов: короткозамкнутая типа беличьей клетки (рисунок 1.16, а) и фазная (рисунок 1.16,б), состоящая из медных изолированных проводов. Обмотка короткозамкнутого ротора из сплава алюминия заливается в пазы одновременно с короткозамыкающими кольцами и вентиляционными лопатками на его торцах.



а б

Рисунок 1.16 Устройство ротора : а – короткозамкнутого; б - фазного

Фазная обмотка ротора имеет три фазы, Одни выводы этих обмоток соединяются в звезду, другие – подключены к изолированным друг от друга контактным кольцам.

Вместе с неподвижными щетками эти кольца образуют скользящий контакт, позволяющий соединять фазную обмотку с внешней цепью: пусковыми реостатами, полупроводниковыми выпрямителями или другими устройствами (рисунок 1.17).

Принцип действия асинхронного двигателя. Трехфазный ток в обмотках статора создает вращающееся магнитное поле, которое пересекает замкнутые проводники обмотки ротора и наводят в них ЭДС. Под действием этой ЭДС в обмотках ротора протекает ток.

Взаимодействие тока ротора с вращающимся полем статора создает действующие на проводники электромагнитные силы F. Эти силы стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил F, приложенных к отдельным проводникам, создает на роторе электромагнитный момент M, приводящий его в движение с частотой вращения, меньшей частоты вращения поля статора.

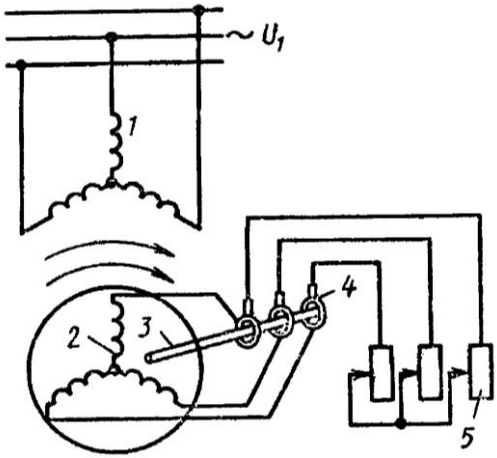


Рисунок 1.17 Схема асинхронного двигателя с фазным ротором:
1 - обмотка статора; 2 – обмотка ротора; 3 – вал; 4 – контактные кольца; 5 – пусковые реостаты.

Асинхронные двигатели широко применяются в электроприводе благодаря своей простоте, надежности и относительно малой стоимости. Основным недостатком асинхронных двигателей является их низкая регулировочная способность, что затрудняет их повсеместное использование. Отношение к этому двигателю изменилось после создания надежных полупроводниковых преобразователей частоты.

1.2.2 Электромеханические свойства асинхронных двигателей

Электромеханические свойства асинхронного двигателя в основном определяются уравнением механической характеристики ω = f(M).

Для его вывода обычно используют упрощенную схему замещения, приведенную на рисунке 1.18. [5,10]

На схеме замещения приняты следующие обозначения:

R_μ, X_μ - активное и индуктивное сопротивление контура намагничивания, Ом;

X_1, X_2' - индуктивные фазные сопротивления, обусловленные полями рассеяния обмоток статора и ротора, последнее приведено к обмотке статора, Ом;

R_1, $R_{2\Sigma}'$ - активное сопротивление обмоток статора и суммарное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

U_1 - действующее значение фазного напряжения сети, В;

$I\mu$, I_1, I_2' - соответственно фазный ток намагничивания, статора и приведенный ротора, А;

S - скольжение двигателя, равное

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \qquad (1.16)$$

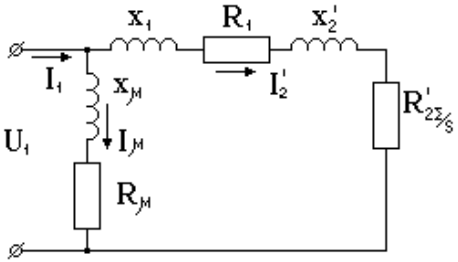


Рисунок 1.18 Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя

В соответствии с приведенной схемой замещения можно получить выражение для вторичного тока

$$I_2^{!} = \frac{U_\phi}{Z} = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R_2^{!}/s)^2 + (x_1 + x_2^{!})^2}} \qquad (1,17)$$

ω - угловая скорость поля статора, рад/с;

$$\omega_0 = 2\pi f/p$$

где f - частота напряжения питающей сети, Гц; p - число пар полюсов двигателя.

Мощность, потребляемая из сети

$$P_1 = \Delta P_0 + \Delta PM_1 + PЭM = 3(I\mu 2R\mu + I_2'2R_1 + I_2'2\, R_{2\Sigma}/S), \qquad (1.18)$$

С учетом баланса мощностей и схемы замещения можно определить электромагнитную мощность двигателя

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{3I_2' R_{2\Sigma}'}{S} = \frac{3U_1^2 R_{2\Sigma}' / S}{(R_1 + R_{2\Sigma}' / S)^2 + X_{\text{К}}^2}, \qquad (1.19)$$

где $X_К=X_1+X_2'$ - индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания,

С учетом $P_{ЭМ}=M_{ЭМ}\cdot\omega_0$, находим

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega} = \frac{3U_1^2 \cdot R'_{2\Sigma}}{\omega_0 S\left[\left(R_1 + \frac{R'_{2\Sigma}}{S}\right)^2 + X_{\text{К}}^2\right]} \qquad (1.20)$$

Из уравнения механической характеристики (1.20) следует, что M=f(s)
имеет максимум. Максимальное значение момента $M_К$, развиваемого двигателем, называют критическим, а соответствующее ему скольжение $S_К$ - критическим.

Приняв dM/dS = 0 уравнения (1.20), получим

$$S_{\text{К}} = \pm \frac{R_{2\Sigma}'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{К}}^2}}; \qquad (1.21)$$

Подставив значение (1.21) в (1.20), получим

$$M_{\text{К}} = \frac{3U_{\text{Ф}}^2}{2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{К}}^2})}, \qquad (1.22)$$

где знак “+” соответствует двигательному режиму работы АД ($\omega<\omega_0$), знак - генераторному ($\omega>\omega 0$).

Из (1.20) и (1.22) с учетом (1.21) можно получить выражение механической характеристики в виде

$$M = \frac{2M_{\text{К}}(1 + aS_{\text{К}})}{S/S_{\text{К}} + S_{\text{К}}/S + 2aS_{\text{К}}}, \qquad (1.23)$$

где $a = R_1/R_{2\Sigma}'$.

Если в уравнении (1.21) пренебречь активным сопротивлением статора, получается формула, более удобная для расчетов

$$M = \frac{2Mк}{S/Sk + Sk/S} \qquad (1.24)$$

Механическая характеристика, полученная при номинальных значениях частоты и напряжения на статоре и отсутствии дополнительных сопротивлений (активных и реактивных) в обмотках АД, называется естественной. Все остальные характеристики, полученные при отклонении параметров U, f и др. от их номинальных значений, являются искусственными. Примерный вид этих характеристик показан на рисунке 1.19.

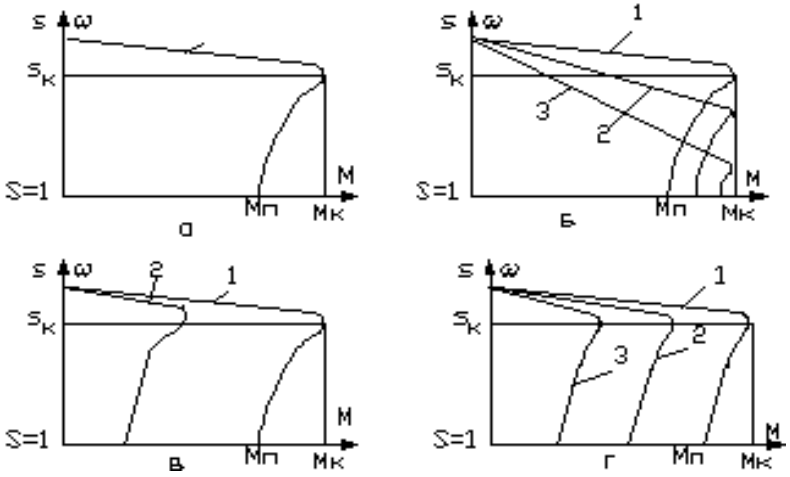


Рисунок 1.19 Механические характеристики асинхронного двигателя:

а – естественная; б – 1 естественная, 2,3 при введении в роторную цепь дополнительных резисторов; в 1 естественная, 2-при введении в статорную цепь дополнительного резистора; г – 1 – естественная, 2,3 – при пониженных напряжениях, подводимых к статору

Перечисленные свойства характеристик используются для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей и формирования более жестких механических характеристик.

У асинхронных двигателей, также как у двигателей постоянного тока, три способа торможения с аналогичными названиями: торможение с передачей энергии в сеть (рекуперативное), динамическое и противо включением.

Рекуперативное торможение. В асинхронном двигателе рекуперативное торможение реализуется при опускании тяжелых грузов.

Под действием момента, создаваемого грузом, скорость опускания груза будет возрастать до тех пор, пока $M_{гр.}$ больше тормозного момента двигателя $M_{тр}$. При $M_{гр}= M_{тр}$ опускание груза будет происходить с постоянной установившейся скоростью. Двигатель будет работать в генераторном режиме, передавая энергию в сеть с одновременным потреблением энергии из сети для создания вращающегося магнитного поля. В установках глубокого бурения асинхронные двигатели с непосредственным подключением статора к сети не применяются.

Динамическое торможение. Асинхронная машина из двигательного режима в режим динамического торможения переводится (рисунок 1.20) отключением обмотки статора от сети контактами КМ и подключением двух его фаз к источнику постоянного тока контактами КМД.

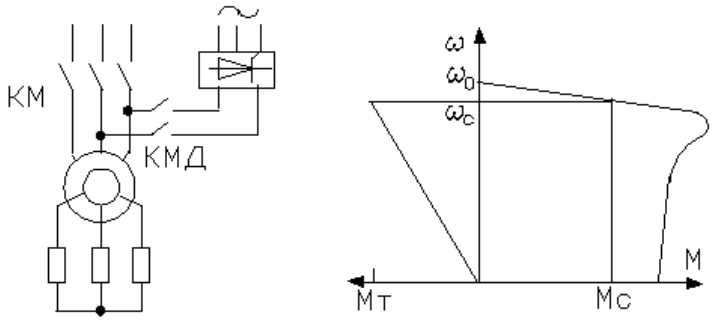


Рисунок 1.20 Схема перевода двигателя в режим динамического торможения и характеристики двигателя в этом режиме

Постоянный ток, протекающий в обмотке статора, создает неподвижный в пространстве магнитный поток. В обмотках вращающегося по инерции ротора наводится ЭДС, которая вызывает появление тока в роторной цепи.

Взаимодействие тока ротора с неподвижным магнитным потоком

статора создает тормозной момент, значение которого определяется выражением [2].

$$M' = \frac{3I_{ЭКВ}^2 X_\mu R'_{2\Sigma} S'}{\omega_0 \left[R'^2_{2\Sigma} + \left(X_\mu + X'_2 \right)^2 S'^2 \right]}, \qquad (1.25)$$

где $I_{ЭКВ}$ - эквивалентный ток обмотки статора, равный для заданной схемы включения обмоток $Iэкв = \frac{\sqrt{2}}{3}$ I_d = 0,427 I_d,

Id - постоянный ток, потребляемый обмоткой статора,;

S^1 = ω / ω_0 - текущее значение скольжения при динамическом торможении.

Из уравнения (1,25) видно, что момент при динамическом торможении зависит от $I_{ЭКВ}$, протекающего по обмотке статора, и является функцией относительной скорости вращения ротора S ' = ω*.

Исследуя (1,25) на экстремум, найдем, что $M_{К\,ДТ}$ будет иметь место, когда

$$S_к^! = \frac{R^!_{2\Sigma}}{X\mu + X_2^!} \qquad (1.26)$$

а значение критического момента

$$M_{К\,ДТ} = \frac{3I_{ЭКВ}^2 X_\mu^2}{2\omega_0 \left(X_\mu + X'_2 \right)}. \qquad (1.27)$$

Из уравнений (1.25) и (1.27) с учетом (1.24) уравнение механической характеристики в режиме динамического торможения можно представить в виде:

$$M = \frac{2M_{К\,ДТ}}{S / S'_К + S_К / S'}. \qquad (1.28)$$

На рисунке 1.21 изображены механические характеристики при динамическом торможении при трех добавочных резистора с различными сопротивлениями в роторе и для двух значений постоянного тока в цепи статора.

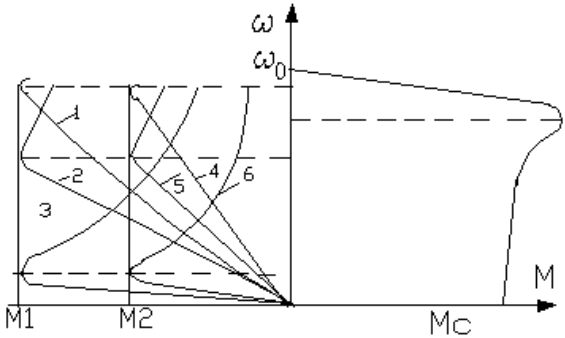
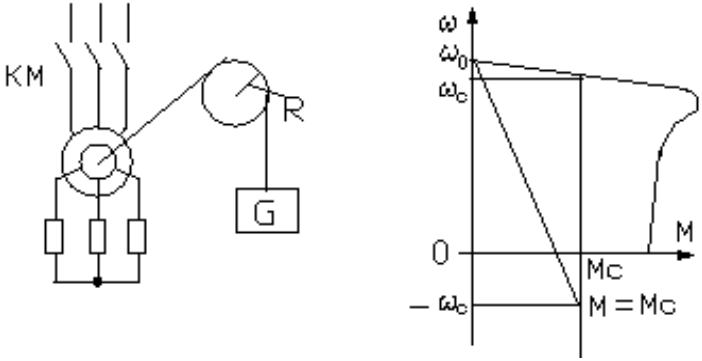


Рисунок 1.21 Характеристики двигателя в режиме динамического торможения: 1,2,3 - характеристики при одном значении тока в обмотках статора и различных сопротивлениях в роторной цепи: характеристики 4.5.6 получены при тех же величинах сопротивления резисторов, но при меньшем токе в цепи статора.

Из характеристик следует, что при изменении сопротивления добавочного резистора в цепи ротора изменяется среднее значение тормозного момента. Следовательно, имеется оптимальное значение сопротивления, при котором имеет место максимальный тормозной момент при заданном значении постоянного тока и минимальное время торможения. Чем больше значение постоянного тока в обмотках статора, тем больше средний тормозной момент и эффективнее торможение двигателя.

Торможение противовключением. Торможение противовключением называется режим, при котором двигатель включен на одно направление вращения, а под действием каких либо сил (инерции или опускающегося груза), он вращается в противоположном направлении. Для ограничения тока в период торможения в роторную цепь включают дополнительные резисторы. Процесс торможения иллюстрируется рисунком 1.22. Груз G при опускании создает момент M_c = GR. В интервале ω_c – (-ω_c) у двигателя, включенного на подъем груза, $M < M_c$ и груз будет опускаться вниз, вращая его вал в противоположном направлении.



а б

Рисунок 1.22 Торможение противовключением: а – схема; б- характеристики 1 - естественная; 2 – при дополнительных резисторах в роторной цепи.

Установившееся движение наступает при М = M_c. Изменение скорости опускания груза (увеличение или уменьшение), возможно увеличением или уменьшением сопротивления резисторов в роторной цепи.

Недостатки этого способа – большие потери энергии на резисторах в роторной цепи и низкая плавность регулирования скорости движения.

Пример 1.2 Для асинхронного двигателя 4А2 рассчитать и построить: 1) естественную механическую характеристику для двигательного режима ; 2) при пониженном напряжении на статоре ($U=0,8\ U_н$); при пониженной частоте напряжения (f=(45 Гц).

Паспортные данные двигателя: $U_н$ = 380 В; $P_н$ =13 кВт; $S_н$ =7% (0,07); $K_м$ = 3;

$E_{2н}$ = 205 В; $I_{2н}$ = 42А; η % = 83,5, Cos φ = 0,81.; n_o =1000 об/мин.

Номинальный момент двигателя

$$M_{н=} 975\ P_н/n_н = 975 \cdot 13/930 = 13,63 \text{ кГ·м } (133,7 \text{ Н·м}).$$

В паспортных данных двигателей нет значения номинальной частоты вращения. Ее величину можно определить по уравнению

$$n_н = n_0(1-S_н) = 1000(1-0,07) = 930 \text{ об/мин.}$$

Максимальный (критический) момент

$$M_к = K_м \cdot M_н = 3 \cdot 13,63 = 40,88 \text{ кГм. } (401 \text{ Нм}).$$

Критическое скольжение

$$S_к = S_н(К_м + \sqrt{K^2 м - 1}) = 0{,}07(3 + \sqrt{3^2 - 1}) = 0{,}4$$

После подстановки значений $S_к$ и $M_е$ в уравнение (1), получим

$$M = 2Mк/ \ (S/Sк + Sк/S) = 2 \cdot 40{,}88/ (S/0{,}4 + 0{,}4/S)$$

Задаваясь значениями S в пределах от 0 до 1 и подставляя их в уравнение естественной характеристики, находим для каждого значения скольжения S величину момента нагрузки .M. Расчет сведен в таблицу 1.1

Момент, развиваемый асинхронным двигателем, находится в квадратичной зависимости от величины напряжения в сети.

$$M_и = (U/U_н)^2 \ M_е.$$

где $M_и$, $M_е$ - соответственно моменты на искусственной (при пониженном напряжении) и естественной характеристике при одной величине скольжения.

Получить данные для построения механической характеристики асинхронного двигателя возможно путем пересчета моментов согласно уравнению (1,28). Например, при снижении напряжения на статоре двигателя на 20%, величина критического момента снизится на 36%.

$$M_{кр.пон} = (0{,}8U_н/U_н)^2 \cdot M_{кр} = 0{,}64 \ M_{кр}.$$

Величина критического скольжения находится в обратно пропорциональной зависимости от частоты напряжения в сети

$$S_{кр}^{/} = s_{кр}f/f^{/} , \qquad (1.29)$$

где f- частота напряжения в сети (50 Гц); $f^{/}$ - частота напряжения, отличная от стандартной (50 Гц) частоты напряжения в сети.

Критический момент двигателя находится в такой же, но квадратичной зависимости

$$M^{/}_{кр} = M_{кр}(f/f^{/})^2 \qquad (1{,}30)$$

Т.е. с изменением частоты питающего напряжения момент $M_{кр}$ резко падает (при увеличении частоты) или резко возрастает (при уменьшении частоты).

Для того чтобы перегрузочная способность асинхронного двигателя оставалась постоянной, необходимо одновременно с увеличением

(уменьшением) частоты увеличивать (уменьшать) и напряжение в сети. Расчет сведен в таблицу 1.1. Механические характеристики двигателя, построенные по расчетным данным, приведены на рисунке 1.23

Таблица 1.1

S	0,07	0,12	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
M, кГ·м	13,63	22,5	32,7	39,3	40,88	39,88	37,8	32	32
$M/M_н$	1,0	1,65	2,4	2,88	3,0	2,92	2,77	2,35	2,35
$M_{0,8Uн}$	8,72	14,4	20,9	25,15	26,16	25,5	24,19	20,5	18
$M_{0,8Uн}./M_н$	0,64	1,06	1,53	1,85	1,92	1,87	1,83	1,5	1,32

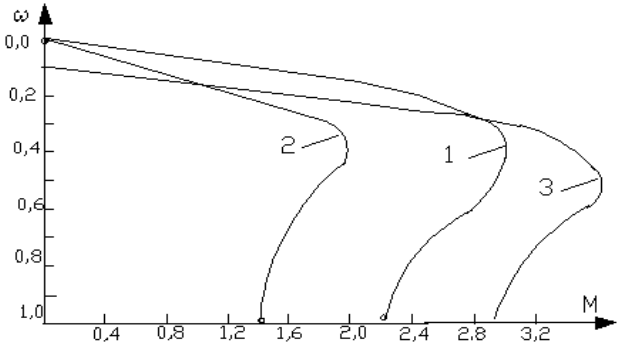


Рисунок 1.23 Характеристики двигателя: 1 – естественная; 2 – при U = 08$U_н$; 3 – при f = 45 Гц.

1.2.3 Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей

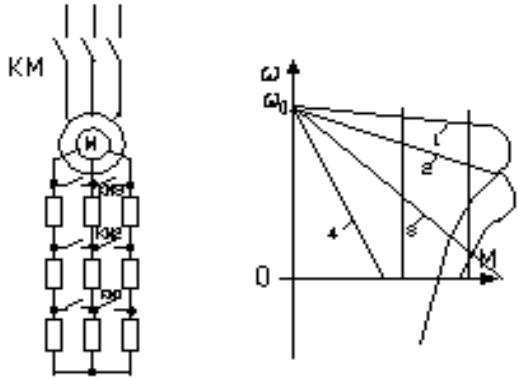
Влияние различных параметров на зависимости, показанное в уравнениях (1.17) – (1.24) и на рисунке 1.18, позволяет использовать их для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей. В зависимости от того, изменением какого параметра регулируется частота вращения асинхронного двигателя, различают следующие способы регулирования:

- изменением величины сопротивления роторной цепи;
- изменением напряжения, подводимого к обмоткам статора;
- изменением частоты напряжения на статоре;
- введением в цепь ротора дополнительных источников питания

(каскадные схемы);

- регулирование по цепи ротора с помощью импульсных регуляторов.

Регулирование частоты вращения изменением сопротивления роторной цепи. Этот способ более известен как «реостатный». Регулирование частоты вращения и пускового тока осуществляется введением и выведением ступеней резисторов из роторной цепи с помощь контактов КМ магнитных пускателей. Возможности этого способа рассмотрим на примере электрической схемы и ее характеристик (рисунок 1.24). Как видно из рисунка, с увеличением сопротивления резисторов

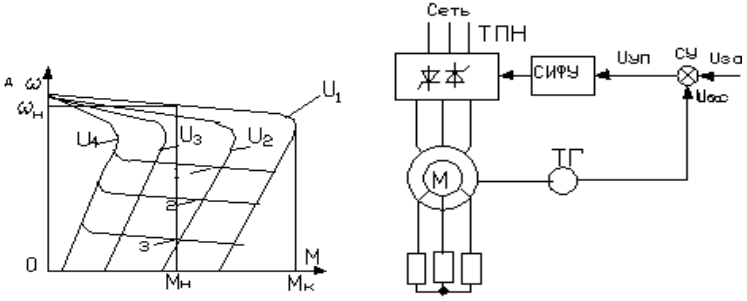


а б

Рисунок 1.24 а – электрическая схема; б – реостатные характеристики

уменьшается жесткость механических характеристик, диапазон регулирования частоты вращения не превышает 3:1, при холостом ходе частота вращения практически не регулируется, регулирование возможно только «Вниз» от основной частоты вращения, плавность регулирования зависит от числа ступеней реостата. В настоящее время существует множество схемных решений, реализованных на базе силовой полупроводниковой техники, позволяющих плавно регулировать величину сопротивления роторной цепи. Существенным недостатком реостатного способа регулирования является: большие потери энергии в пусковых реостатах; мягкие механические характеристики, возможность регулирования скорости только с нагрузкой двигателя. Основным достоинством этого способа является простота схемы и обслуживания. В настоящее время основной областью применения реостатного способа являются электропривод крановых механизмов. Целесообразно применение реостатного способа в нерегулируемых приводах, где пусковые реостаты ограничивают пусковой ток и обеспечивают плавность процесса разгона механизмов.

Регулирование частоты вращения двигателей изменением величины напряжения на статоре. Из уравнения (1.20)[10] следует, что величина критического момента $M_к$ находится в квадратичной зависимости от величины напряжения на статоре, Величина критического скольжения зависит только от активно-индуктивных сопротивлений обмоток двигателя (1.21). Поэтому при различных величинах напряжения на статоре механические характеристики будут иметь вид, приведенный на рисунке 1.25, а, где $U_4 < U_3 < U_2 < U_1$. $U_1 = U_н$. Как видно, характеристики при пониженном напряжении существенно отличаются от естественной.



а б

Рисунок 1.25 а – характеристики; б – электрическая схема

Синхронная частота вращения ω_0 от величины напряжения на статоре не зависит. Поэтому характеристики, полученные при напряжении сети, отличном от номинального, пересекают ось ординат в одной точке $\omega = \omega_0$. Максимум момента на естественной и всех искусственных характеристиках будет при одном и том же значении s_K.

Для построения искусственных характеристик, полученных при напряжении сети, отличном от номинального, необходимо, прежде всего, построить естественную характеристику, а затем значения моментов естественной характеристики пересчитать для искусственных: $M' = M(U/U_H)^2$.

Кратности максимального и пускового моментов двигателя также изменяются прямо пропорционально квадрату напряжения сети.

Квадратичная зависимость момента двигателя от величины напряжения сети дает возможность формировать относительно жесткие характеристики при работе с пониженной частотой вращения. Если при работе двигателя с $M_н$ на естественной характеристике снизить напряжение, например, до величины U_3, то критический момент двигателя станет меньше момента нагрузки, и частота его вращения будет снижаться. При повышении напряжения с любого значения сниженной частоты вращения двигатель будет переходить на характеристики с большим значение $M_к$. Если при $M = M_н$ прекратить повышение напряжения на статоре, то двигатель будет

работать устойчиво с пониженной частотой вращения. Таким образом, можно получать относительно стабильную частоту вращения в широком диапазоне.

Принцип работы схем, обеспечивающих формирование жестких характеристик, поясняется рисунком 1.25,б. Схема содержит преобразователь (регулятор) переменного напряжения и цепь обратной связи по частоте вращения. Выходной сигнал датчика частоты вращения (тахогенератора ТГ), пропорциональный частоте вращения двигателя, подается на вход суммирующего устройства СУ. На другой вход этого устройства подается сигнал задания $U_{зад.}$. Разность этих сигналов $U_{зад} - U_{ос}=U_{уп.}$ является управляющим напряжением, от величины которого зависит угол открывания тиристоров α и величина напряжения на статоре. Величина частоты вращения двигателя, при которой вступает в действие обратная связь, устанавливается напряжением задания $U_{зад}$. Например, двигатель работал с номинальной нагрузкой при напряжении на статоре, равном U_2. При снижении напряжения на статоре до величины U_3 (изменением величины $U_{зад}$), двигатель перейдет на характеристику с критическим моментом $M_к^! < M_н$. Частота вращения двигатели начнет снижаться. Одновременно будет снижаться и сигнал обратной связи $U_{ос}$. С момента появления разности $U_{зад} - U_{ос}=U_{уп.}$ напряжение на входе СИФУ будет возрастать, а управляющие импульсы будут сдвигаться в сторону увеличения напряжения на статоре. По мере увеличения напряжения двигатель будет плавно переходить с одной характеристику на другую до тех пор, когда насупит $M_л = M_н$. Если нагрузка будет постоянной, то двигатель будет устойчиво работать на пониженной частоте вращения. Недостатками этого способа регулирования частоты вращения являются:

- невозможность регулирования при работе без нагрузки;
- зависимость диапазона регулирования от величины пускового момента на естественной характеристике.

Наиболее благоприятной областью применения электропривода с рассмотренным способом частоты вращения являются крановые механизмы.

Регулирование частоты вращения АД изменением частоты напряжения на якоре

Возможность регулирования скорости вращения Ω ротора АД изменением частоты питающего напряжения f_1 вытекает из выражения синхронной скорости

$$\Omega_1 = \frac{2\pi}{p} f_1,$$

где p - число пар полюсов АД.

Для реализации частотного регулирования угловой скорости

вращения используются полупроводниковые (тиристорные или транзисторные) преобразователи, выходные напряжения и частота, которых изменяются независимо или по какому-либо закону.

Преобразователи частоты (ПЧ) бывают двух типов:

- с непосредственной связью нагрузки и питающей сети (ПЧН);
- со звеном постоянного тока.

ПЧН используются в тех случаях, когда частота напряжения питающей сети гораздо выше частоты напряжения питания нагрузки, например, в без редукторных низкоскоростных приводах, где необходимо плавное регулирование угловой скорости (приводы шаровых мельниц, крановые электроприводы), а также в машинах двойного питания.

ПЧН позволяют регулировать выходную частоту только вниз от частоты питающей сети f_C, причем $f_{вых.мах}$ = (0.3....0.5) f_C.

ПЧ со звеном постоянного тока позволяют изменять выходную частоту напряжения как вверх, так и вниз от частоты питающей сети и могут применяться в электроприводах различных промышленных механизмов.

Полупроводниковые ПЧ имеют высокие КПД. (0.92 ...0.98), надежность, быстродействие, а также малые массу и габариты.

В зависимости от требований, предъявляемых к системам частотного управления, применяются разомкнутые и замкнутые системы управления частотно-регулируемыми приводами.

Разомкнутые системы частотного управления обычно имеют жесткую связь между регуляторами частоты и напряжения, которая реализуется посредством функционального преобразователя, обеспечивающего требуемый закон изменения напряжения на статоре АД в функции частоты. Разомкнутые системы позволяют обеспечить требование постоянства перегрузочной способности двигателя в ограниченном диапазоне регулирования, зависящего от характера нагрузки (при M_C = const от (0.2 ... 0.3) Ω_H до номинальной скорости Ω_H).[15].

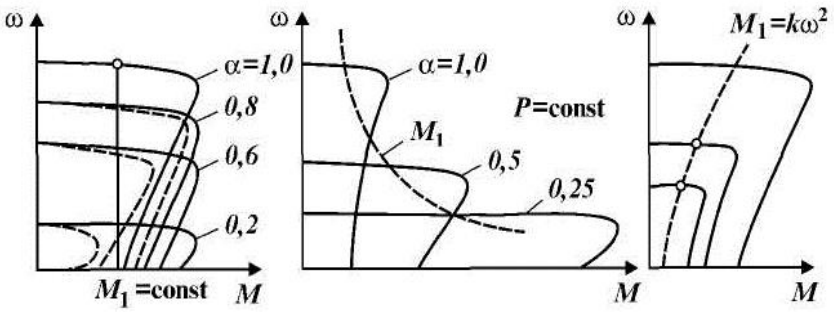
В замкнутых системах регулирования скорости перегрузочная способность АД поддерживается постоянной выбором соответствующего закона изменения питающего напряжения в функции частоты, а жесткость механической характеристики - обратной связью по ЭДС, скорости и т.д..

В разомкнутых системах реализуются следующие законы регулирования:

- для механизмов с постоянным моментом сопротивления M_C = const, закон изменения напряжения от частоты имеет вид U / f_1 = const, либо E / f_1 = const с IR - компенсацией;
- для вентиляторной нагрузки при диапазоне регулирования скорости D = 2 : 1 закон изменения напряжения от частоты имеет вид $U / f_1^{\,2}$ = const;
- для механизмов с постоянной мощностью P_C = const закон изменения напряжения будет $U / \sqrt{f_1}$ = const.

Механические характеристики асинхронных двигателей при

различных законах регулирования напряжением и частотой приведены на рисунке 1.26



а б в

Рисунок 1.26 Механические характеристики асинхронного двигателя: а – при постоянном моменте; б – при постоянной мощности; в – при вентиляторной нагрузке

Частотное регулирование скорости является экономичным, т.к. управление производится при малых скольжениях.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей введением в цепь якоря дополнительной ЭДС.

Регулирование частоты вращения двигателя указанным способом поясняется схемой и характеристиками, приведенными на рисунке 1.27

Системы асинхронного привода, в которых регулирование частоты вращения осуществляется введением в роторную цепь дополнительной ЭДС, называются каскадными системами электроприводов. Существует множество разновидностей каскадных систем. В зависимости от типа источника формирования и регулирования противо -ЭДС в роторной цепи, каскадные схемы подразделяют на «Электромашинные» и «Вентильные» и др.. Вариант схемы, приведенный на рисунке 1.27, называется асинхронным вентильным каскадом (АВК).

Схема АВК (рисунок 1.27,а) содержит асинхронный двигатель М с фазным ротором, неуправляемый выпрямитель В, выполненный по трехфазной мостовой схеме, сглаживающий дроссель L и инвертор И, ведомый сетью, состоящий из тиристорного моста и согласующего трансформатора.

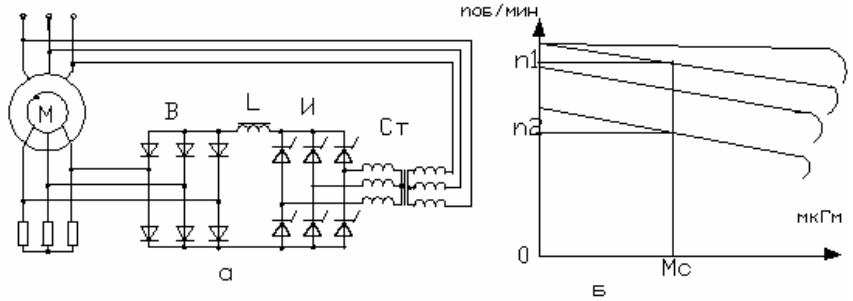


Рисунок 1.27 АВК: а – схема; б – характеристики.

При работе асинхронного двигателя на обмотках ротора наводится переменное напряжение, величина которого пропорциональна скольжению ($U_р = U_{2н}$ s). С изменением частоты вращения двигателя изменяется и величина выходного напряжения неуправляемого выпрямителя (U_d = 1,35 $U_{2н}$ s). Выходное напряжение инвертора, направленное на встречу напряжению выпрямителя, может регулироваться изменением угла β ($U_и$ = 2,34 $U_{2ф}$Cos β), что позволяет регулировать ток ротора и пропорциональный ему момент, развиваемый двигателем

$$I_d=(U_d–U_{ио}\text{Cos}\,\beta)/R_Э, I_р 0{,}78 I_d \qquad (1.3.1)$$

где $U_{ио}$ - максимальное выходное напряжение инвертора;

$R_Э$ – эквивалентное сопротивление роторной цепи;

U_d – выходное напряжение выпрямителя, пропорциональное скольжению ротора.

Примем, что двигатель работает на характеристике 2 (β = 90^0, $U_и$= 0)

с частотой вращения n_1 и моментом нагрузки M_c. При уменьшении угла β увеличивается напряжение инвертора, уменьшается ток ротора и момент двигателя становиться меньше момента нагрузки. Вследствие этого частота вращения двигателя будет уменьшаться, а напряжение на обмотках ротора будет возрастать. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока момент двигателя снова станет равным моменту нагрузки.

Таким образом, изменяя угол регулирования β , например, от 90^0 до 0^0 можно переводить работу двигателя на другие характеристики, где он будет работать с устойчивой пониженной частотой вращения.

По мере снижения частоты вращения двигателя, возрастает количество энергии, трансформируемой из статора в роторную цепь. При реостатном способе регулирования частоты вращения вся эта энергия идет на

нагрев элементов роторной цепи, в основном на дополнительных резисторах, введенных в роторную цепь. При работе асинхронного двигателя в системе АВК по мере снижения частоты вращения так же возрастает энергия. передаваемая в роторную цепь. Величина этой энергии зависит от скольжения s. Иногда эту энергию так и называют энергией скольжения. Затем эта энергия преобразуется неуправляемым выпрямителем в энергию постоянного тока, а инвертор, ведомый сетью, преобразует ее снова в энергию переменного тока и передает в сеть. Потребляемая мощность из сети в системе АВК зависит от момента нагрузки и не зависит от частоты вращения. По мере снижения частоты вращения двигателя происходит перераспределение этой мощности: уменьшается мощность на валу двигателя и возрастает мощность, передаваемая в роторную цепь. Возвращение этой энергии (за исключением потерь в обмотках и стали ротора) с помощью инвертора позволяет поддерживать относительно высокий КПД в широком диапазоне регулирования частоты вращения двигателя.

Достоинствами системы АВК являются:

- высокая плавность и широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- более высокий КПД двигателя по сравнения с системами реостатного управления;
- простота перехода от регулируемого привода к нерегулируемому (при нарушении работы преобразователей и системы регулирования).

Есть в этой системе и существенные недостатки:

- уменьшение максимального момента до 17%[13];
- низкий Cos φ;
- искажение формы напряжения питающей сети.

Пример1.3 Для электропривода по системе АВК. рассчитать и выбрать элементы выпрямителя и инвертора.

В качестве примера принят асинхронный электродвигатель типа АКН – 14-41- 12 с

Технические данные двигателя

Данные статора:

- номинальная мощность …… $P_н$ = 400 кВт,
- номинальное напряжение ……$U_{1н}$ = 6000 В,
- номинальный ток статора …… $I_{1н}$ = 51 А,
- номинальная скорость …… $n_н$ = 485 об/мин,
- номинальный КПД ……$\eta_н$ = 92,2 %,
- номинальный cos φ ……0,81,
- коэффициент перегрузки, $К_м$ …… 2.

Данные ротора:

- напряжение на обмотках при заторможенном роторе …… $E_{2н}$ = 640 В,
- номинальный ток ротора …… $I_{2н}$ = 385 А,
- сопротивление фазной обмотки …….. r_2 = 0,0157 Ом,
- маховый момент ……. GD^2 = 0,68 т.м^2.

Принципиальная схема системы АВК приведена на рисунке 1.27.

Исходными данными для расчета и выбора элементов выпрямителя является $E_{2н}$, $I_{2н}$, $S_{макс}$ (максимальное скольжение двигателя при работе в системе АВК).

В схемах выпрямителей вентили (диоды и тиристоры) выбираются по двум параметрам: максимальному обратному напряжению $U_п$ и максимальному току нагрузки $I_{d\ макс}$.

Максимальное обратное повторяющееся напряжение, прикладываемое к диодам

$$U_п = K_{зu} \cdot \sqrt{2} \cdot E_{2н},$$

где $K_{зu}$ – коэффициент запаса по напряжению (принимается в пределах 1,3 – 1,5).

$$U_п = 1{,}4 \cdot 1{,}41 \cdot 640 = 1257 \text{ В}.$$

Длительно допустимый ток диодов

$$I_п = K_{зi} \cdot K_{сх} \cdot K_{ох} \cdot I_{ср},$$

где $K_{зi}$ – коэффициент запаса по току (принимается в пределах 1,3-1,5); $K_{сх}$ -=1,1 – коэффициент схемы; $K_{ох}$ - коэффициент, учитывающий условия охлаждения (при принудительном охлаждении $K_{ох}$ = 1, при естественном – $K_{ох}$ = 2,5)

Принимаем принудительное охлаждение.

$I_{ср} = I_{мах}/3$; $I_{2.мах} = 2 \cdot I_2н = 2 \cdot 385 = 770$ А. ; $I_{d.мах} = I_{2мах}/K_{I2} = I_{2мах}/0{,}8 = 770/0{,}8 = 962$ А $I_{ср} = 962/3 = 320$ А.

$$I_п = 1{,}4 \cdot 1{,}1 \cdot 320 = 492 \text{ А}.$$

К установке принимаем вентили ВК-500 ,кл13, ($U_п$ = 1300 В, $I_п$ =500 А)

*Инвертор.*В качестве силовой схемы включения вентилей в инверторе принимаем наиболее совершенную – трехфазную мостовую. Основные ее параметры и соотношения при включении вторичных обмоток трансформатора в звезду:

$K_u = 0,427$; $E_{d0} / E_{эф} = 2,34$; $K_s = 1,045$; $K_{I2} = 0,817$; $U_н/E_{d0} = 1,045$; $\lambda = 120^0$; $K_ф = 1,73$; $K_\alpha = 3$.

Расчет и выбор согласующего трансформатора

Требуемая величина напряжения на вторичных обмотках согласующего трансформатора зависит от величины $E_{2н}$ и максимальной величины скольжения $S_{мах}$ ($S_{мах} = 1$ при пуске двигателя в системе АВК , $S_{макс} < 1$ при комбинированном пуске)

С учетом этого требуемая величина ЭДС вторичной обмотки трансформатора определяется по формуле:

$$E_{2ф} = K_U * K_C * K_\alpha * \frac{E_{dO}}{\cos\beta_{мин}} = 0,427*1,1*1,1*\frac{864}{0,96} = 465 \text{ В}$$

где $E_{d0} = 1,35\ E_{2н} \cdot S_{ма} = 1,35 \cdot 640 = 864$ В (S=1- принятое значение); K_c – коэффициент, учитывающий возможность снижения напряжения в сети (при снижении напряжения на 5-10 %, $K_c = 1,05 – 1,1$); K_α – коэффициент, учитывающий неполное открывание тиристоров при минимальном угле регулирования ($K_\alpha = 1 – 1,5$).

Действующее значение фазного тока вторичных обмоток трансформатора при номинальной нагрузке двигателя:

$$I_{2ф} = I_{2н} = 385 \text{ А}.$$

Расчетная мощность трансформатора:

$$S_{TP} = 3*E_{2Ф}*I_{2H} = 3*465*385 = 537 \text{ кВа}.$$

К установке принимаем трансформатор ТЗСПУ -527. $S_{тр} = 527$ кВА; $U_1 = 6$кВ; $\Delta p_к = 2320$ Вт.

.

Тиристоры, также как и диоды, выбираются по длительно допустимому току $I_п$ при заданных условиях охлаждения и максимальному обратному повторяющемуся напряжению $U_п$.

Средний ток, протекающий через тиристоры в каждом плече моста

$$I_{ср} = I_{мах} / 3 = I_{dмах} /3 = 962/3 = 320\text{А}.$$

Длительно допустимый ток тиристоров в трехфазной мостовой схеме

$$I_п = K_{зi} \cdot K_{сх} \cdot K_{ох} \cdot I_{ср},$$

где $К_{зi}$ – коэффициент запаса по току (принимают в пределах 1,3 – 1,4);

$К_{ох}$ – коэффициент, учитывающий условия охлаждения ($К_{ох}$ = 2,5 – приестественном охлаждении, $К_{ох}$ = 1 - при принудительном охлаждении).

Принимаем естественное охлаждение.

$$I_п = 1,4 \cdot 1,1 \cdot 2,5 \cdot 320 = 1232 \text{ А}.$$

Амплитуда обратного повторяющегося напряжения

$$U_п = К_{зu} \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \; E_{2ф},$$

где $К_{зu}$ – коэффициент запаса по напряжению ($К_{зu}$ = 1,3 – 1,4)

$$U_п = 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 465 = 1587 \text{ В}.$$

К установке принимаем тиристоры Т253 -1250, кл. 16

1.3 Синхронные машины

1.3.1 Устройство и принцип действия

Основными частями синхронной машины являются якорь и индуктор. Наиболее частым является такое исполнение, при котором якорь располагается на статоре, а на отделенном от него воздушным зазором роторе находится обмотка возбуждения (индуктор)

Якорь представляет собой одну или несколько обмоток переменного тока. В двигателях токи, подаваемые из сети в якорь, создают вращающееся магнитное поле, которое сцепляется с полем индуктора, и таким образом происходит преобразование энергии. Магнитное поле якоря оказывает воздействие на поле индуктора. Это воздействие называется реакции якоря. В генераторах реакция якоря создается переменными токами, индуцируемыми в обмотке якоря от индуктора.

Индукторы (рисунок 1.28) состоят из полюсов — электромагнитов постоянного тока или постоянных магнитов. Индукторы синхронных машин имеют две различные конструкции [10, 13]: явнополюсную (рисунок 1.28, б) или неявнополюсную (рисунок 1.28,а). Явнополюсная машина отличается тем, что полюса ярко выражены и имеют конструкцию, схожую с полюсами машины постоянного тока. При неявнополюсной конструкции обмотка возбуждения укладывается в пазы сердечника индуктора, весьма похожего на обмотку роторов асинхронных машин с фазным ротором, с той лишь разницей, что между полюсами оставляется место, незаполненное

проводниками (так называемый *большой зуб*). Неявнополюсные конструкции применяются в быстроходных машинах, чтобы уменьшить механическую нагрузку на полюса.

Магнитопровод статора и ротора синхронных машин выполняют из отдельных листов электротехнической стали. Они имеют шихтованную конструкцию (набранную из отдельных листов). Электротехническая сталь имеет существенное содержание кремния, чтобы повысить ее электрическое сопротивление и уменьшить тем самым вихревые токи.

Синхронные генераторы с явнополюсным ротором соединяются непосредственно с гидравлическими турбинами.

Для повышения прочности неявнополюсные роторы имеют малые диаметры. При вращении ротора с частотой 3000 об/мин его диаметр не должен превышать 1250 мм.

Синхронные генераторы с неявнополюсными роторами приводятся в действие паровыми и газовыми турбинами (турбогенераторы). Частота их вращения достигает до 3000 об/мин.

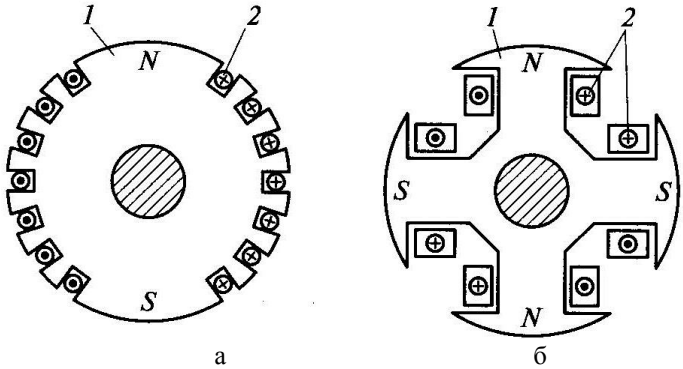


Рисунок 1.28 Поперечный разрез а – неявнополюсного и б- явнополюсного роторов: 1 сердечник; 2 – обмотка возбуждения

Магнитный поток в обмотках ротора создается источником постоянного тока: генератором постоянного тока или полупроводниковым выпрямителем

При вращении ротора посторонним двигателем магнитное поле будет пересекать витки статора и наводить в каждой обмотки ЭДС с частотой f=pn/60.

При подключении обмоток статора к трехфазной сети переменного тока в сердечнике статора будет вращающееся магнитное поле. В результате взаимодействия вращающегося поля статора с полем ротора образуется вращающий момент.

Принцип действия синхронного генератора. Приводной двигатель, вращая генератор с частотой n_0, развивает момент $M_{пд}$,. По обмотке ротора протекает постоянный ток $I_в$, ее МДС $Fв = I_в$, ω создает магнитный поток ротора $Ф_в$. Вращаясь вместе с ротором относительно статора, поток $Ф_в$ в соответствии с законом электромагнитной индукции (ЭМИ) индуцирует в каждой фазе обмотки статора ЭДС $E_в$. При замкнутой внешней цепи по обмоткам статора протекает ток нагрузки *I*, который, в свою очередь, образует МДС статора $F_{ст}$. МДС $F_{ст}$ создает магнитный поток реакции якоря $Ф_{ря}$и поток рассеяния $Ф_d$ (аналогичный асинхронному двигателю), который замыкается поперёк пазов статора и вокруг лобовых частей обмотки статора. Потоки $Ф_{pz}$ и $Ф_d$ наводят в обмотке статора соответственно ЭДС $E_{ря}$ и F_d . Векторная сумма ЭДС $E= E_0+ E_{ря}+ E_в$ и падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора Rя равно напряжению на выходах генератора *U*.

Магнитные потоки статора $Ф_{pz}$ и $Ф_d$ и складываются с магнитным потоком ротора $Ф_в$, который, взаимодействуя с током статора *I*, образует тормозной момент $M_т$ (обратная связь), противодействующий вращающему моменту $M_{вд}$ приводного двигателя. Вырабатываемая статором генератора активная мощность *P* поступает в электрическую нагрузку.

Синхронные генераторы работают на автономную нагрузку или параллельно с питающей сетью. На автономную нагрузку синхронные генераторы работают в автономном режиме в тех случаях, когда промышленная электрическая сеть имеет недостаточную мощность или вообще отсутствует, например, на удаленных строительных площадках, нефтяных и газовых промыслах, лесозаготовительных пунктах, морских и речных судах и т.п. Напряжение на выводах автономно работающего синхронного генератора *U* в большой степени зависит от нагрузки и ее характера.

Зависимость *U(I)* при n_0=const, $I_в$=const и cosφ = const называется *внешней характеристикой* генератора. Семейство внешних характеристик синхронного генератора при различных cosφ изображено на рисунке 1.29. Характеристики показывают, что напряжение генератора при активно – индуктивной нагрузке (φ>0) довольно резко падает, что объясняется размагничивающим действием реакции якоря, а при активно–емкостной нагрузке (φ <0) изменяется незначительно и даже может увеличиваться, что связано с намагничивающим действием реакции якоря при этой нагрузке. При эксплуатации генератора стабилизацию напряжения осуществляют регуляторами возбуждения, которые при увеличении тока нагрузки *I* увеличивают поток ротора $Ф_0$, а, следовательно, и ЭДС E_0 за счёт увеличения тока $I_в$ возбуждения ротора.

Работа синхронных генераторов
параллельно с сетью

На электростанциях обычно устанавливают несколько синхронных

генераторов, параллельно работающих на общую электрическую сеть, а

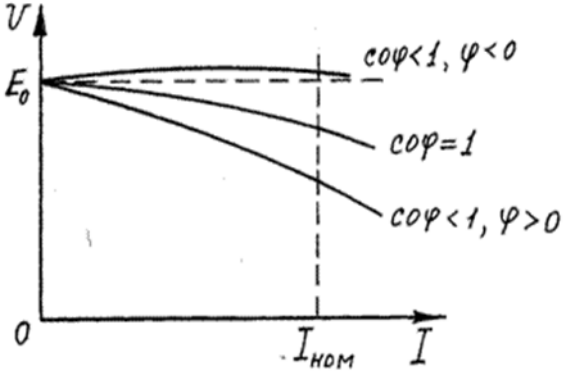


Рисунок 1.29

отдельные электрические станции объединяются в мощные энергосистемы (например, единая система европейской части РФ), которые обслуживают промышленных, коммунальных и бытовых потребителей.

При совместной работе синхронного генератора с сетью существенное значение имеют вопросы включения на параллельную работу, регулирования реактивной и активной мощностей генератора. При анализе параллельной работы принимается, что напряжение U_c и частота сети постоянны. Рассмотрим включение генератора на параллельную работу с сетью.

В момент включения генератора в сеть возможен толчок тока, который может вызвать ударные электромагнитные силы и моменты, способные нарушить работу электрической сети, вызвать механические повреждения генератора и другого электрооборудования. Для того чтобы избежать этих опасных явлений, необходимо, чтобы ток генератора в момент включения был равен нулю. Это условие выполняется, если напряжение генератора равно напряжению сети $U = U_c$ во всех трёх фазах. Это общее условие распадается на четыре частных условия:

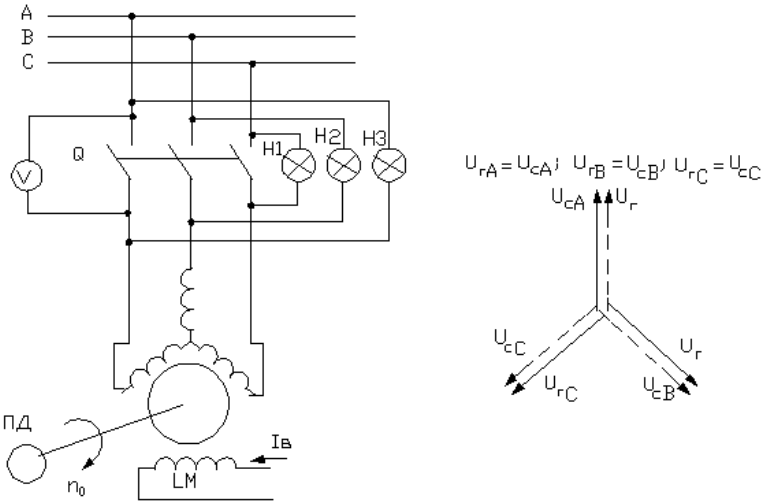
- действующие значения фазных напряжений включаемого генератора должны быть равны действующим значениям фазных напряжений сети: $U_A = U_{cA}$, $U_B = U_{cB}$, $U_C = U_{cC}$ (равенство напряжений по модулю);
- напряжения генератора и сети должны совпадать по фазе;
- частота напряжений генератора f должна быть равна частоте сети f_c;
- порядок чередования фаз генератора и сети должен быть одинаковым.

Правильное соотношение между напряжениями трех фазного генератора и трехфазной сети иллюстрируется векторной диаграммой на

рисунке 1.30

Процесс выполнения перечисленных условий при включении на параллельную работу называется *синхронизацией*.

Синхронизацию можно осуществить, используя вольтметр и лампы *Н1 – Н3*, включенные по схеме (рисунок 1.30). Равенство частот и фаз достигается изменением частоты вращения ротора, т.е. регулировкой частоты вращения приводного двигателя *ПД*. Равенство действующих значений (модулей) напряжений сети и генерптор достигается регулированием тока возбуждения $I_в$ генератора. Правильность чередования фаз обеспечивается присоединением фазных обмоток подключаемого генератора к одноименным фазам сети с тем, чтобы было соблюдено одинаковое чередование фаз: *А, В* и *С*. При выполнении условий синхронизации лампы гаснут, а стрелка вольтметра показывает нуль. В этот момент времени обмотки статора присоединяют к сети. Для включения на параллельную работу генераторов большой мощности применяются специальные схемы и устройства автоматической синхронизации.



а б

Рисунок 1.30

К пояснению включения генератора на параллельную работу

Регулирование реактивной мощности синхронного генератора возможно изменением тока возбуждения $I_в$. После включения генератора на параллельную работу ток в обмотке статора равен нулю (рисунок 1.30,а)

При этом, $U=E_0$ и напряжение генератора равно напряжению сети, т.е. , U=Uc. В этих условиях синхронная машина работает в режиме идеального холостого хода, она не отдает мощность в сеть и не потребляет

ее из сети.

Если после включения генератора на параллельную работу изменить ток возбуждения $I_в$, то изменятся магнитный поток ротора $Ф_0$ и ЭДС E_0, а между сетью и статором появится уравнительный ток I. Значения этого тока определим из выражения

$$I = (Eo - Uc)/JjXсин \qquad (1.32)$$

При работе генератора на сеть большой мощности его напряжение Ù остается неизменным и равным напряжению сети, что обусловливает и постоянство результирующего магнитного потока генератора. При увеличении тока возбуждения (перевозбуждение генератора) $E_0>U$.

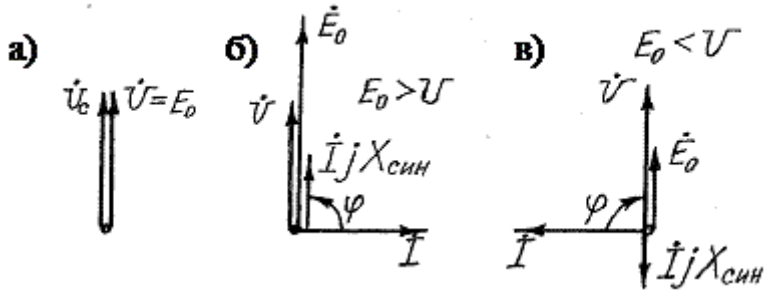


Рисунок 1.31

С учетом (1.30) вектор произведения jXсин направлен согласно с вектором напряжения *Ù* (рисунок 1.31,*б*), а уравнительный ток $\dot{I}$ отстает по фазе на 90° от вектора *Ù* , т.е. $\dot{I}$ является индуктивным током. В результате действия реакции якоря индуктивный ток $\dot{I}$ размагничивает машину и сохраняет неизменным результирующий магнитный поток. Генератор отдает в сеть реактивную мощность Q_L, которая может быть использована другими приемниками, включенными в сеть. С точки зрения воздействия на сеть генерирование реактивной мощности равносильно потреблению из сети емкостного тока, т.е. перевозбужденный синхронный генератор подобен конденсатору.

Напротив, если ток возбуждения уменьшать (недовозбуждение генератора), ток $\dot{I}$ будет опережать по фазе напряжение *Ù* на 90° (рисунок 1.31, *в*). Опережающий ток $\dot{I}$ окажет на магнитную систему генератора намагничивающее действие. Изменение фазы тока на 180° по сравнению с предыдущим случаем означает, что генератор теперь потребляет из сети

реактивную мощность, т.е. его влияние на сеть подобно действию индуктивности.

В обоих случаях угол сдвига ψ между током $\dot{I}$ и ЭДС Eo равен 90°, поэтому активная мощность P = 3EoI cosφ. Таким образом, изменением тока возбуждения можно регулировать только реактивную мощность синхронного генератора, но нельзя нагрузить его активной мощностью.

Активную мощность генератор отдает в том случае, когда, начиная от холостого хода, увеличивается вращающий момент его приводного двигателя, что достигается увеличением потребляемого им энергоносителя (воды, пара, нефти, угля и т.п.).

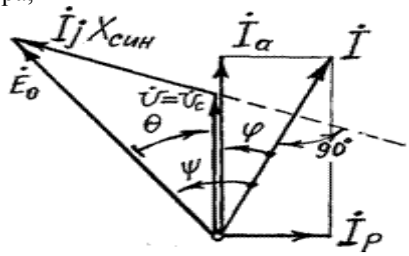


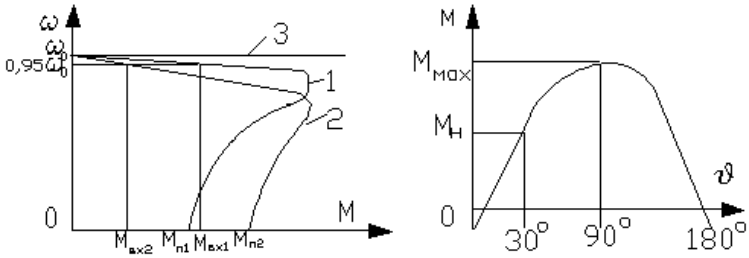
Рисунок 1.32

1.3.2 Электромеханические свойства синхронных двигателей

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии

вращающегося магнитного поля якоря и магнитного поля полюсов индуктора.

Электромеханические свойства синхронных двигателей определяются тремя характеристиками (рисунок 1.33)[13]: механической, пусковыми и угловой.



а б

Рисунок 1.33 Характеристики:
а – пусковые 1,2, механическая 3; б – угловая.

На механической характеристике двигатель работает с постоянной синхронной частотой вращения. Угловая характеристика показывает зависимость угла ϑ (угол между напряжением на статоре и ЭДС ротора) от момента нагрузки. Из анализа этой характеристики следует, что вращающий момент двигателя увеличивается по мере увеличения нагрузки до определенной величины $M_{мах}$. Превышение момента нагрузки величины $M_{ма}$ приведет к нарушению синхронного вращения поля статора и ротора (выпадению из синхронизма) и остановке двигателя.

Зависимость между моментом двигателя и углом ϑ определяется выражением.

$$M = M_{мах} \sin \vartheta . \qquad (1.33)$$

Момент двигателя при ϑ = 25 -30^0 принимается как номинальный. При этом перегрузочная способность двигателя находится в пределах

$$K_м = M_{мах}/M = 2 – 2,5.$$

Наиболее сложным режимом работы синхронного двигателя является его запуск**.** Двигатель требует разгона до частоты, близкой к частоте вращения магнитного поля в зазоре, прежде чем сможет работать в синхронном режиме. При такой скорости вращающееся магнитное поле якоря сцепляется с магнитными полями полюсов индуктора

Для разгона обычно используется асинхронный режим, при котором обмотки индуктора замыкаются через реостат или накоротко, как в асинхронной машине, для такого режима запуска в машинах на роторе делается короткозамкнутая обмотка, которая решаетдополнительную задачу - служит успокоительной обмоткой, устраняющей "раскачивание" ротора при синхронизации. После выхода на скорость близкую к номинальной (>95%), в индуктор подается постоянный ток.

В двигателях с постоянными магнитами применяется внешний разгонный двигатель.

Часто на валу ставят небольшой генератор постоянного тока, который питает электромагниты.

Также используется частотный пуск, когда частоту тока якоря постепенно увеличивают от 0 до номинальной величины. Или наоборот, когда частоту индуктора понижают от номинальной до 0, т.е. до постоянного тока.

Частота вращения ротора n,об/мин остается неизменной, жёстко связанной с частотой сети f,Гц.

На рисунке 1.33,г представлены две пусковые характеристики синхронного двигателя, одна из них 1 соответствует пуску с пониженным

начальным пусковым моментом $M_{п1}$ и значительным «входным» моментом $M_{вх1}$, под которым понимается момент, развиваемый двигателем при частоте вращения равной 0,95 $\omega_н$.

Обычно пуск синхронных двигателей (СД) состоит из трех интервалов: разбег двигателя до подсинхронной частоты вращения $\omega_п$ ($\omega_п$ = 0,95 ω_0), подача возбуждения в обмотку ротора; синхронизация с сетью.

В настоящее время в качестве источников питания системы возбуждения СД используются управляемые выпрямители (рисунок 1.34).

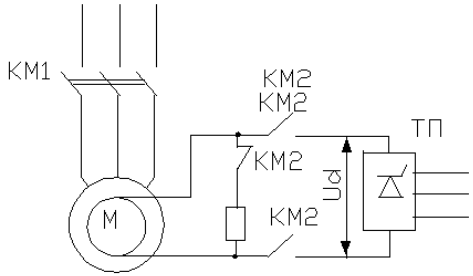


Рисунок 1.34 Схема возбуждения синхронного двигателя

В исходном состоянии нормально закрытыми контактами пускателя КМ2 обмотка возбуждения подключена к резистору.

После подключения двигателя к сети разбег до подсинхронной скорости осуществляется с помощью пусковой короткозамкнутой обмотки, заложенной в ротор.

Управление моментом подачи напряжения возбуждения контролируется по частоте вращения или тока. В момент достижения двигателем подсихронной частоты вращения ($\omega_п$ = 0,95 ω_0), замыкающими контактами КМ2 обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока ТП .

Размыкающими контактами КМ2 резистор отключается от обмотки возбуждения

В зависимости от момента подачи полного напряжения на обмотку статора СД в сочетании с подачей возбуждения в обмотку ротора существуют три вида пуска СД: прямой, тяжелый и легкий. При прямом пуске на обмотку статора подается полное напряжение сети, а цепь обмотки ротора подключается наглухо (без разрыва) к якорю возбудителя. Прямой пуск с глухо подключенным возбудителем возможен при наличии трех условий: если позволяет мощность питающей сети; если время разгона до подсинхронной скорости меньше времени самовозбуждения возбудителя, чтобы подача тока возбуждения в ротор происходила после достижения

подсинхронной скорости; если момент статического сопротивления на валу не превышает 40 % номинального момента СД,

В зависимости от мощности питающей сети, так же как в АД, применяются пуски при полном и пониженном напряжениях с использованием резисторов, реакторов и автотрансформаторов. При пуске СД высокого напряжения вместо контакторов, используются масляные выключатели.

При пуске СД со снижением напряжения питания различают легкий и тяжелый пуски. При легком пуске напряжение возбуждения подается еще при пониженном напряжении питания. Легкий пуск применяется при малых статических моментах нагрузки, потому что обеспечивает малые моменты при вхождении в синхронизм. При тяжелом пуске напряжение возбуждения подается при полном напряжении на обмотке статора. Пуск используется при больших моментах статического сопротивления, так как обеспечивает большие моменты при вхождении в синхронизм.

В производственных механизмах широкое распространение получили синхронные электроприводы средней и большой мощности. Синхронный двигатель может быть использован также и как генератор реактивной мощности в системе электроснабжения. Наличие всевозможных возмущающих воздействий приводит к отклонению параметров СД и питающей сети от их номинальных значений. Это снижает технико-экономические показатели синхронных электроприводов и вызывает колебания напряжения и частоты питающей сети.

Поэтому системы автоматического управления синхронными электроприводами должны обеспечить, с одной стороны, устойчивую работу электропривода, с другой — стабилизацию параметров питающей сети системы электроснабжения.

Кроме того, использование синхронных электроприводов для механизмов, работающих с резко переменной нагрузкой, требует применения быстродействующей форсировки тока возбуждения СД, что улучшает технико-экономические показатели электроприводов, повышает устойчивость и перегрузочную способность двигателя и снижает его установленную мощность.

Все это определило использование в синхронных электроприводах быстродействующих возбудителей с автоматическим регулированием возбуждения АРВ в зависимости от требований электропривода и системы электроснабжения.

Наличие быстродействующих возбудителей в синхронном приводе позволяет исключить выпадение синхронного двигателя из синхронизма даже при резко переменных нагрузках, превышающих максимальный момент двигателя, или при снижении напряжения в сети. Повышение перегрузочной способности синхронного двигателя в указанных случаях может быть достигнуто форсированием тока возбуждения. Один из вариантов схемы

защиты двигателя от выпадения из синхронизма при снижении напряжения в сети приведен на рисунке 1.35

Контроль напряжения в сети осуществляется с помощью реле форсировки (реле напряжения), включенного на линейное напряжение.

На рисунке 1.36 показаны угловые характеристики при пониженном (пунктирная линия) и номинальном напряжении. На рисунке 1.36 приняты обозначения:U – напряжение на статоре; $\theta = (25 \div 30^0)$ соответствует M_H.

$U_C < U_{CH}$; $U_{BH} < U_B$ – допускается в течении очень короткого времени.

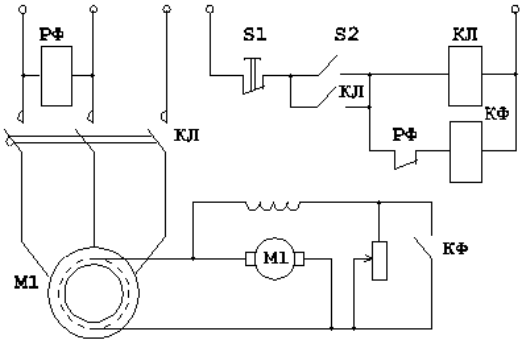


Рисунок 1.35

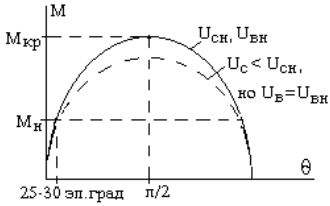


Рисунок 1.36

В исходном состоянии схемы напряжение в сети равно номинальному значению, реле форсировки находится в рабочем состоянии, блок контакт РФ реле форсировки разомкнут.

При снижении напряжения на 20% отключается реле РФ, а его нормально закрытые контакты замыкают цепь питания контактора КФ,. После срабатывания контактор КФ замыкающими контактами КФ шунтирует резистор, включенный в цепи питания обмотки возбуждения возбудителя М1. Это вызывает увеличение напряжения и восстановление перегрузочной способности двигателя приблизительно на прежний уровнь.

1.4 Силовые полупроводниковые преобразователи[10]

В настоящее время преобразователи, применяемые в электроприводах, реализуются на элементах силовой преобразовательной техники: диодах, тиристорах, полевых или биполярных транзисторах. Наиболее известными преобразователями являются неуправляемые и управляемые выпрямители, регуляторы переменного напряжения, импульсные регуляторы постоянного тока и преобразователи частоты (с непосредственной связью и с промежуточным звеном постоянного тока)

1.4.1 Выпрямители

Выпрямителями называются устройства, преобразующие переменное напряжение (ток) в постоянное напряжение (ток). С появлением тиристоров возникла необходимость их разделения на неуправляемые и управляемые.

Неуправляемые выпрямители. Эти выпрямители выполняют только одну функцию – преобразование переменного напряжения в постоянное с жесткой связью между переменными входными и постоянными выходными величинами.

Типовые схемы выпрямителей приведены на рисунке 1.37.

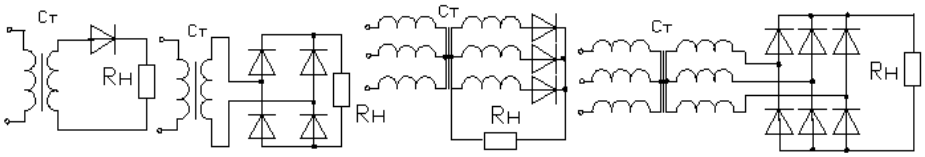
Выпрямители подразделяются:

- в зависимости от количества фаз источника питания - на однофазные (рисунок 1.37 а,б,) и трехфазные (рисунок 1.37, в.г).

- в зависимости от схемы включения вентилей и обмоток трансформатора-на однополупериодные, однофазные мостовые, трехфазные нулевые и трехфазные мостовые.

-по степени управляемости - не управляемые и управляемые.

-по типу вентилей, установленных в выпрямителях – диодные, транзисторные, тиристорные и диодно-транзисторные.



а б в г

Рисунок 1.37 Схемы выпрямителей:

а – однополупериодная; б – двухполупериодная; в – однофазная мостовая; г - трехфазная нулевая; д- трехфазная мостовая.

Существенное влияние на работу выпрямителя оказывает и характер нагрузки: активная, активно-индуктивная, наличие э.д.с в нагрузке.

Рассмотренные схемы выпрямителей различаются параметрами и характеристиками. Основные параметры и характеристики схем приведены в таблице 1,2

В таблице 3.1 приняты обозначения: I, Id , U, Ud – действующие и средние значении напряжений и токов нагрузки; $I_в$, $I_{ср.в}$ – действующее и среднее значение тока вентилей; $U_{обр}$ – максимальное обратное напряжение на вентиле; Pd, P - среднее значение мощности и мощность постоянного

тока нагрузки; $S_т$ – расчетная мощность трансформатора.

Приведенные в таблице 3.1 параметры схем выпрямления показывают:

- из однофазных схем лучшие параметры имеет однофазная мостовая;
- из трехфазных схем – трехфазная мостовая.

Таблица 1.2 Параметры и характеристики выпрямителей

Схема выпрямителя	Характеристики схем выпрямителей						
	$K_ф = \frac{I}{Id} = \frac{U}{Ud}$	U_d/U_2 U_d/U_2	$U_{об}/Ud$	η =Pd/P	$S_т/Pd$	$I_в/Icp$	$K_п = \sqrt{k_ф^2 - 1}$
Однофазная однополу-периодная	1,57	0,45	3,14	0,405	3,1	1,57	1,21
Однофазная двухполу-периодная	!.11	0,9	3,14	0,81	1,48	1,57	0,482
Однофазная мостовая	1,11	0,9	1,57	0,81	1,21	1,57	0,482
Трехфазная нулевая	1,04	0,67	2,09	0,97	1,345	1,76	0,286
Трехфазная мостовая	1,001	1,35	1,045	0,998	1,045	1,735	0,045

Управляемые выпрямители. Тиристоры в управляемых выпрямителях включаются по тем же схемам, что и диоды в не управляемых. Схемы (рисунок 1,38) с тиристорами могут работать в двух режимах: выпрямительном и инверторном. В выпрямительном режиме переменное напряжение, поступающее из сети, преобразовывается в постоянное напряжение и регулируется по величине (средней). В инверторном режиме энергия постоянного тока преобразуется в силовой части в энергию переменного тока и передается в сеть. Поток передаваемой энергии может плавно регулироваться от нуля до некоторой максимальной величины.

Оба режима широко используются в приводах постоянного и переменного тока. При работе электрической машины в двигательном

режиме схема работает в выпрямительном режиме, где с помощью системы управления тиристорами регулируется частота вращения двигателя и скорость движения рабочего механизма. Возможность работы схемы в инверторном режиме позволяет реализовать наиболее экономичный режим торможения с передачей энергии в сеть.

В схеме, приведенной на рисунке 1.38, к тиристору периодически подводится прямое (в интервале 0- t_2) и обратное (интервале t_2 – t_3). В отличие от диода, тиристор закрыт как при прямом, так и при обратном напряжении). Если подать импульс напряжения на управляющий электрод тиристора, то он откроется, и в таком состоянии будет находиться до прерывания тока в цепи анод-катод или снижения его до некоторой небольшой величины, называемой током удержания.

В схеме, приведенной на рисунке 1.38, управляющий импульс подан при прямом напряжении на аноде тиристора (момент t_1). Тиристор откроется и останется в открытом состоянии и после исчезновения импульса при условии, что ток в цепи анод – катод будет больше тока удержания. В конце положительного полупериода после снижения тока нагрузки до величины тока удержания тиристор закрывается, и в таком состоянии он будет находиться до поступления очередного управляющего импульса. С момента t_3 процесс повторяется. Очевидно, что с изменением момента подачи управляющего импульса будет изменяться часть положительной полусинусойды, пропускаемой к нагрузке, и среднее значение выпрямленного напряжения Ud. Интервал времени от начала положительной полусинусойды до фронта импульса, выраженный через угол α, называется углом регулирования управляющих импульсов.

В однофазных схемах выпрямления зависимость выпрямленного напряжения от угла регулирования α, определяется уравнением

$$U_d = U_{d0}\frac{1+Cos\alpha}{2},$$

где U_{d0} – максимальное выходное напряжение выпрямителя (В однополупериодной схеме $U_{d0} = 0{,}45E_{2ф}$, в однофазной мостовой - $U_{d0} = 0{,}9E_{2ф}$).

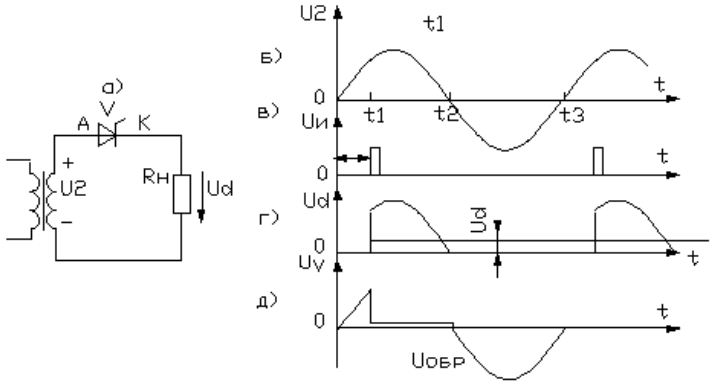


Рисунок 1.38 Схема (а) и диаграммы напряжений (б, в, г, д), поясняющие работу схемы.

Инверторы, ведомые сетью или зависимые инверторы. Работа однополупериодной схемы в инверторном режиме поясняется диаграммами напряжений и токов, приведенными на рисунке 1.39. Схема может работать в инверторном режиме при наличии источника постоянного тока в цепи нагрузки и если полярность напряжения этого источника имеет прямое направление относительно тиристора.

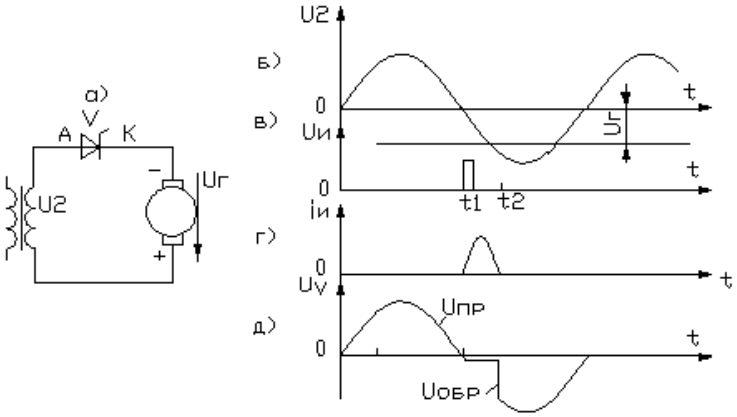


Рисунок 1.39 Схема (а), диаграммы напряжений и токов (б, в, г,д), поясняющие работу однополупериодной схемы в инверторном режиме.

Работа схемы рассматривается с момента t_1. В этот момент открывается тиристор и через вторичную обмотку протекает ток, источником которого является генератор. Одновременно с нарастанием тока в силовой

цепи увеличивается встречное напряжение U_2 на вторичной обмотке трансформатора. В момент t_2 $U_2 = U_г$, но за счет электромагнитной энергии, накопленной в индуктивностях, прямое напряжение на тиристоре и его

открытое состояние сохраняется еще некоторое время. Поэтому тиристор закрывается не в момент t_2, а несколько правее этой точки.

В процессе перемагничивания сердечника трансформатора током, источником которого является генератор, на первичной обмотке трансформатора наводится ЭДС, превышающая напряжение сети, т.е в течении открытого состояния тиристора энергия от генератора передается в питающую сеть. Очевидно, что при изменении момента открывания тиристора в интервале $t_1 - t_2$ будет изменяться среднее значение тока и количество энергии, передаваемой в сеть.

Однополупериодная схема позволяет наглядно представить процесс преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока и регулирования потока энергии, передаваемого в сеть. Но из очевидных недостатков эта схема не находит практического применения. Этих недостатков лишена трехфазная мостовая схема. В ней требуемый диапазон регулирования управляющих импульсов не превышает 90^0, а ток в силовой цепи имеет непрерывный характер. С помощью инверторного режима в приводах постоянного тока реализуется наиболее экономичное торможение – торможение с передачей энергии в сеть.

Системы управления тиристорами. Регулирование выходных величин управляемых выпрямителей, инверторов ведомых сетью, преобразователей переменного напряжения и преобразователей частоты с непосредственной связью, осуществляется устройствами, формирующими управляющие импульсы и изменяющими их положение в пределах периода напряжения питающей сети. Они называется системами импульсно-фазового управления (СИФУ). В общем случае в этом устройстве осуществляется синхронизация работы с питающей сетью, формирование управляющих импульсов с требуемыми параметрами и регулирование их фазы. Надежная работа и другие показатели преобразователя в значительной мере обязаны СИФУ. К ней предъявляется ряд требований. Одни из них определяются свойствами тиристоров, другие зависят от схемы включения тиристоров, режима работы преобразователя и характера нагрузки.

Основными параметрами СИФУ являются: амплитуда тока, крутизна фронта, длительность и диапазон регулирования управляющих импульсов.

Ток и напряжение управляющих импульсов должны иметь величины, при которых открываются все тиристоры данной серии, установленные в схеме. С другой стороны мощность потерь в управляющей цепи не должна превышать допустимых пределов.

Требуемая длительность управляющих импульсов зависит от характера нагрузки и схемы включения тиристоров. В схемах с активно-индуктивной нагрузкой длительность импульсов должна быть больше

времени нарастания тока нагрузки до величины тока удержания. В трехфазной мостовой схеме цепь нагрузки замыкается при одновременном открывании двух тиристоров, находящихся в различных группах. Это условие выполняется при управлении тиристорами широкими импульсами длительностью 65-70^0, или узкими сдвоенными, сдвинутыми на 60^0.

Требуемая крутизна управляющих импульсов находится в пределах 0,2- 2 А/мкс. Более высокая крутизна необходима при параллельном и последовательноя соединении вентилей.

Требуемый диапазон регулирования управляющих импульсов зависит от схемы включения тиристоров и характера нагрузки. В однофазных выпрямителях для регулирования выпрямленного напряжения от нуля до максимального значения необходим диапазон регулирования угла α 180^0. В трехфазной нулевнй схеме с активной и активно-индуктивной нагрузклй требуемый диапазон составляет соответственно 150^0 и 90^0 , в трехфазной мостовой с хеме при тех же услвиях максимальный диапазон составляет 120^0 и 90^0.

В трехфазных схемах управляющие импульсы, поступающие к тиристорам, смещены на 120^0 (в трехфазной нулевой схеме) или на 60^0 (в трехвазной мостовой схеме). Смещение управляющих импульсов, поступающих к тиристорам, осуществляется на вторичных обмотках синхронизирующего трансформатора. Отклонение интервалов между выходными импульсами каналов СИФУ, указанных значений, называется асимметрией управляющих импульсов. Она ведет к неравномерности нагрузки тиристоров и колебаниям выпрямленного напряжения и тока. Неравномерная нагрузка может привести к выходу из строя наиболее нагруженного тиристора.

При работе преобразователя в замкнутых системах автоматического регулирования асимметрия импульсов может привести к неустранимым колкбаниям и потере работоспособности системы в целом.

В настоящее время существует множество вырианто СИФУ, отличающихся, в основном, устройством узлов фазосмещения и формирования управаляющих импульсов. Наибольшее применение получила СИФУ с так называемым «вертикальным» принципом управления. В электроприводах с компьтерным управлением применяются цифровые СИФУ.

Функциональная схема СИФУ с вертикальным управлением приведена на рисунке 1.40.

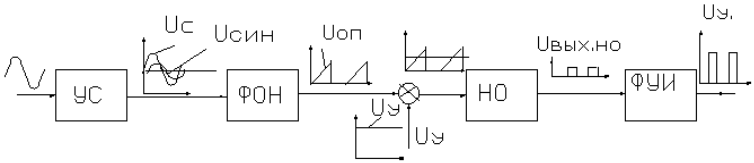


Рисунок 1.40 Функциональная схема СИФУ с вероткальным управлением. УС – узел синхронизации, ФОН – формирователь опорного напряжения, НО – нуль орган, ФУИ – формирователь управляющих импульсов.

В устройстве синхронизации УС устраняются искжение напряжения, поступающего от сингронизирующего трансформатора, и смещение синхронизирующего напряжения $U_{син}$ относительно анодного U_c. Необходимость последнего возникает в трехфазных выпрямителях, где начало диапазона регулирования управляющих импульсов, находится в точке естественной коммутации. В устройстве ФОН формируется опорное напряжение пилообразной или синусоидальной формы. Линейный интервал опорного напряжения (рабочий интервал) синхронизируется с определенной фазой питающего напряжения. В однофазных выпрямителях эта точка находится в начале положительного полупериода анодного напряжения. В трехфазных выпрямителях начало рабочего фронта находится в точке естественной коммутации вентилей.. На вход нуль - органа НО поступают опорное напряжение $U_{оп}$ и напряжение управления U_y. В момент их сравнения выходной сигнал нуль - органа НО переводит ФУИ из ждущего в режим формирования управляющего импульса.

Фронт управляющих импульсов совпадает с моментом сравнения опорного и управляющего напряжений. При изменении управляющего напряжения U_y сдвигается момент его сравнения с опорным напряжением в пределах периода напряжения сети и, соответственно, фаза управляющих импульсов.

Зависимость угла регулирования управляющих импульсов α от величины напряжения управления U_y определяется формой рабочего фронта опорного напряжения. При линейном рабочем фронте $\alpha = K \cdot U_y$. При использовании в качестве рабочего фронта части синусоиды зависимость угла регулирования α от величины управляющего напряжения определяется уравнением

$$\alpha = \arcsin \frac{Uy}{Um},$$

где U_m – амплитуда опорного напряжения.

Зависимость $\alpha = f(U_y)$ влияет на регулировочную характеристику управляемого выпрямителя $U_d = f(U_y)$. При линейном опорном напряжении регулировочная характеристика не линейна и наоборот.

На рисунке 1.41 приведена схемная реализация одного из каналов

шестиканальной СИФУ с «Вертикальным» управлением.

Работа схемы рассматривается от начала положительного полупериода синхронизирующего напряжения U_c (рисунок 1.42). До этого момента выходное напряжение усилителя ОУ, работающего в режиме компаратора, имеет отрицательный потенциал и транзисторы VT_3, VT_4 закрыты. Конденсаторы C_2 и C_3 заряжены с полярностью, указанной на схеме. В начале положительной полусинусоиды транзистор VT1 закрывается и конденсатор C_1 заряжается через резистор R_2 по экспоненте. Опорное напряжение, снимаемое с конденсатора, подается на реверсивный вход усилителя ОУ. На нереверсивный вход подается отрицательное напряжение управления U_y. В момент сравнения опорного $U_{оп}$ и управляющего U_y (t_1) напряжений

изменяется полярность выходного напряжения компаратора, открывается транзистор VT_2 и разрядным током конденсатора C_2 транзистор VT_3 переводится в открытое состояние. В образовавшейся замкнутой цепи находится конденсатор C_3 и первичная обмотка импульсного трансформатора

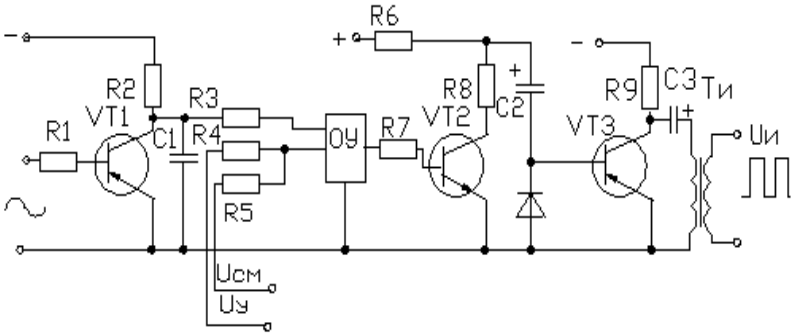


Рисунок 1.41 Схема канала СИФУ с вертикальным управлением

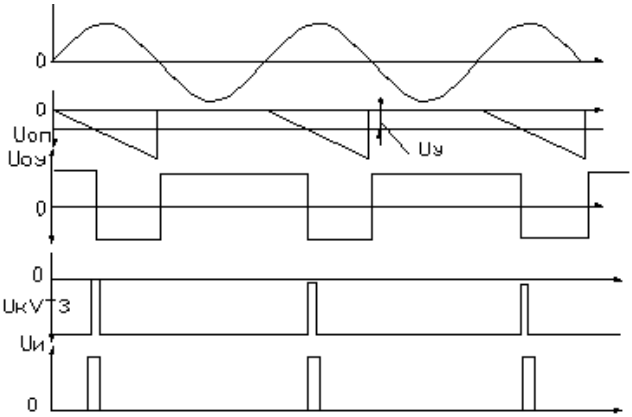


Рисунок 1.42 Диаграммы напряжений, поясняющие работу СИФУ

При разряде конденсатора на вторичной обмотке наводится ЭДС., которая и является управляющим импульсом. База транзистора VT_3 подключена через диод к аналогичной цепи в смежном канале СИФУ. В момент формирования управляющего импульса в смежном канале через диод на вход транзистора VT_3 подается отпирающее напряжение и формируется подтверждающий импульс.

При изменении величины управляющего напряжения U_y изменяется момент ее сравнения с опорным напряжением и фаза управляющих импульсов. В рассмотренной схеме диапазон регулирования угла α составляет около 180^0.

Схемное решение формирователя импульсов может быть использовано

для управления запираемыми тиристорами. Формирование импульсов за счет внутренней энергии, накопленной на конденсаторах C_2 и C_3, позволяет использовать их для создания мощных импульсов при относительно небольшой мощности источников питания.

Пример 1.4 Для преобрзователя в системе в системе ТП-Д **р**ассчитать и выбрать элементы силовой части преобразователя: согласующий трансформатор и тиристоры.

Основные технические данные двигателя: $U_н$ = 220 В; I_y = 745 А; Iмах = 2,5 I_y.

Основные соотношения, и параметры трехфазной мостовой схемы:

$K_U = 0{,}427$; $K_S = 1{,}045$; $K_{I2} = 0{,}817$; $K_a = 3$.

Расчетная схема преобразователя приведена на рисунке 2.24.

ЭДС $E_{2ф}$ на вторичной обмотке трансформатора

$$E_{2ф} = Ku \cdot K_c \cdot K\alpha \cdot K_R \cdot U_н, \qquad (1.34)$$

где K_c – коэффициент, учитывающий возможность снижения напряжения в питающей сети (при снижении напряжения на 5 – 10% K_c = 1,05 – 1,1); K_R - коэффициент, учитывающий падение напряжения внутри преобразователя (K_R = 1,05 – 1,1); $K\alpha$ - коэффициент, учитывающий неполное открывание тиристоров при минимальном угле регулирования ($K\alpha$ = 1 – 1,15. После подстановки коэффициентов получаем

$$E_{2ф} = 0{,}427 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}1 \cdot 220 = 125 \text{ В}.$$

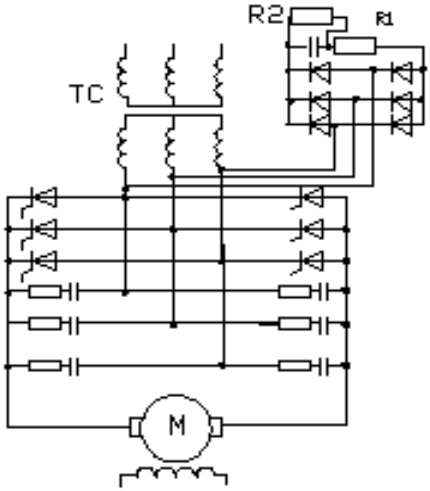


Рисунок 1.43 Расчетная схема одного комплекта тиристорого преобразователя.

Действующее значение фазного тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_{2ф} = Ki \cdot KI2 \cdot I_н, \qquad (1.35)$$

где Ki – коэффициент, учитывающий отклонение форма тока от

прямоугольной (Ki = 1,05 – 1,1). Принимаем Ki = 1,1, тогда

$$I_{2ф} = 1,1 \cdot 0,817 \cdot 745 = 669 \text{ А}.$$

Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора

$$I_{1ф} = 1,1 \;\; 0,817 \cdot 745 / 34 = 19.7\text{А},$$

где $K_{тр} = 0,95\, U_{1ф} / E_{2ф} = 0,95 \cdot 4468 / 125 = 34$
Расчетная мощность трансформатора

$$S_т = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,045 \cdot 220 \cdot 745 = 250 \text{ кВА}.$$

К установке принимаем трансформатор ТЗСП-250 с техническими данными

$$U_1 = 6000 \text{ В}; \quad U_к = 5,4\%; \quad \Delta p_к = 3 \text{ кВт};$$

Ток холостого хода в % от номинального составляет 3.
По техническим данным трансформатора определяем

$$R_{тр} = \Delta p_к / 3 \cdot I^2_1 \cdot K_{тр} \qquad (1.36)$$

$$R_{тр} = 3000 / 3 \cdot 19,7^2 \cdot 34 = 0,015 \text{ Ом}$$

$$X_{тр} = \sqrt{(Uк\% \bullet U1a / 100 \bullet I1ф \bullet K^2 тр)^2 - R^2 тр}$$

$$= \sqrt{5,4 \bullet 4468 / 100 \bullet 19,7 \bullet 34^2)^2 - 0,03^2} = 0,03 \text{ Ом}.$$

$$L_{тр.} = 0,5\, X_{тр} / \omega = 0,5 \cdot 0,03 / 314 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$$

Полученные величины параметров трансформатора необходимы для построения статических характеристик и при проектировании системы регулирования

Расчет и выбор тиристоров. Длительно допустимый ток тиристоров в трехфазной мостовой схеме определяем по формуле

$$I_п = K_{зi} \cdot K_{сх} \cdot K_{ох} \cdot I_{ср}, \qquad (1.37)$$

где $K_{зi}$ – коэффициент запаса по току (принимают в пределах 1,3 – 1,4);

$K_{ох}$– коэффициент, учитывающий условия охлаждения ($K_{ох}$ = 2,5 – при естественном охлаждении, $K_{ох}$ = 1 при принудительном охлаждении).

Величину среднего тока определяем с учетом максимально допустимой перегрузки двигателя

$$I_{ср} = I_{мах} /Ка = 2,5 \cdot 745/3 = 680 \text{ А}$$

Принимаем принудительное охлаждение.

$$I_п = 1,4 \cdot 1,1 \cdot 680 = 1047 \text{ А}.$$

Амплитуда обратного повторяющегося напряжения

$$U_п = К_{зu} \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}\, E_{2ф}, \qquad (1.38)$$

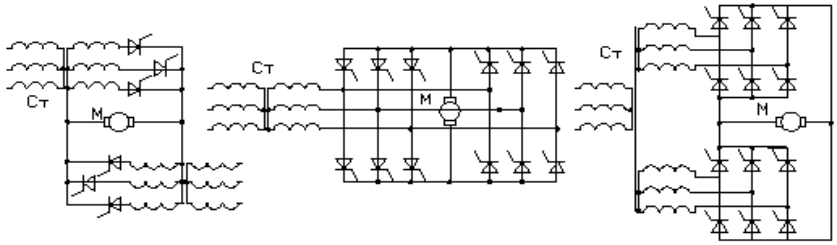
где $К_{зu}$ – коэффициент запаса по напряжению ($К_{зu}$ = 1,3 – 1,4)

$$U_п = 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 125 = 469 \text{ В}.$$

К установке принимаем тиристоры Т171 -1250, кл. 5. У этого тиристора $I_п$ = 1250 А , $U_п$ = 500В.

1.4.2 Реверсивные преобразователи

Выходное напряжение в типовых схемах включения тиристоров (рисунок 1.37) имеет одну полярность: положительную в точке соединения катодов и отрицательную - в точке соединения анодов. Выпрямители с такими свойствам называются нереверсивными. Ток в нагрузке при питании от нереверсивных выпрямителей протекает только в одном направлении. У многих потребителей (двигатели постоянного тока и др.) характер работы связан с необходимостью изменения направления тока в нагрузке. Реверсивные преобразователи могут быть созданы из двух нереверсивных схем (комплектов), соединенных определенным образом (рисунок 1.44).



а) б) в)

Рисунок 1.44 Реверсивные преобразователи с раздельным управлением: а – трехфазная нулевая схема; б – трехфазная мостовая встречно – параллельная схема; в – трехфазная мостовая перекрестная схема.

Упрощенная схема управляемого выпрямителя, подключенного к двигателю, и его характеристики приведены на рисунке 1.45. Это по сути упрощенная схема разомкнутой системы электропривода тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока (ТП-Д).

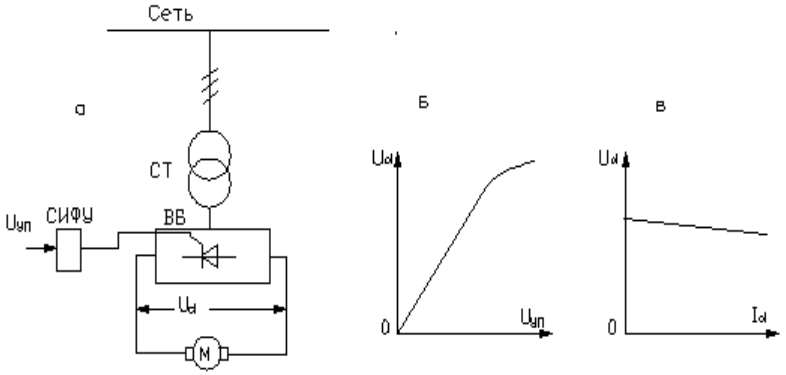


Рисунок 1.45 Электропривод: а – схема; б – регулировочная характеристика: в – внешняя характеристика.

Привод состоит из двигателя постоянного тока, и тиристорного преобразователя. В общем случае тиристорный преобразователь состоит из согласующего трансформатора СТ, вентильного блока ВБ, выполненного по одной из типовых схем. и системы импульсно-фазового управления (СИФУ).

Основными характеристиками преобразователя являются регулировочная ($U_d = f(U_{уп})$ и внешняя ($U_d = f(I_d)$.

У трехфазных схем с активно – индуктивной нагрузкой регулировочная характеристика определяется уравнением

$$U_d = E_{d0} \cos\alpha ,$$

где $E_{d0} = 2{,}34\ E_{2ф}$ – в трехфазной мостовой схеме;
$E_{d0} = 1{,}17\ E_{2ф}$ - в трехфазной нулевой схеме.

Уравнения внешних характеристик

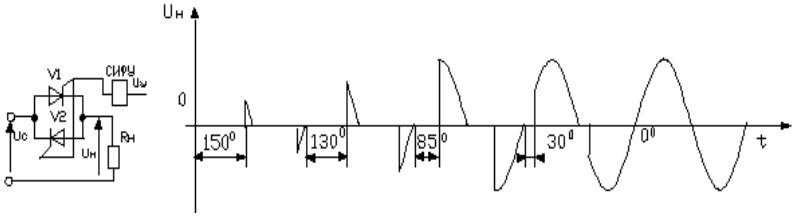
$$U_d = E_{d0} - (2r_т + 3x_т/\pi)$$ - трехфазная мостовая схема;

$$U_d = E_{d0} - (r_т + 3x_т/2\pi)$$ - трехфазная нулевая схема,

где $r_т$ и $x_т$ соответственно, активное и индуктивное сопротивления обмоток трансформатора.

1.4.3 Тиристорные регуляторы переменного напряжения

Регуляторами переменного напряжения называются устройства. преобразующие нерегулируемое переменное напряжения в регулируемое переменное напряжение. Элементной базой для реализации таких регуляторов являются силовые транзисторы или тиристоры. Наиболее простая схема тиристорного регулятора переменного напряжения (ТРН) (рисунок 1.46,а) состоит из трансформатора, двух тиристоров, включенных встречно-параллельно, и системы импульсно-фазового управления (СИФУ). Также как и в однофазных управляемых выпрямителях, для регулирования выходного (здесь действующего) напряжения используется фазовое управление, заключающееся в задержке подачи управляющих импульсов, поступающих к тиристорам, относительно начала положительной полусинусойды на аноде тиристора. Требования к СИФУ в однофазных регуляторах переменного напряжения совпадают с требованиями к ним в однофазных выпрямителях. Регулирование выходного напряжения от нуля до максимальной величины обеспечивается при изменении угла α от 180^0 до 0^0.



а б

Рисунок 1.46 Однофазный ТРН: а – схема; б- диаграмма выходного напряжения

Для регулирования переменного напряжения на трехфазной нагрузке применяются трехфазные симметричные и несимметричные схемы (рисунок 1.47) .

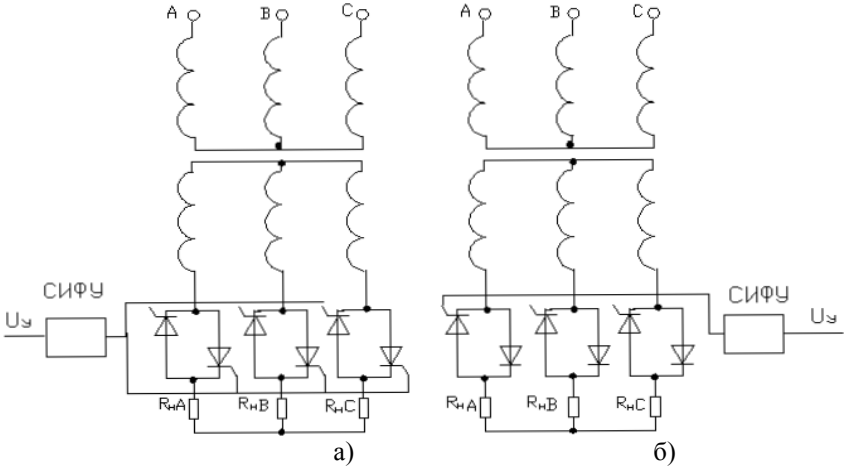


Рисунок 1.47 Трехфазные схемы ТРН: а – симметричная, б – не симметричная

Для трехфазной симметричной схемы ТРН требуется шестиканальная СИФУ со сдвигом управляющих импульсов на 60^0. Приведенное на схеме обозначение тиристоров соответствует очередности вступления их в работу. Схема каждой фазы работает как однофазный ТРН.

1.4.4 Импульсные регулятора постоянного напряжения

Сущность импульсного способа регулирования поясняется схемой и диаграммами напряжений, приведенными на рисунке 1.48.

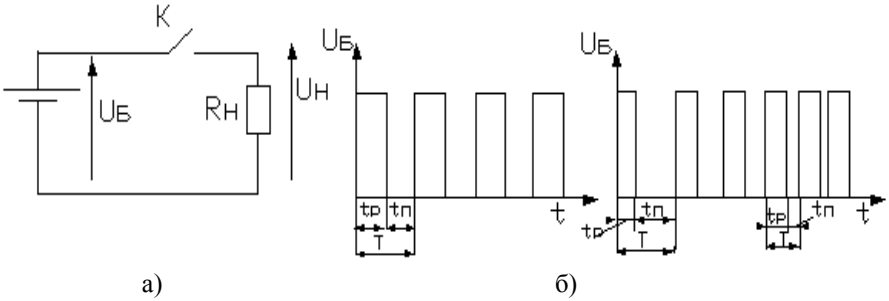


Рисунок 1.48 Импульсный регулятор:
а – схема; б – диаграммы напряжений

В схеме ключ К используется для периодического подключения и

отключения источника питания к нагрузке..

Величина среднего напряжения на нагрузке $U_н$ регулируется изменением длительности интервалов замкнутого tp и разомкнутого $t_п$ состояний ключа к

$$U_н = U_б\, t_р/T, \qquad (1.39)$$

где $T = t_р + t_п$ -длительность периода.

Изменяя длительность импульса $t_р$ или длительность периода T можно регулировать среднее напряжение на нагрузке от нуля до максимальной величины.

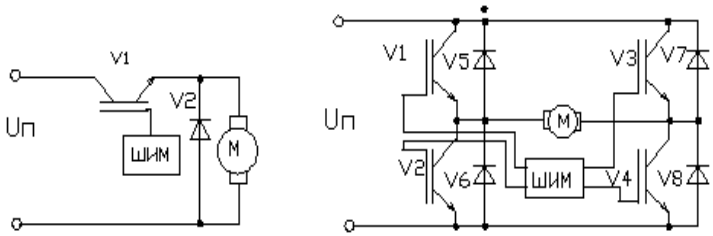
Различают три способа импульсного регулирования: широтно-импульсный (tp = Var, T=const), частотно–импульсный (tp=const, T=Var) и время импульсный (tp = Var, T=Var)

Независимо от способа регулирования среднее напряжение на нагрузке будет определяться уравнением (1.39).

Основные показатели импульсного регулятора – качество выходного напряжения, надежность работы, энергетические свойства и др. зависят от параметров и регулировочных свойств ключевого элемента.

В настоящее время в качестве ключевых элементов используются полностью управляемые элементы: запираемые тиристоры по цепи управления, полевые или биполярные транзисторы с изолированным затвором.

Силовые схемы импульсных регуляторов на биполярных транзисторах приведены на рисунке 1.49.



а) б)

Рисунок 1.49 Импульсные регуляторы на биполярных транзисторах: а – нереверсивный; б – реверсивный.

В нереверсивной схеме (рисунок 3.30,а) управление транзистором осуществляется широтно-импульсным регулятором (ШИМ), формирующим двух полярные импульсы управления транзистором. В положительных интервалах транзистор открыт и к якорю двигателя подводится напряжение Uп. Электрическая энергия, потребляемая от источника питания, преобразуется в кинетическую и тепловую энергию; часть ее запасается в

электромагнитном поле индуктивности якоря Lя.. Вследствие наличия индуктивности Lя нарастание тока происходит по: экспоненциальному закону. В течение действия отрицательных импульсов транзистор V1 закрыт и ток якоря проходит по шунтирующему диоду V2 под действием ЭДС самоиндукции e_L= Lя..di/dt. Длительность прохождения тока при закрытом транзисторе зависит от количества запасенной в индуктивности энергии, которая определяется моментом нагрузки, временем открытого состояния тиристора и частотой коммутации.

Достоинством нереверсивной схемы является малое количество силовых полупроводниковых элементов, недостатками – невозможность торможения с передачей энергии в сеть, наличие нелинейных участков в механических характеристиках.

В реверсивной схеме (рисунок 1.49,б) транзисторы включены по мостовой схеме. Здесь возможно применение трех способов управления транзисторами: диагональный, симметричный и несимметричный.

При диагональном управлении управляющие импульсы подаются к транзисторам, установленным в противоположных плечах моста (V1,V4 или V2 V3). Управляющим напряжением изменяется скважность импульсов и величина среднего значения напряжения на двигателе (рисунок 1.49) Полярность напряжения, подводимого к двигателю, зависит от того, к каким транзисторам подводится управляющие импульсы. Здесь ток якоря может быть прерывным и непрерывным.

Основной областью применения импульсных регуляторов являются машины и механизмы, получающие питание от контактной сети: двигатели рудничных электровозов, трамваев, троллейбусов и т.п. Широтно-импульсная модуляция широко используется в преобразователях частоты с промежуточным звеном постоянного тока.

1.4.5 Автономные инверторы и преобразователи частоты

Автономные инверторы - устройства на полупроводниковых вентилях (тиристорах или транзисторах), предназначенные для преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока. Работают инверторы, как правило, на автономную нагрузку. В зависимости от характера электромагнитных процессов, протекающих в инверторах, они подразделяются на инверторы тока, напряжения и резонансные. В зависимости от числа фаз на выходе инвертора они подразделяются на однофазные и трехфазные. Инверторы тока и напряжения являются основным звеном преобразователей частоты, широко применяемых в различных областях техники.

Различают преобразователи частоты с непосредственной связью и преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока

Функциональная схема преобразователя частоты с промежуточным

звеном постоянного тока приведена на рисунке 1.50.

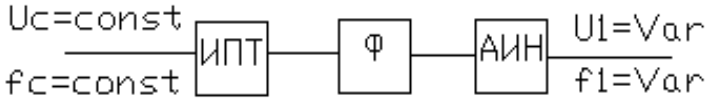


Рисунок 1.50 Функциональная схема преобразователя частоты спромежуточным звеном постоянного тока

Схема содержит источник постоянного тока ИПТ (чаше всего управляемый выпрямитель), фильтр Ф и автономный инвертор АИН. Особенностью преобразователя является двойное преобразование энергии. ИПТ преобразует энергию переменного тока в энергию постоянного тока. Затем автономный инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное с постоянной или регулируемой частотой. В работе АИН, выполненного по трехфазной мостовой схеме, много общего с управляемым выпрямителем: в течение каждого периода выходного напряжения инвертора все вентили поочередно переходят в открытое и закрытое состояние, длительность их открытого составляет 120^0.

Отличительной особенностью инверторов с промежуточным звеном постоянного тока является отсутствие источника переменного напряжения на стороне нагрузки, обеспечивающего естественную коммутацию тиристоров в инверторах, ведомых сетью. При использовании в инверторах не запираемых тиристоров, применяются узлы принудительной коммутации. Эти узлы, в общем случае, содержат дополнительные тиристоры, коммутирующие конденсаторы и индуктивности. Обратное запирающее напряжение формируется в процессе разряда коммутирующего конденсатора. В процессе эксплуатации АИН на не запираемых тиристорах было установлено множество недостатков. Основные из них: низкая надежность работы, относительно большие габариты узлов принудительной коммутации и др., что препятствовало их широкому применению После создания большого количества разновидностей запираемых вентилей, инверторы с принудительной коммутацией стали не конкурентоспособными.

В настоящее время в АИН применяются запираемые вентили: полевые тиристоры с изолированным затвором (MOSFET), биполярные тиристоры с изолированным затвором (IGBT) и запираемые тиристоры (GTO и IGCT).

На рисунке 1.51 приведена схема преобразователя частоты с биполярными транзисторами IGBT в АИН.

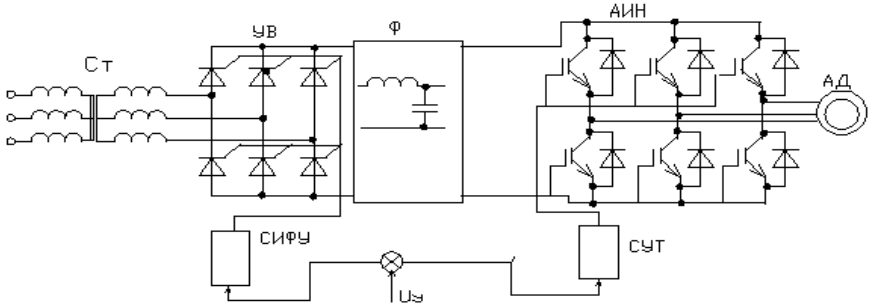


Рисунок 1.51 Автономный инвертор с промежуточным звеном постоянного тока

На вход управляемого выпрямителя УВ поступает переменное напряжение сети Uc с частотой f_c. На выходе УВ напряжение сети преобразуется в напряжение U_u постоянного тока, величина которого регулируется сигналами управления, поступающими на УВ от блока управления выпрямителем (СИФУ). Выход УВ непосредственно связан с входом инвертора АИН, который преобразует поступающее на его вход напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока. Частота f_1 выходного напряжения U_1 зависит от управляющего сигнала, поступающего на инвертор АИН от блока управления инвертором (СУТ). Управляющие сигналы, поступающие на СИФУ и СУТ, формируются в блоке задания скорости БЗС напряжением U_3, соответствующим заданной скорости. Таким образом, на статорные обмотки двигателя поступает напряжение, амплитуда которого формируется управляемым выпрямителем, а частота — инвертором, т.е. можно независимо регулировать частоту и амплитуду питающего напряжения, что является существенным преимуществом по сравнению с НПЧ.

Схема выпрямителя выбирается из условия обеспечения требований: по регулированию выходного напряжения; влияния на источник переменного напряжения, питающего ПЧ; допустимому уровню пульсаций выпрямленного напряжения и др. При питании ПЧ от промышленной сети выпрямитель чаще всего выполняется по трехфазной мостовой схеме. Для уменьшения пульсаций напряжения на выходе выпрямителя устанавливается фильтр Ф, основные функции которого заключаются в максимальном уменьшении напряжения высших гармоник при минимальном ослаблении первой основной гармоники выходного напряжения. Существует большое разнообразие фильтров: в АИН фильтр должен иметь емкостной, в АИТ - индуктивный..

В ПЧ с регулируемой в широком диапазоне частотой выходного напряжения, предназначенных для питания асинхронных двигателей, звено инвертора выполняется, как правило, по схеме АИН.

В ПЧ наряду с регулированием частоты требуется регулировать уровень выходного напряжения. В зависимости от схемы инвертора, входящего в ПЧ, могут быть использованы различные схемы регулирования выходного напряжения. Их можно разделить на следующие группы:

Регулирование напряжения на входе.

Регулирование путем воздействия на процессы в инверторе, влияющие на выходное напряжение.

Способы первой группы основаны на пропорциональности выходного напряжения инвертора входному напряжению. Они применяются в том случае, когда источником постоянного тока является управляемый выпрямитель.

В АИН регулирование выходного напряжения наиболее целесообразно осуществлять путем изменения длительности проводящего состояния ключей инвертора, используя для этого различные способы модуляции напряжения, например, широтно-импульсную модуляцию (ШИМ). Этот способ модуляции основан на непрерывном изменении (модуляции) по заданному закону (например, синусоидальному) длительности высокочастотных импульсов несущей частоты $t_и$ = 1/Ти, образующих кривую выходного напряжения инвертора (рисунок 1.52). Закон модуляции должен обеспечить получение заданной амплитуды основной гармоники выходного напряжения.

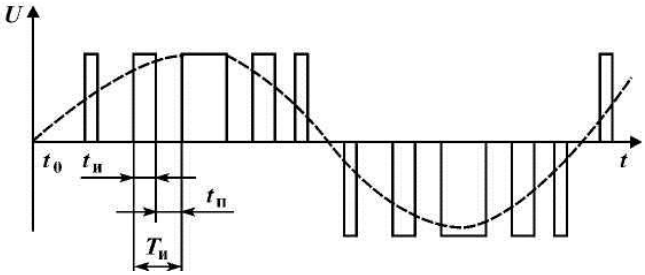


Рисунок 1.52 График напряжения на выходе преобразователя частоты с ШИМ

высокочастотных импульсов несущей частоты $t_и$ = 1/Ти, образующих кривую выходного напряжения инвертора (рисунок 1.52). Закон модуляции должен обеспечить получение заданной амплитуды основной гармоники выходного напряжения.

Содержание высших гармоник в выходном напряжении инвертора при использовании ШИМ сводится к минимуму, если использовать модуляцию по синусоидальному закону. При этом роль выходных фильтров в обеспечении синусоидальности напряжения сводится к минимуму, поскольку относительное содержание высших гармоник очень мало.

Основные ограничения в использовании способа ШИМ заключаются в сложности систем управления ключевыми элементами. Кроме того, требуются полностью управляемые ключевые элементы, способные функционировать на высоких частотах, т.е. с малыми интервалами времени включения и выключения. Такие технические решения стали практически осуществимыми лишь недавно — с появлением ключевых элементов, обладающих очень высоким быстродействием (IGBT и др.), и микропроцессорных устройств управления ими.

1.4.6 Регуляторы

Регуляторами называются устройства, предназначенные для формирования управляющих и корректирующих воздействий, ограничения координат и др.

Аналоговые регуляторы (рисунок 1.53,а) реализуются на операционных усилителях путем включения в их решающие цепи (входную и обратную) дополнительных элементов $Z_{вх}$, $Z_о$, в качестве которых могут быть резисторы, конденсаторы, полупроводниковые элементы и др.

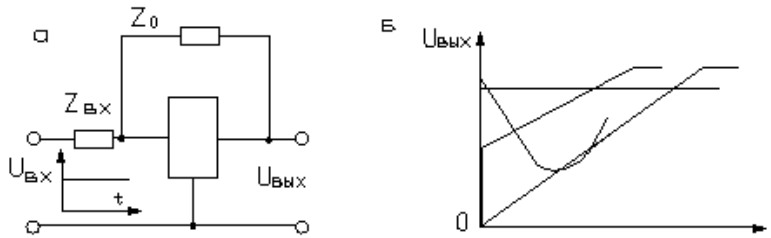


Рисунок 1.53 Регуляторы: а – схема регулятора; б – переходные характеристики при различных свойствах и схемах включения дополнительных элементов (при ступенчатом входном воздействии)

В САР электроприводов в основном применяются пропорциональные (П), интегральные (И), пропорционально-интегральные (ПИ) и пропорционально – интегрально - дифференциальные регуляторы (ПИД).

Схемы этих регуляторов приведены на рисунке 1.54 .Пропорциональный регулятор (рисунок 1.54 а) получается при $Z_{вх} = R_{вх}$, $Z_о = R_о$. Передаточная функция пропорционального регулятора

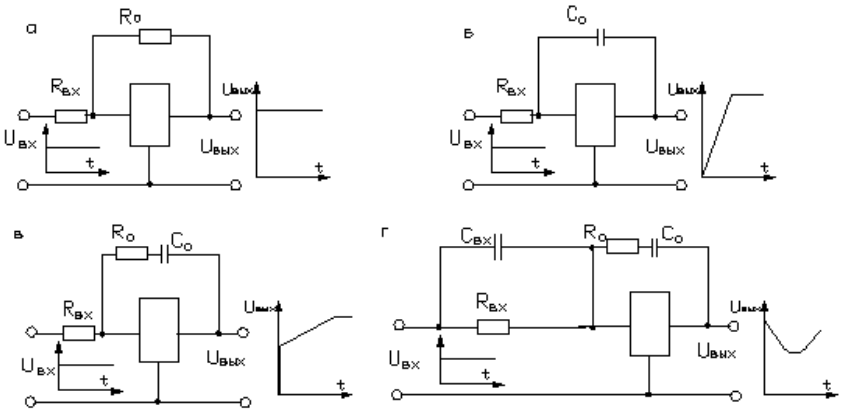


Рисунок 1.54 Схемы регуляторов на операционных усилителях:

а – П – регулятор; б – И-регулятор; в – ПИ – регулятор; г – ПИД – регулятор.

$$W_{пр}(P) = \frac{Z_o}{Z_{вх}} = \frac{R_o}{R_{вх}} = K_p \qquad (1.40)$$

Для получения интегрального регулятора (рисунок 3.3,б) необходимо в цепь обратной связи включить конденсатор C_0. Передаточная функция регулятора

$$W_{ир}(P) = \frac{Z_o}{Z_{вх}} = \frac{1}{pR_{вх}C_o} = \frac{1}{pT_и}, \qquad (1.41)$$

где$R_{вх}C_o = T_и$– постоянная интегрирования.

При последовательном включении резистора R_o и конденсатора C_0 в цепи обратной связи (рисунок 1.54 в) реализуется ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{пир}(P) = \frac{Z_o}{Z_{вх}} = \frac{1 + pR_0C_0}{pR_{вх}C_0} = \frac{1 + pT_1}{pT_и}, \qquad (1.42)$$

где $T_1 = R_oC_o$, $R_{вх}\ C_o$,

$T_и = R_{вх}\ C_o$ – постоянные времени.

В схеме 1.54 г

$$Z_{вх} = \frac{R_з}{C_з R_з p + 1}, \quad Z_о = \frac{R_0 C_о p + 1}{C_о p}$$

$$W_{пид.р}(P) = \frac{Z_0}{Zвх} = R_0 C_з p + \frac{R_з C_з + R_0 C_з}{R_з C_0} + \frac{1}{R_з C_0 p} \qquad (1.43)$$

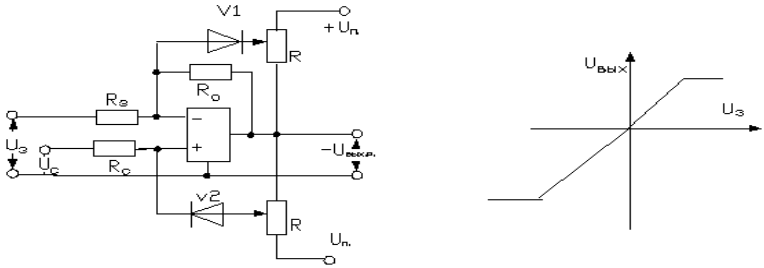
Обозначив $R_0C_1 = T_д$, $(R_зC_з + R_0C_0)/ R_зC_0 = K$, $1/ R_зC_0 = T_и$, получим передаточную функцию ПИД - регулятора

$$W_{пид.р}(P) = K + T_д P + 1/T_и P . \qquad (1.44)$$

В связи с большим коэффициентом усиления ОУ ($K_у = 3\cdot10^3 - 5\cdot10^3$) выходное напряжение регуляторов имеет область насыщения. Выходное напряжение в этой области является максимальным и не превышает напряжение источника питания. Заданное значение максимального выходного напряжения получают путем включения в цепь обратной связи усилителя стабилитронов или регулируемого опорного напряжения. Для получения пропорционального регулятора (П-регу-лятора) на вход и в цепь обратной связи ОУ включают резисторы. В интегрирующем (И-регулятор) во входную цепь включает резистор, а в цепь обратной связи — конденсатор; ПИ-регулятора во входную цепь-резистор, а в цепь обратной связи — последовательно соединенные резистор и конденсатор.

При необходимости ограничения координат электропривода (тока, скорости и др.) в структуру регулятора включают дополнительные узлы. Они могут быть управляемыми и неуправляемыми. На рисунке 1.55 приведена схема ограничения выходного напряжения пропорционального регулятора с

отсекающими диодами V1, V2 и управляемым опорным напряжением Un.



а б

Рисунок 1.55 Регулятор с регулируемым ограничением выходного напряжения: а – схема; б – характеристика.

Схема позволяет получить не симметричную относительно начала координат характеристику вход-выход с различным уровнем ограничиваемого выходного напряжения (рисунок 1.55,б). Существует множество других вариантов.

1.4.7 Задатчтки и датчики[20]

В электроприводе с помощью задатчиков производят выбор направления и величины скорости движения машины или ее механизмов. **В** зависимости от средств реализации задатчики подразделяются на потенциометрические, сельсинные и др. Схемы потенциометрических задатчиков приведены на рисунке 1.56.

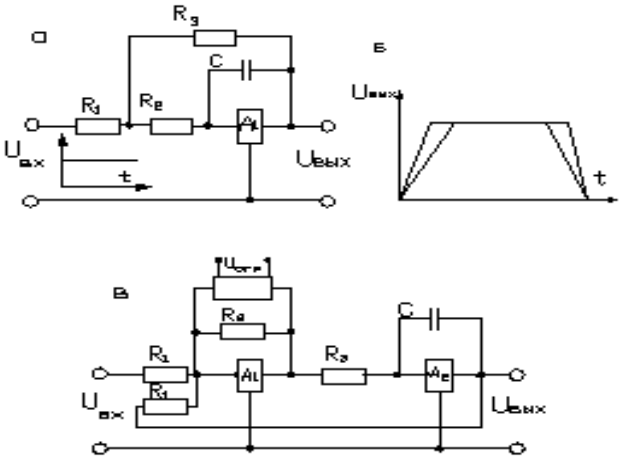


Рисунок 1.56 Задатчик интенсивности: а – схема с линейным нарастанием выходного сигнала; б – диаграммы напряжений; в –

схема с линейным нарастанием выходного сигнала и с регулируемым ограничением

Датчики Датчиками называются устройства, преобразующие физические величины (частоту вращения, температуру и др.) в электрический сигнал. В электроприводе при необходимости датчики осуществляют гальваническую развязку между силовой частью и схемой управления.

В системах электропривода применяются датчики тока, напряжения, частоты вращения и положения. В основе тих названия находятся входные величины датчиков.

Датчки тока. Основными элементами датчика постоянного тока(рисунок 1.57,а) являются шунт и усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления, называемый операционным усилителем (ОУ).

Коэффициент усиления датчика тока

$$К_{дт} = К_{ш}К_{оу} = U_{в.мах}/U_{вх.мах}$$

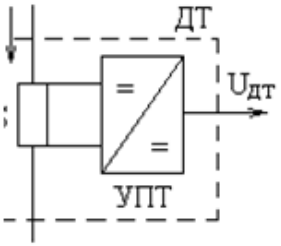
где $К_{Ш} = U_{ш}/I_{ш}$ - коэффициент шунта;

$К_{ОУ}$ – коэффициент усиления операционного усилителя

Максимальное значение выходного напряжениядатчика $U_{в.мах}$ находится в пределах 10-12 В. $U_{вх.мах} = 2U_{н.ш.} = 2\cdot 0{,}0075 = 0{,}015$.

Коэффициент усиления датчика

$$К_{дт} = (10 – 12)/ 0{,}015 = 66 – 80.$$



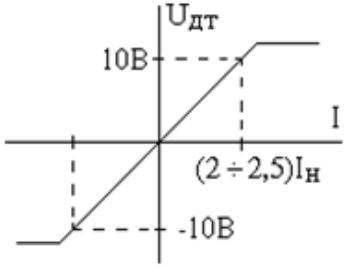


Рисунок 1.57 Датчик тока: а – схема; б –характеристика

Большое распространение получили схемы датчиков с трансформаторами тока (рисунок 1.58). Выходные напряжения трансформаторов, пропорциональные току, протекающему по вторичной обмотке, подаются на ход выпрямителя, выполненного по трехфазной

мостовой схеме. $I_d = 1{,}22 \cdot I_ф$.

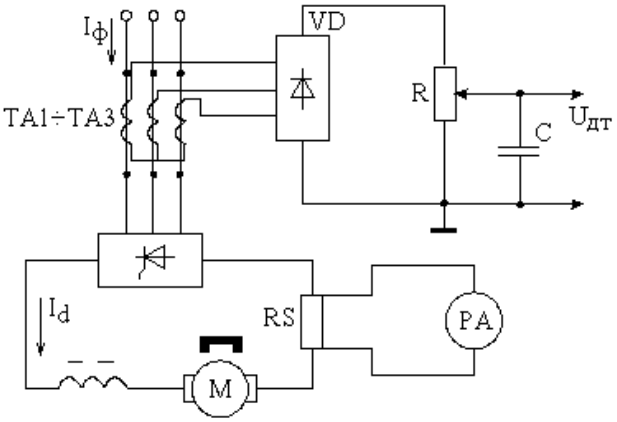
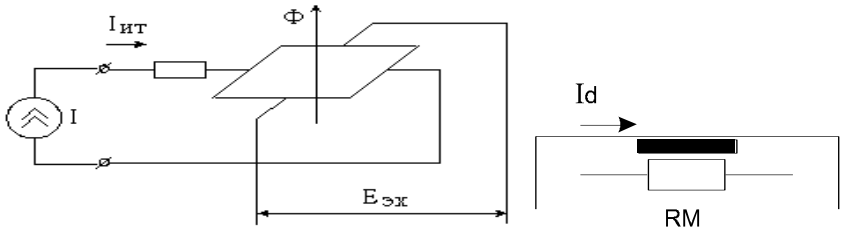


Рисунок 1.58 Датчик тока: ТА- трансформаторы тока; UD – неуправляемый выпрямитель.

Наряду с достоинствами (гальваническая развязка, большой коэффициент усиления) этот датчик имеет большой недостаток – инерционность.

На рисунке 1.59 приведена схема датчика тока с элементом Холла.



а б

Рисунок 1.59 Датчик тока с элементом Холла

Этот датчик измеряет ток косвенно по величине магнитного поля, которое создает протекающий по шине ток (Рисунок 1.59,б) $R_{RM} = f(Ф)$. Сам магниторезистор включается в цепь измерительного моста.

1.4.8 Тахогенераторы постоянного тока

В качестве датчиков частоты вращения используются микромашины (тахогенераторы) постоянного и переменного тока.

Тахогенераторы постоянного тока, также как и генераторы постоянного тока, состоят из двух основных частей – статора и ротора. Отличие имеется в конструкции щеточного аппарата и конструкции якоря. Для создания магнитного поля используются постоянные магниты или электромагниты. Графическое изображение схем и характеристик тахогенераторов показано на рисунке 1.60

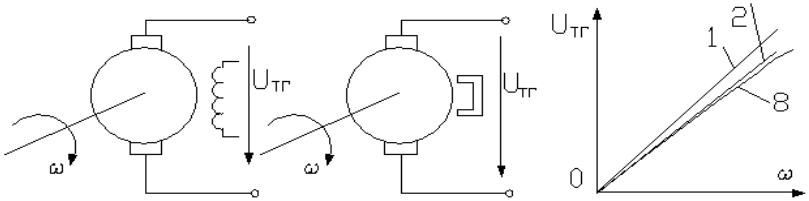


Рисунок 1.60 Тахогенератор постоянного тока: а – с электромагнитным возбуждением; б – с возбуждением от постоянных магнитов; в – выходные характеристики.

В процессе вращения якоря в магнитном поле на его витках наводится ЭДС Е, величина которой зависит от частоты вращения якоря ω и величины магнитного потока ϕ.

$$E = k\,\phi\,\omega = S\,\omega, \qquad (1.45)$$

где k – конструктивный коэффициент; S – коэффициент,

В большинстве случаев нагрузкой тахогенератора используются элементы с активным сопротивлением $R_{яц}$. После подключения нагрузки электрическое равновесие в якорной цепи примет вид

$$U_{тг} = E_{тг} - I_я R_{яц}, \qquad (1,46)$$

где $I_я$ – ток якоря; $R_{яц}$,- сопротивление якорной цепи, состоящее из сопротивления обмотки якоря и переходных сопротивлений щеточных контактов.

С учетом падения напряжения в цепи якоря внешняя характеристика тахогенератора может быть представлена в виде

$$U_{тг} = \frac{S\omega}{1 + Rя./Rн.} \qquad (1.47)$$

Из уравнений (1.46) и (1.47) следует, что при постоянном магнитном потоке с увеличением нагрузки крутизна характеристики уменьшается, но линейность сохраняется. В действительности с увеличением нагрузки возрастает размагничивающее действие реакции якоря, снижается магнитный

поток и нарушается линейность внешней характеристики тахогенератора (рисунок 1.60, в).

1.4.9 Асинхронный тахогенератор

Асинхронные тахогенераторы, также как и асинхронные двигатели имеют два вида - двухфазные и трехфазные. Есть много общего и в их конструктивном исполнении.

Схема двухфазного тахогенератора и его характеристика приведены на рисунке 1.61. На статоре тахогенератора расположены две обмотки - возбуждения и генераторная. Ротор тахогенератора имеет полую цилиндрическую конструкцию. К обмотке возбуждения подводится постоянное по амплитуде и частоте напряжение $U_{пит}$. С генераторной обмотки снимается выходное напряжение тахогенератора. Переменный ток, протекающий по обмотке возбуждения, создает в цилиндрическом роторе пульсирующий магнитный поток. При вращении ротора этот поток пересекает витки генераторной обмотки и наводит в ней эдс, являющейся выходным напряжением тахогенератора. Величина этой ЭДС пропорциональна частоте вращения ротора. Зависимость выходного напряжения от частоты вращения с учетом допущений определяется уравнением

$$U_{тг} = K_{тг} \cdot \omega,$$

где $K_{тг}$- коэфиициент , зависящий от конструкции тахогенератора и величины напряжения питания обмотки возбуждения,

ω - угловая частота вращения ротора тахогенератора.

Эта зависимость является основной характеристикой тахогенератора.

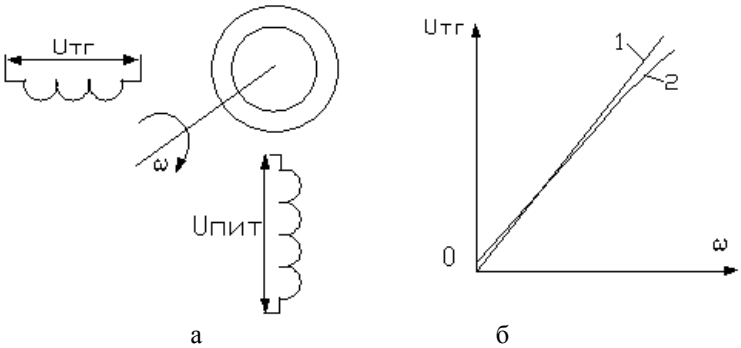


Рисунок 1.61 Асинхронный тахогенератор: а - упрощенная схема; б - характеристики (1- идеальная, 2 – реальная)

Схема подключения тахогенератора к двигателю приведена на рисунке 1.42

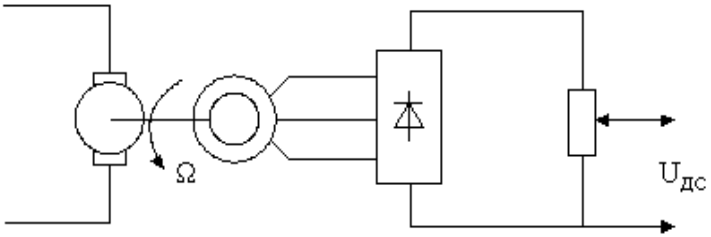


Рисунок 1.62.

Наибольшее отклонение реальной характеристики от идеальной имеет место в начале и конце характеристики. Это расхождение обусловлено множеством факторов. В процессе работы тахогенератора изменяется температура ротора и его сопротивление, что приводит к изменению величины и фазы выходного напряжения. Конструктивные погрешности статора приводят к появлению при неподвижном роторе остаточной эдс, в основном определяющей класс тахогенератора.

Преимуществом асинхронных тахогенераторов по сравнению с тахогенераторами постоянного тока являются более высокая надежность, обусловленная отсутствием скользящих контактов, и отсутствие влияния на характеристики радиопомех.

Основной областью применения асинхронных тахогенераторов является автоматизированный электропривод с невысокими требованиями к жесткости механических характеристик.

1.4.10 Импульсный датчик скорости

Схема одного из вариантов импульсного датчика приведена на рисунке1.63. На схеме датчика ВУ – вычислительное устройство; ИС – источник света (светодиодные излучатели); ПС – приемник света.

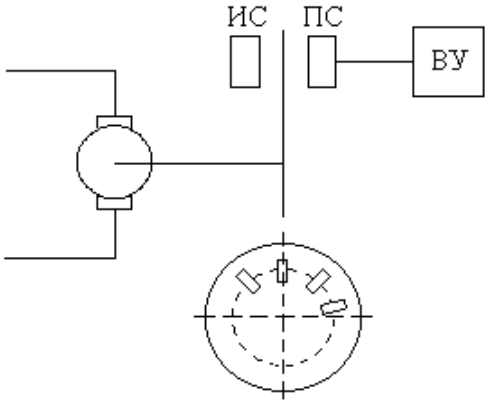


Рисунок 1.63 Схема импульсного датчика скорости

Источники света имеют невидимый спектр излучения. Количество отверстий на диске 600, 3000, 6000.

Для получения информации о направлении вращения на диске делают еще ряд перфораций, сдвинутых в пространстве на 90°, и по фазе определяют направление вращения. Тогда нужно иметь второй источник и соответственно приемник света.

1.4.11 Датчики ЭДС

Для построения системы с обратной связью по ЭДС необходим измеритель ЭДС. В приведенной схеме, ЭДС. измеряется с помощью потенциометра, а напряжение, пропорциональное току двигателя, измеряется с помощью шунта (рисунок 1.64). Приведенная схема обеспечивает зависимость в переходном процессе между $U_д$ и $e_д$

$$\gamma U_Д = \gamma \cdot e_Д + (1 + T_a P) \cdot \gamma \cdot i \cdot R_Я, \qquad (1.48)$$

где $U_д$ – напряжение на якоре; i – ток якоря; T_a – электромеханическая постоянная времени ($T_a = L_a / R_a$); L_a и R_a –

индуктивность и сопротивление якоря двигателя; $\gamma = r_{П1} / (r_{П1} + r_{П2})$ - коэффициент потенциометра $r_ш$ - сопротивление шунта якоря.

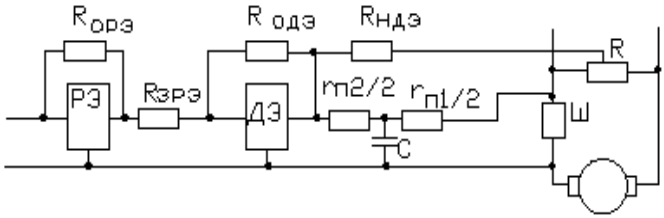


Рисунок 1.64 Схема регулятора ЭДС

На вход датчика ЭДС подаются два сигнала: отрицательный по напряжению и положительный по току. В цепи напряжения включен фильтр $R_{НДЭ} - C_{НДЭ}$, который выполняет функцию инерционного звена с постоянной времени $T_а$.

Параметры фильтра определяется из уравнения

$$C_{НДЭ} \cdot R_{НДЭ} / 4 = T_a \ .$$

Задаемся значением $C_{НДЭ} = 1 \ \ мкФ$ и определяем $R_{НДЭ}$.

$$R_{ÍÄÝ} = 4Ò_à / Ñ_{ÍÄÝ}$$

С учетом фильтра входной сигнал датчика ЭДС. по напряжению

$$\gamma U_Д \cdot \frac{1}{1 + T_a p} = \frac{\gamma \cdot e_Д}{1 + T_a p} + \gamma \cdot i \cdot R_a , \qquad (1.49)$$

Результирующий выходной сигнал датчика ЭДС, подаваемый на вход регулятора ЭДС.

$$U_{ДЭ} = -\left(\frac{\gamma \cdot e_Д}{1 + T_a p} + \gamma \cdot i \cdot R_a \right) \cdot K_{НДЭ} + i \cdot R_Ш \cdot K_{ТДЭ} ,$$

(1.50)

где $K_{НДЭ} = R_{ОДЭ} / R_{НДЭ}$; $K_{ТДЭ} = R_{ОДЭ} / R_{ТДЭ}$ - коэффициенты усиления датчики ЭДС. соответственно по цепи напряжения и по цепи тока; $R_{НДЭ}$, $R_{ТДЭ}$ - входные сопротивления датчика ДЭ по цепи напряжения и по цепи тока.

Принимаем $\gamma \cdot i \cdot R_a \dfrac{R_{ОДЭ}}{R_{НДЭ}} = iR_{ШЯ} \cdot \dfrac{R_{ОДЭ}}{R_{ТДЭ}}$ и получим

$$U_{ДЭ} = -\frac{\gamma \cdot e_Д}{1 + T_a p} \cdot K_{НДЭ}, \qquad (1.51)$$

Входное сопротивление датчика ДЭ.

$$R_{ТДЭ} = r_Ш \cdot R_{НДЭ} / (\gamma \cdot R_a), \qquad (1.52)$$

Из схемы следует, что компенсации подлежит интегральное звено $1/T_м p$. Поэтому регулятор ЭДС должен быть пропорционального типа.

Уравнение передаточной функции регулятора ЭДС

$$W_{РЭ}(p) = \frac{R_{ОЭ}}{R_{ЗЭ}} = \frac{T_M}{2T_П + T_a} \cdot \frac{K_i}{K_H}, \qquad (1.53)$$

определяем входное сопротивление регулятора

$$R_{ЗЭ} = R_{ОЭ} \cdot (2T_П + T_a) \cdot K_H / T_M \cdot K_I, \qquad (1.54)$$

где $\hat{E}_{í} = U_{ÇÝ·ÌÀX} \cdot / U_{Ä\,MAX}$;;

Выходное сопротивление по цепи обратной связи

$$R_{Ý} = \frac{\gamma}{K_{í}} \cdot \frac{R_{îÄÝ}}{R_{íÄÝ}} \cdot R_{ÇÝ};$$

где γ - коэффициент потенциометра двигателя,

2. ЭЛЕКТРОПРИВОД

2.1 Типовые схемы управления асинхронными двигателями

Типовыми схемами управления принято считать простейшие схемы управления асинхронными двигателями, основными элементами которой являются релейно - контакторная аппаратура. К этой категории электроприводов относятся нереверсивные и реверсивные схемы управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором и схемы с реостатным управлением асинхронными двигателями с фазным ротором.

В нереверсивной схеме управления двигателем (рисунок 2.1) кнопки SB1 и SB2, контакты тепловых реле РТ, катушка магнитного пускателя КМ образуют одну цепь, включенную на линейное напряжение (между двумя фазами) электрической сети, к которой подключен и асинхронный двигатель Д. В исходное состояние схема приводится включением автоматического выключателя.

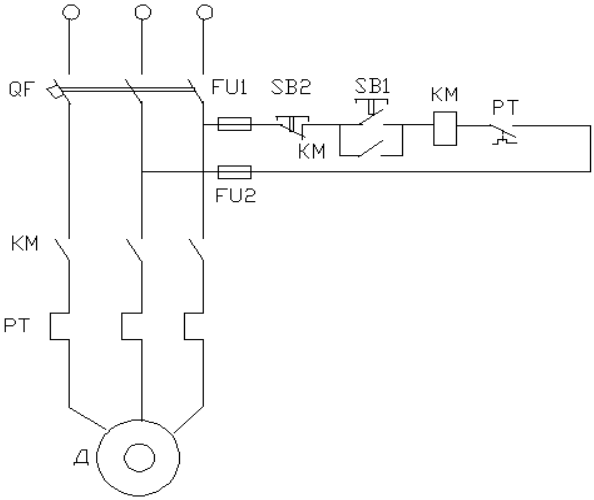


Рисунок 2.1 Типовая нереверсивная схема управления асинхронного двигателя

Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки SB1, которая своими контактами замыкает цепь питания катушки магнитного пускателя КМ. После срабатывания пускатель КМ своими силовыми контактами подключает двигатель к сети, а вспомогательный контакт КМ шунтирует

кнопку SB1. Этим обеспечивается удержание во включенном состоянии пускателя КМ после отпускания кнопки SB1.

Отключение двигателя осуществляется нажатием кнопки SB2, после чего размыкается цепь питания катушки КМ и схема приходит в исходное состояние.

При перегрузке электродвигателя срабатывает одно из электромагнитных (тепловых) реле РТ, которое размыкающими контактами РТ размыкает цепь питания катушки пускателя. При этом магнитный пускатель отключается и двигатель останавливается.

Реверсивное управление асинхронным электродвигателем с фазным ротором осуществляется двумя пускателями КМ1 и КМ2 (реверсивным пускателем). Схема с реверсивным управлением асиихронным двигателем показана на рисунке 2.2..

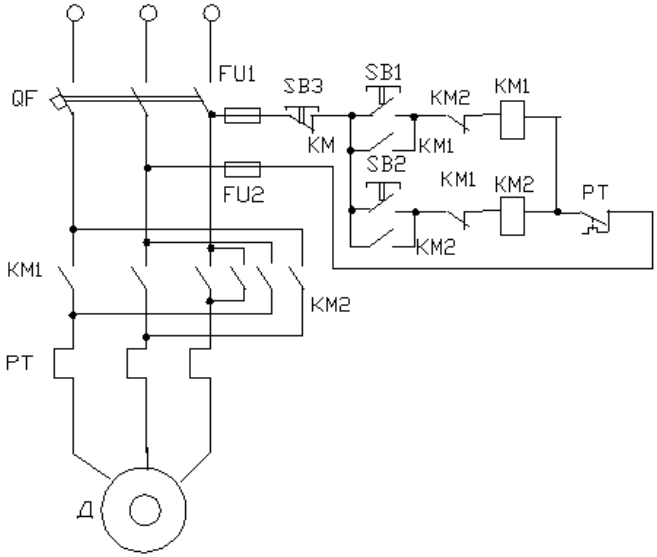


Рисунок 2.2 Реверсивная схема управления асинхронным двигателем

Цепь управления питается от той же сети, что и электродвигатель.

Кнопка отключения SB3 и контакты теплового реле находятся в общей цепи. Для включения электродвигателя Д вращением в одну сторону нажимают кнопку SB1. При этом ее контакт в цепи питания катушки пускателя КМ1 замыкается. Пускатель КМ1 после срабатывания главными контактами КМ1 подключает двигатель к сети, одними замыкающими вспомогательными контактами КМ1 размыкается цепь катушки пускателя

КМ2, другим вспомогательным замыкающим контактам шунтируется кнопка SB1. Размыкающие контакты КМ1 в цепи питания катушки КМ2 исключают возможность одновременного включения двух пускателей КМ1 и КМ2. Такое включение осуществляет электрическую блокировку.

Отключение двигателя в реверсивной схеме осуществляется также, как в не реверсивной – нажатием кнопки SB3 («Стоп»).

Для включения электродвигателя с вращением в другую сторону нажимают кнопку SB2. Далее схема работает, как и в предыдущем случае. После срабатывания пускатель КМ2 переключает две фазы двигателя и его магнитное поле будет вращаться в другом направлении.

Схема управления асинхроннымдвуигателем с фазным ротором приведена на рисунке 2.3

В силовую цепь двигателя входят автоматический выключатель QF и главные контакты магнитного пускателя КМ1. В роторную цепь двигателя включены резисторы R.

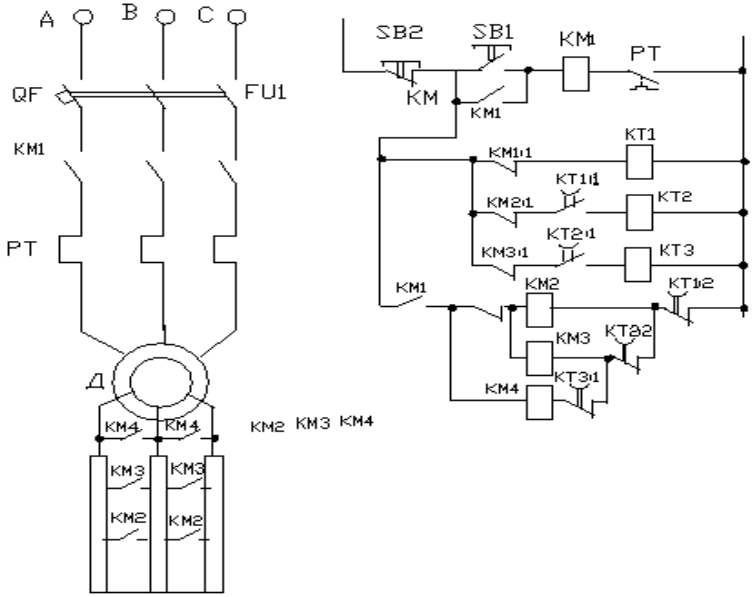


Рисунок 2.3 Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором

В цепи управления входят: кнопки *SB1* и *SB2*, контакт электромагнитного реле *PT*, катушки магнитных пускателей *KM1, KM2 — KM4* и реле времени *KT1 — KT3*. *Питание* осуществляется от той же

сети, что и силовые. Следует иметь в виду, что все реле времени срабатывают без выдержки времени, а возвращаются с выдержкой |В исходном состоянии (до включения выключателя QF) питание к цепям управления не поступает, поэтому магнитный пускатель *КМ1* и реле времени *КТ1* — *КТ3* отключены. После включения выключателя QF подводится питание к цепям управления. При этом по замкнутой контактом *КМ1:2* магнитного пускателя *КМ1* будет проходить ток через катушку реле времени *КТ1,* которое сработает, замкнув контакт *КТ1.1* и разомкнув контакт *КТ1:2 в соответствующих* цепях.

После срабатывания реле времени *КТ1* окажется замкнутой цепь катушки реле времени *КТ2,* которое сработает, замкнув контакт *КТ2:1* и разомкнув контакт *КТ2:2*. После срабатывания реле времени *КТ2* окажется замкнутой цепь катушки реле времени *КТ3,* которое сработает и разомкнет свой контакт *КТ3:1*. Т*аким* образом, после включения автоматического выключателя цепи управления перейдут в состояние готовности к пуску электродвигателя М: реле времени *КТ1* — *КТ3* будут включены, их контакты *КТ1:1, КТ2:1* — замкнуты, а *КТ1:2, КТ2:2* и *КТ3:1*- разомкнуты.

Для пуска электродвигателя *М* нажимают кнопку *SB1,* замыкающую цепь магнитного пускателя *КМ1,* который включается, замыкая свои силовые контакты, подводящие питание к двигателю, а также вспомогательный контакт *КМ1:1,* шунтирующий контакт кнопки *SB1,* и *КМ 1:3,* подготавливающий цепи . Одновременно размыкается контакт *КМ1:2* в цепи , и дальнейший процесс увеличения частоты вращения электродвигателя до нормальной происходит автоматически.

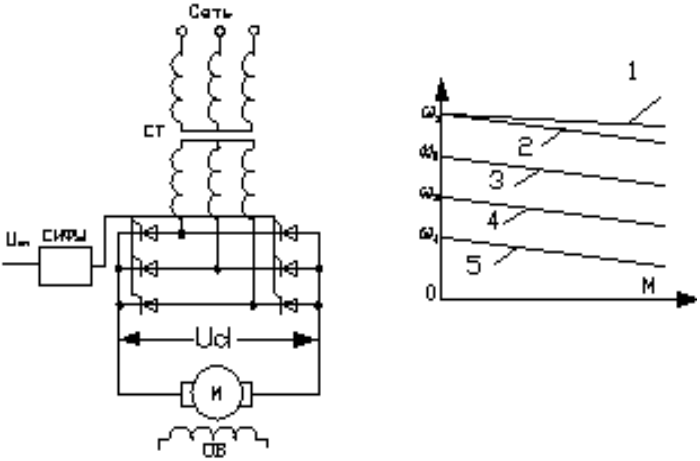
Реле времени *КТ1* вследствие размыкания цепи его катушки контактом *КМ1:2* магнитного пускателя *КМ1* через заданное время возвращается в исходное положение, замкнув контакт *КТ1:2* и разомкнув контакт *КТ1:1в* соответстветствующих цепях. Так как цепь катушки контактора *КМ2* оказывается замкнутой, контактор срабатывает, замыкая свои силовые контакты и частично уменьшая сопротивление резисторов в цепи ротора электродвигателя *М,* который начнет вращаться с большей частотой.

Размыкание контакта *КТ1:1* в цепи катушки реле времени *КТ2* приводит к тому, что реле через заданное время возвращается в исходное положение, замкнув контакт *КТ2:2* и разомкнув контакт *КТ2:1* При этом срабатывает контактор *КМ3,* который замыкает свои силовые контакты, что приводит к дальнейшему уменьшению сопротивления резисторов в цепи ротора и увеличению частоты вращения электродвигателя *М*.. Рассмотренное управление асинхронным двигателем с фазным ротором часто называют реостатным. Схемы с реостатным управлением, в отличие от схем управления двигателями с коротко-замкнутым ротором рисунки (2.1) и (2.2), обеспечивают ограничение пускового тока и регулирование угловой скорости при наличии нагрузки.

2.2 Электропривод тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока

2.2.1 Анализ работы электропривода

Упрощенная схема электропривода тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока (ТП-Д) приведена на рисунке 2.4.



а б

Рисунок 2.4 Электропривод ТП-Д: а – схема; б - характеристики

Схема состоит из тиристорного преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме, и двигателя постоянного тока М. Уравнение механической характеристики двигателя при работе в этой системе будет отличаться от уравнения естественной характеристики только наличием дополнительного сопротивления в якорной цепи (внутреннего сопротивления преобразователя).

$$\omega = \frac{Ud}{к\phi} - \frac{Rп + Rя}{к^2\phi^2}, \qquad (2.1)$$

где $U_d = E_{do}\cos\alpha$.

Поэтому жесткость всех механических характеристик в системе ТП-Д , полученных при различных величинах выходного напряжения ТП, будет также меньше жесткости естественной характеристики.. Электропривод с подобными характеристиками, как правило, не удовлетворяет требованиям рабочих механизмов, Падение скорости с увеличением нагрузки ведет к

снижению производительности, а иногда и к ухудшению качества продукции. Величина нагрузки двигателя не ограничивается приводом, В механизмах с наличием стопорного режима ток якоря и нагрузка на валу могут значительно превысить допустимые пределы.

Из уравнения (2.1) также следует, что если по мере увеличения нагрузки одновременно повышать выходное напряжение (в данной схеме изменением угла регулирования α) преобразователя, то можно получать абсолютно жесткие характеристики. Уменьшая напряжение на якоре в области перегрузок, можно ограничить ток на допустимом уровне.

Примерный вид таких характеристик приведен на рисунке 2.5. Они имеют два характерных участка горизонтальный и падающий. Жесткая механическая характеристика на горизонтальном участке достигается увеличением напряжения на якоре по мере увеличения нагрузки, а интенсивное падение угловой скорости в области перегрузок – интенсивным снижением этого напряжения.

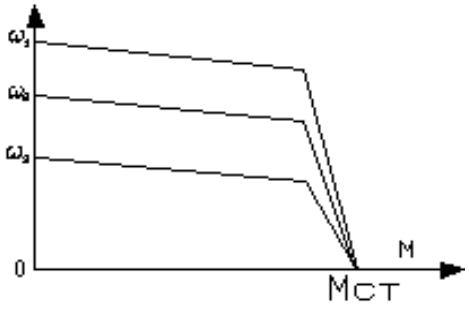
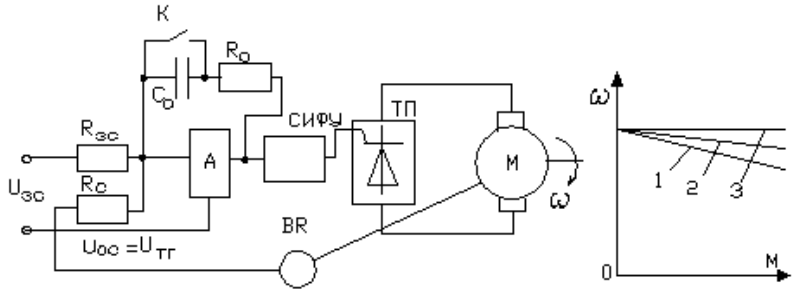


Рисунок 2.5 Примерные механические характеристики, при различных величинах напряжения на якоре двигателя

В системах электропривода, в том числе и в системе ТП-Д, формирование требуемых статических характеристик и динамических свойств осуществляют путем введения в систему регулирования корректирующих устройств (регуляторов) и датчиков, формирующих сигналы для коррекции соответствующих параметров.

Возможность стабилизации заданной частоты вращения двигателя с помощью корректирующих устройств поясняется рисунком 2.6.



а б

Рисунок 2.6 Электропривод ТП-Д: а схема; б характеристики: 1- в разомкнутой схеме; 2 – с П-регулятором; 3 – с ПИ- регулятором.

Для повышения жесткости характеристик двигателя чаще всего используют два типа регуляторов (П-регулятор и ПИ-регулятор) и датчик частоты вращения (тахогенератор), включенный в цепь обратной связи. Его входной величиной является частота вращения двигателя ω, выходной – напряжение $U_{тг}$ В начале рассмотрим работу привода с П-регулятором. (ключ К замкнут). На его вход подается разность сигналов задания $U_з$ и обратной связи по угловой частоте вращения двигателя $U_{тг}$, поступающего от тахогенератора. Выходной сигнал регулятора $U_у = (U_з - U_{тг})K_р$ подается на вход СИФУ, т.е. является сигналом управления для тиристорного преобразователя. По мере увеличения нагрузки частота вращения двигателя ω и $U_{тг}$ будут снижаться, разность сигналов ($U_з$ - $U_{тг}$) и величина $U_у$ будут соответственно возрастать, т.е. по мере увеличения нагрузки напряжение на якоре будет увеличиваться, частично компенсируя величину падения скорости $\Delta\omega$=(R_g+ R_z)I/кф.

Очевидно, что в схеме электропривода с П-регулятором жесткость характеристик тем выше, чем больше коэффициент усиления регулятора.

Однако, чем выше коэффициент усиления, тем менее устойчива система электропривода.

Для получения более высокой жесткости характеристик используют ПИ-регулятор (ключ К разомкнут). Выходной сигнал ПИ- регулятора $U_у$ возрастает при наличии напряжения на его входе. Величина этого сигнала определяется разностью напряжений $U_з$ - $U_{тг}$. В момент пуска двигателя $U_{тг}$ – 0 и под действием большой величины $U_{зс}$ выходное напряжение ПИ - регулятора будет интенсивно нарастать. Соответственно, будут увеличиваться напряжение на якоре U_d и частота вращения двигателя ω. По мере увеличения ω разность $U_з$ - $U_{тг}$ будет уменьшаться и при достижении двигателем заданной частоты вращения наступит равновесие $U_з$ = $U_{тг}$, при котором входное напряжение ПИ-регулятора станет равным

нулю, а выходное – заданной величине. При даже незначительном снижении ω двигателя на входе регулятора возникнет разность напряжений, и выходное напряжение регулятора будет возрастать до наступления равенства $U_з = U_{тг}$., при котором двигатель будет снова вращаться с заданной частотой. Из рассмотренного следует, что использование ПИ - регулятора в качестве корректирующего устройства статической характеристики позволяет получить характеристики с жесткостью, близкой к абсолютной.

Кроме требуемых статических характеристик, система электропривода должна иметь и требуемые динамические свойства, которые определяются показателями качества переходных процессов: временем регулирования $t_р$, перерегулированием $\sigma = (\omega_{мах} - \omega_{уст})/\omega_{уст}$. и колебательностью (числом колебаний в переходной характеристике). Все эти величины являются взаимозависимыми. Улучшение одного показателя ведет к ухудшению другого и наоборот. Общими требованиями к электроприводу являются:

- система должна быть устойчивой;
- отклонение действительной частоты вращения двигателя от заданной не должна превышать заданного значения;
- система должна обеспечивать необходимое качество переходных процессов (быстродействие, величину перерегулирования и число колебаний).

Как статические, так и динамические свойства привода формируются с помощью регуляторов с учетом динамических свойств основных элементов электропривода - двигателя и преобразователя. Иначе, от типа регуляторов, их динамических свойств и настройки зависят показатели качество системы электропривода.

2.2.2 Формирование статических характеристик и динамических свойств электропривода

Требуемые статические характеристики и динамические свойства системы ТП-Д получают путем введения в систему регулирования дополнительных элементов: датчиков и регуляторов. Динамические свойства электропривода определяются по характеру переходных процессов при управляющих и возмущающих воздействиях. Возможность получения требуемых статических характеристик с помощью регуляторов была рассмотрена на примере рисунка 2.6. Далее рассмотрим возможность получения с помощью регуляторов и их корректирующих свойств требуемых динамических свойств электропривода.

В системах регулирования различают два канала: прямой, по которому передается управляющий сигнал, и обратной связи. В зависимости от места включения корректирующих устройств различают схемы управления с последовательной и параллельной коррекцией.

Каждая из этих систем имеет свои достоинства и недостатки.

Стабильные характеристики в системах с параллельной коррекцией достигаются за счет звеньев, охваченных обратной связью. Схемы с параллельной коррекцией более устойчивы к помехам. Основные недостатки систем с параллельной коррекцией: сложность расчета, большая трудоемкость при наладке (при изменении одного их параметров требуется пересчитывать и изменять другие).

Достоинства систем с последовательной коррекцией:

- простые и удобные способы расчета и настройки;
- каждый контур настраивается независимо от настройки других;
- возможность и удобство ограничения различных параметров.

В системах с последовательной коррекцией различают главные и вспомогательные параметры. В электроприводе постоянного тока в большинстве случаев главным параметром является угловая частота вращения. Этот параметр является выходным для внешнего контура и сигналом задания для внутреннего контура. В многоконтурных системах выходной сигнал каждого внешнего контура является сигналом заданием для внутреннего контура. По этому признаку систему с последовательной коррекцией часто называют системой с подчиненным управлением.

2.2.3 Критерии настройки параметров электропривода

Методы настройки рассмотрим на примере системы ТП-Д с контуром тока (рисунок 2.7)[19].

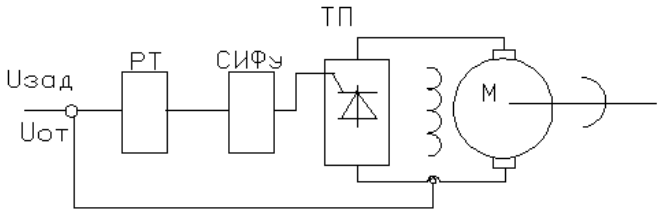


Рисунок 2.7 Функциональная схема системы ТП-Д с токовым контуром

Примем: регулятор тока является ПИ – регулятором с передаточной функцией

$$W_{рт}(P) = \frac{Кр(ТР+1)}{ТР} \qquad (2.2)$$

Объектом регулирования является электродвигатель. В контур регулирования кроме передаточной функции регулятора входит

передаточная функция электрической части двигателя (объект регулирования)

$$W_{эд}(p) = \frac{К_д}{Т_я P+1}, \qquad (2.3)$$

Передаточная функция преобразователя

$$W_п(p) = \frac{К_п}{Т_п P=1} \qquad (2.4)$$

Структурная схема электропривода с обратной связью по току приведена на рисунке 2.8.

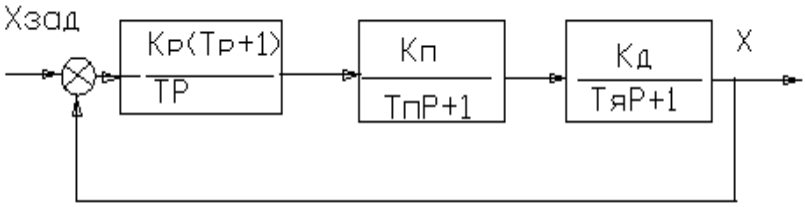


Рисунок 2.8 Структурная схема ТП-Д с токовым контуром

Объект регулирования содержит в контуре одну большую (Тя) и одну малую постоянную времени Тп.

Передаточная функция объекта регулирования

$$W_o(p) = \frac{К_o}{(Т_п P+1)(Т_я P+1)}, \qquad (2,5)$$

где $К_o = К_д \cdot К_п$.

Примем Т=Тя, тогда передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{раз}(P) = W_р(P)\, W_o(p) \qquad (2.6)$$

Передаточная функция замкнутой системы

$$W_{зам}(P) = \frac{W_{раз}(P)}{W_{раз}(P)+1} = \frac{1}{\frac{T_{Тр}}{K_{рКо}}}P^2 + \frac{T}{K_{рКо}}P + 1 \qquad (2.7)$$

Замкнутый контур в динамическом отношении является системой второго порядка

В другой форме, более удобной для анализа, уравнение 2.7 имеет вид

$$W_{зам}(P) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{20}}p2+\frac{2\xi}{\omega_{0+}}P+1} \qquad (2.8)$$

Из выражения (2.7) можно найти зависимость величины недемпфированных колебаний $\boldsymbol{\omega}_п$ и коэффициента демпфирования ξ от величин коэффициентов α и β

$$\boldsymbol{\omega}_п = \frac{1}{\sqrt{\alpha}}, \quad \xi = \frac{\beta}{2\sqrt{\alpha}} \qquad (2.9)$$

Переходные процессы при $\xi < 0$ и ступенчатом входном сигнале (колебательная система) определяются уравнением [18]

$$X(t) = 1 - \frac{1}{sin\varphi}e^{-}\,\xi\,\omega п t\ \ Sin(\sqrt{1-\xi^2}\boldsymbol{\omega}_о+\varphi) \qquad (2.10)$$

Построенные по уравнению (2.10) зависимости x(t) (в токовом контуре i(t)) при трех значениях коэффициента демпфирования ξ имеют вид, приведенный на рисунке 2.9. Из рисунка следует, что с уменьшением коэффициента демпфирования увеличиваются быстродействие и перегулирование

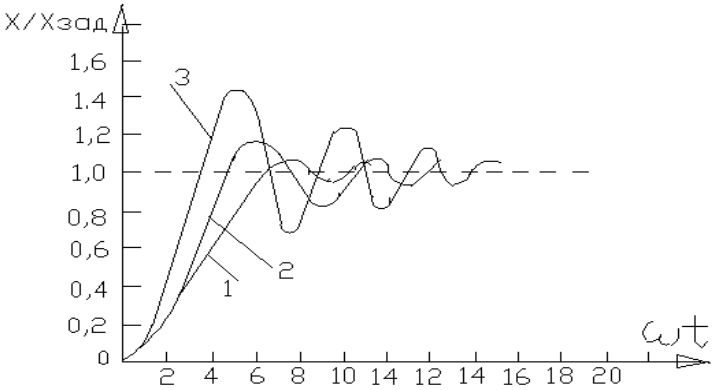


Рисунок 2.9 Переходные характеристики при различных

коэффициентах демпфирования: 1- $\xi_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}$; 2 = $\xi_2 < \xi_1$; 3 - $\xi_3 < \xi_2$.

В системах электропривода переходная характеристика с перерегулированием $\delta = (X_{мах}-X_{уст})/ X_{ус}$= (4-5)% принята оптимальной [10] .

Очевидно, что это компромиссное решение: уменьшением коэффициента демпфирования можно увеличить быстродействие, а увеличением – уменьшить перерегулирование.

Таким образом, задача оптимизации сводится к получения коэффициента усиления регулятора Кр, при котором перегулирование будет находится в интервале 4-5 %. . Из уравнений (2.8) и (2.9) находим

$$\boldsymbol{\omega}_п = \sqrt{\frac{KpKo}{TTn}}; \qquad \xi = \sqrt{\frac{T1}{KpKnTn2}}. \qquad (2,11)$$

Подставляя значение $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$ в уравнение (2.11), получим

$$Кр = \frac{T}{Ko2Tn} \qquad (2.12)$$

Подставив значение Кр в уравнение (2.2), получим уравнение передаточной функции регулятора

$$W_{рт}(P) = \frac{Kp(TP+1)}{Ko2TnP} \qquad (2.13)$$

При включении ПИ-регулятора в токовый контур с параметрами, рассчитанными по уравнению (2.13), переходный процесс тока будет иметь стандартное перерегулирование 4,3%. Такая настройка контура называется настройкой на технический или модульный МО оптимум.

2.2.4 Оптимизация контура на МО, объект в котором имеет интегрирующее звено, и звено с малой постоянной времени

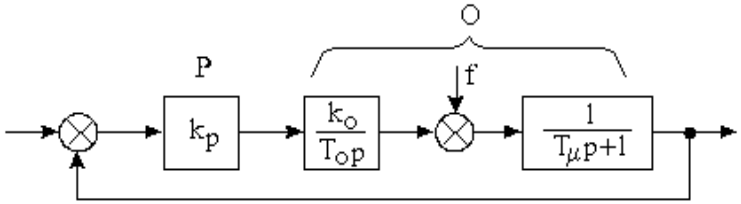
Структурные схемы контуров приведены на рисунке 2 10

Настройка на модульный оптимум:

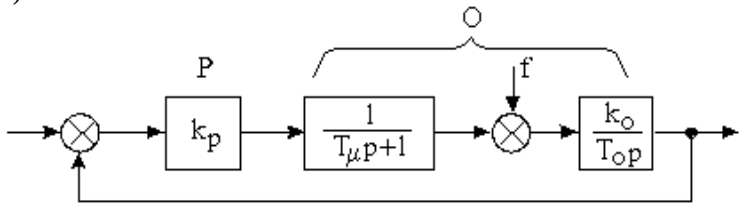
$$W^p(p) = W_p(p)W_o(p) = W_p(p)\frac{k_o}{T_o p(T_\mu p+1)} = \frac{1}{2T_\mu p(T_\mu p+1)};$$

$$W_p(p) = \frac{T_o}{2k_o T_\mu} = k_p$$ – регулятор П-типа.

С П-регулятором контур в общем случае является статическим. В некоторых случаях, если интегрирующее звено объекта находится до точки приложения возмущающего воздействия, контур будет астатическим.



а)



б)

Рисунок 2.10

На рисунке 2.10,а,б представлены контур астатический по возмущению и статическая система по возмущению, соответственно.

В обоих вариантах система является астатической по заданию, т.к. одно из звеньев имеет интегральную часть. При качественном анализе системы необходимо начинать со звена, имеющего интегральную часть, на котором в установившемся режиме должен быть ноль.

По возмущению астатической является только вариант а), т.к. в этом случае интегральная часть объекта стоит до точки приложения возмущающего воздействия. Вариант б) является статическим по возмущению, т.к. нулевой сигнал на входе интегрирующей части возможен при наличии возмущающего воздействия, т.е. ошибки.

2.2.5 Оптимизация контура на СО, объект которого содержит интегрирующее звено и звено с малой постоянной времени

Примем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_p = k_p \frac{T_{из} p + 1}{T_{из} p}.$$

В системе с ПИ-регулятором астатическим по заданию и возмущению передаточные функции разомкнутого и замкнутого контуров:

$$W^{р}(p) = k_{р}\frac{T_{из}p+1}{T_{из}p}\frac{k_{о}}{T_{о}p(T_{\mu}p+1)};$$

$$W^{з}(p) = \frac{W^{р}}{1+W^{р}} = \frac{\dfrac{k_{р}k_{о}(T_{из}p+1)}{T_{из}T_{о}p^{2}(T_{\mu}p+1)}}{1+\dfrac{k_{р}k_{о}(T_{из}p+1)}{T_{из}T_{о}p^{2}(T_{\mu}p+1)}} =$$

$$= \frac{k_{р}k_{о}+k_{р}k_{о}T_{из}p}{k_{р}k_{о}+k_{р}k_{о}T_{из}p+T_{из}T_{о}p^{2}+T_{из}T_{о}T_{\mu}p^{3}};$$

$$2a_0a_2 = a_1^2 \rightarrow 2k_pk_0T_{ИЗ}T_0 = k_p^2k_0^2T_{ИЗ}^2 \rightarrow 2T_0 = k_pk_0T_{ИЗ};$$

$$2a_1a_3 = a_2^2 \rightarrow 2k_pk_0T_{ИЗ}^2T_0T_{\mu} = T_{ИЗ}^2T_0^2 \rightarrow 2k_pk_0T_{\mu} = T_0;$$

$$k_{р} = \frac{T_{о}}{2k_{о}T_{\mu}};\quad 2T_{о} = \frac{T_{о}}{2k_{о}T_{\mu}}k_{о}T_{из};\quad T_{из} = 4T_{\mu};$$

$$W^{р}(p) = \frac{T_{о}}{2k_{о}T_{\mu}}\cdot\frac{4T_{\mu}p+1}{4T_{\mu}p}\cdot\frac{k_{о}}{T_{о}p(T_{\mu}p+1)} = \frac{4T_{\mu}p+1}{4T_{\mu}p}\cdot\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}.$$

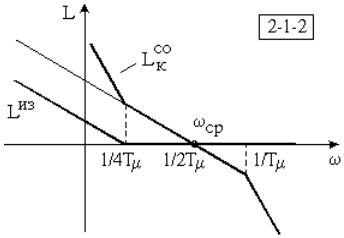


Рисунок 2.11

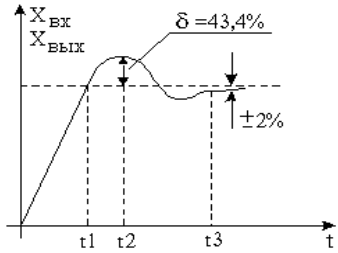


Рисунок 2. 12

В соответствии с рисунком 2.11, ЛАЧХ разомкнутого контура получилась симметрично относительно частоты среза. Это называется настройкой на симметричный оптимум.

$$W_3^3(p) = \frac{1 + 4T_\mu p}{1 + 4T_\mu p + 8T_\mu^2 p^2 + 8T_\mu^3 p^3}.$$

Передаточная функция замкнутого контура определяется только T_μ. Этой передаточной функции соответствует переходный процесс, представленный на рисунке 2.12.

$t_1 = 3{,}1T_ш$; $t_3 = 16{,}5T_ш$; $\delta = 43{,}4\%$.

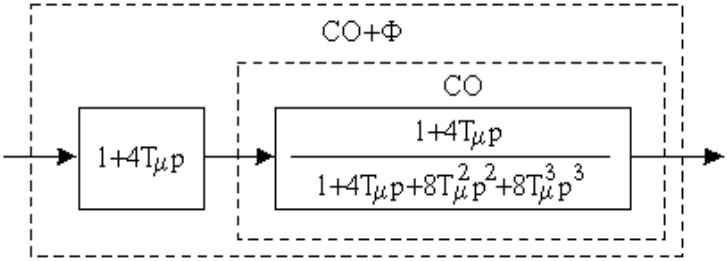


Рисунок 2.13

Повышенное перерегулирование вызвано наличием форсирующего члена в числителе передаточной функции. Такое перерегулирование недопустимо. Для снижения перерегулирования на входе замкнутого контура включают фильтр (см. рисунок 2.13).

Передаточная функция фильтра

$$W_ф(p) = \frac{1}{1 + 4T_\mu p};$$

$$W_{3(со+ф)}^3(p) = \frac{1}{1 + 4T_\mu p + 8T_\mu{}^2 p^2 + 8T_\mu{}^3 p^3} \approx \frac{1}{1 + 4T_\mu p}.$$

Графики переходных процессов при различных настройках контура представлена на рисунке 2.14. Характеристики переходных процессов при различных настройках контура приведены в таблице 2.1

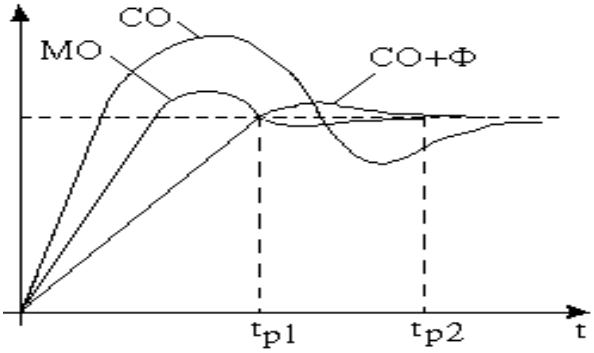


Рисунок 2.14

Таблица 2.1

Характеристики настройки

Настройки	СО	МО	СО+Ф
σ , %	43,4	4,3	8,1
t_1	$3{,}1T_\mu$	$4{,}3T_\mu$	$7{,}6T_\mu$
t_3	$16{,}6T_\mu$	$8{,}4T_\mu$	$13{,}3T_\mu$

Сравнивая настройку на СО и МО можно сделать вывод, что настройка на МО имеет малое перерегулирование и большое быстродействие, но при этом система является статической. Быстродействие и перерегулирование при оптимизации на симметричный оптимум (СО) вдвое хуже, чем при настройке на МО, но система становится астатической.

Перерегулирование с фильтром на входе снижается по причине замены скачка сигнала с выхода фильтра, т.е. на входе контура экспонентой.

Техническая реализация фильтра на входе системы представлена на рисунке 2.15.

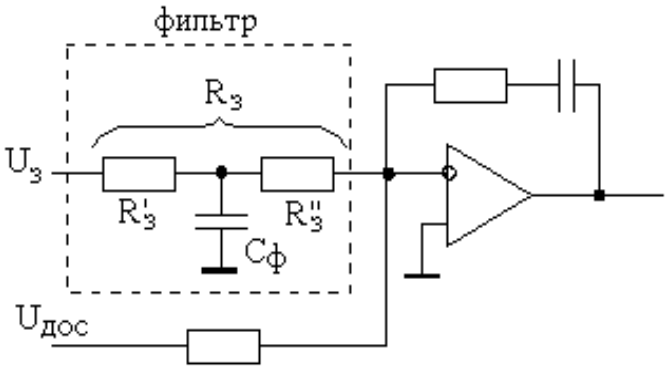


Рисунок 2.15 Техническая реализация фильтра

Применение ПИ-регулятора для объекта, содержащего интегрирующее звено и звено с малой постоянной времени, позволяет построить систему астатическую по заданию и возмущению.

2.2.6 Принципы построения многоконтурных систем

В АЭП в процессе регулирования требуется контролировать и ограничивать ряд координат ЭП на допустимом уровне (ток, напряжение и т.д.), поэтому современные системы АЭП в основном многоконтурные.

Принципы построения многоконтурных систем АЭП:

- с одним регулятором (рисунок 2.16);
- с n-количеством регулируемых параметров.

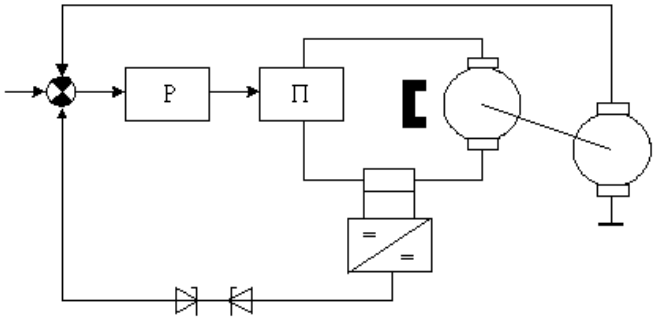


Рисунок 2.16

Недостаток системы с одним регулятором:

– требуемое качество достигается при компромиссной настройке

регулятора.

Достоинство

– относительно высокое быстродействие, если применяется несколько регуляторов (но в этом случае усложняется узел, который обеспечивает их совместную работу).

Многоконтурные системы с двумя контурами регулирования (рисунок2.17).

При наличии регулятора в каждом контуре все параметры могут иметь оптимальную настройку. Регулирующий сигнал Uзс подается на вход контура скорости, выходной сигнал этого контура является задающим для внутреннего контура (контура тока). Контур тока является подчиненным контуру скорости, (реализована система с подчиненным регулированием параметров).

Достоинства:

- возможность реализации оптимальных законов управления каждого параметра;

- простота ограничения максимальных значений регулируемой величины за счет ограничения сигнала на входе соответствующего регулятора.

Из рассмотренного следует, что введением регуляторов в контуры системы регулирования и соответствующей их настройкой можно получить требуемые статические характеристики и динамические свойства электропривода.

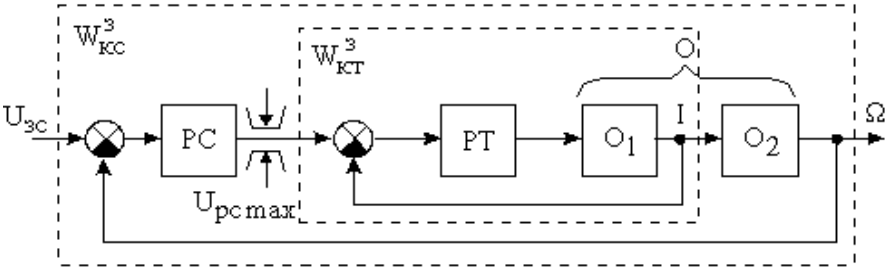


Рисунок 2.17

На рисунках 2.18 и 2.19. приведены наиболее распространенные структуры системы ТП-Д.

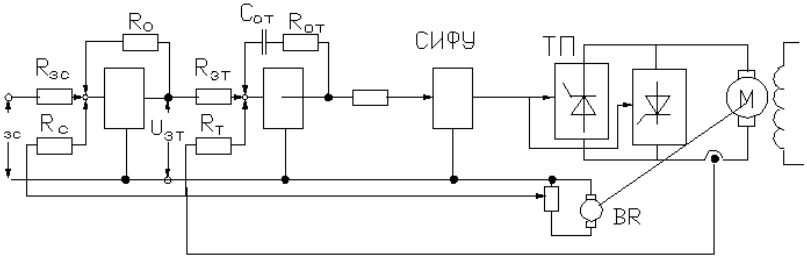


Рисунок 2.18 Система ТП-Д с однократно интегрируемой системой регулирования

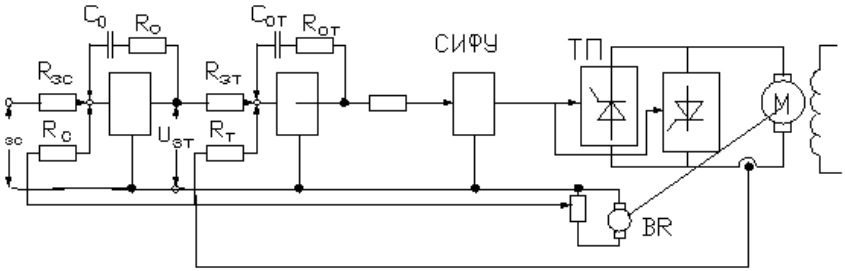


Рисунок 2.19 Система ТП-Д с двух кратно интегрируемой системой регулирования

Приведенные схемы нашли широкое применение и могут быть отнесены к типовым. В них два замкнутых контура: внутренний (токовый) и внешний (контур угловой скорости). В первом внутреннем контуре на вход регулятора тока (ПИ-регулятор) подаются два сигнала: сигнал обратной связи по току и напряжение задания на ток якоря. Входной величиной датчика тока является ток якоря, Непосредственно на вход датчика тока подается падение напряжения на шунте, включенном в якорную цепь. Выходной величиной датчика тока является напряжение, пропорциональное току якоря. Кроме усиления в датчике тока производится гальваническая развязка силовых цепей и цепей управления.

Выходное напряжение регулятора скорости является сигналом задания для токового контура. На вход внешнего контура также подводятся два сигнала: сигнал задания на скорость двигателя и сигнал обратной связи по скорости. Регулятор тока формирует падающей участок механической характеристики, т.е. ограничивает ток якоря при перегрузках и в процессе пуска двигателя.

Жесткость механической характеристики с П-регулятором частоты вращения не превышает жесткости естественной характеристики. Поэтому, однократно интегрируемая система регулирования (называемая так по количеству интегрируемых регуляторов в системе регулирования) применяется в приводе механизмов с невысокими требованиями по жесткости механических характеристик.

Двух кратно интегрируемая схема регулирования астатическая по управлению и возмущению. За счет применения ПИ-регуляторов величина тока якоря в период разгона поддерживаются на заданном уровне. Система ТП-Д с двух кратно интегрируемой системой управления позволяет формировать требуемые характеристики практически для всех производственных механизмов.

2.2.7 Расчет и выбор параметров регуляторов при настройке системы на МО и СО

Расчет производится применительно к электроприводу по системе ТП-Д (рисунки 2.18), (2.19).

Передаточная функция электрической части двигателя

$$W_э(p) = 1/Rэ(T_эP + 1) \qquad (2.14)$$

Передаточная функция механической части двигателя

$$Wм(P) = Rэ/CT_мP \qquad (2.15)$$

Передаточная функция управляемого выпрямителя

$$Wg(P) = Кп/(Тп+1). \qquad (2.16)$$

где Тп - постоянная времени управляемого выпрямителя (малая постоянная времени); Кп – коэффициент усиления управляемого выпрямителя.

Структурная схема электропривода по системе ТПД приведена на рисунке 2.20. Схема содержит два контура. Во внутренний токовый контур входят передаточная функция регулятора тока РТ, передаточная функция тиристорного преобразователя и передаточная функция электрической части двигателя. В цепь обратной связи включен датчик тока. Во второй контур кроме указанных элементов дополнительно передаточная функция механической части привода регулятор и датчик скорости.

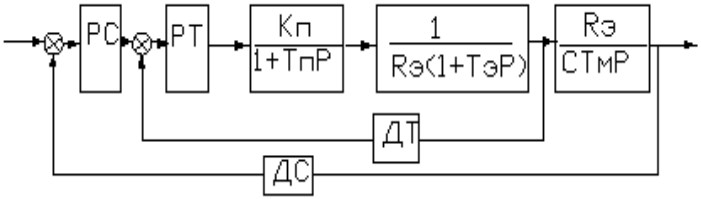


Рисунок 2.20 Структурная схема системы ТПД

Настройка токового контура.

Как правило, токовый контур в системе ТП-Д настраивается на модульный МО.

При подчиненном регулировании передаточная функция регулятора, вводимого в токовый контур, имеет вид

$$Wрт(P) = 1/(a_1 T_п \cdot P \cdot W_{ор}(P) \cdot K_I \cdot K_п \qquad (2.17),$$

где a_1 – коэффициент настройки регулятора (a_1=2- для внутреннего контура); $W_{ор}(P)$ – передаточная функция объекта регулирования, входящего в токовый контур; K_I- коэффициент обратной связи по току.

Структурная схема токового контура приведена на рисунке 2.21

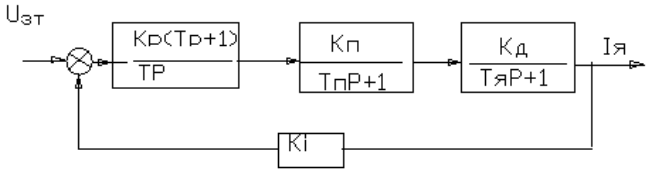


Рисунок 2.21 Структурная схема токового контура

После подстановки Wрт(P) из (2.17), в уравнение

$$Wp(P)=\frac{Кр(ТпР+1)}{ТР}$$

получим

$$W_{рт}(P) = R_я (T_я P + 1)/ a_1 \cdot T_п \cdot P \cdot K_п \cdot K_I.$$

Коэффициенты и постоянные времени находи по техническим данным двигателя постоянного тока

Технические данные двигателя постоянного тока

Тип двигателя……МБП-85-1000-УХЛЗ

Поминальная мощность,кВт……65

Номинальная частота вращения об.мин .. 1000
Номинальное напряжение ,В 440
Номинальный ток, А…….. 160
Номинальный ток возбуждения, А……15,7
Номинальный КПД, ……0,95

$$R_я = (1-\eta)U_н/I_н = (1 - 0{,}95)440/160 = 0{,}14 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки якоря

$$L_я = 0{,}1 \cdot U_н \cdot 30/\pi \cdot I_н \cdot n_н \cdot P_д = 0{,}1 \cdot 440 \cdot 30/3{,}14 \cdot 160 \cdot 1000 \cdot 6 = 0{,}04 \text{ Гн}$$

Электромагнитная постоянная времени

$$T_э = L_э / R_э = 0{,}04/ 0{,}14 = 0{,}29 \text{ с}.$$

$$T_м = GD^2 \cdot R_э \cdot n_н \cdot I_н / 375 \cdot E_н \cdot M_н. =$$

$$205 \cdot 0{,}14 \cdot 1000 \cdot 160 / 375 \cdot 462 \cdot 63 = 0{,}42 \text{ с}$$

$$E_н = U_н + R_{яц.} \cdot I_н = 440 + 0{,}14 \cdot 160 = 462\text{В}.$$

$$M_н = 975 P_н / n_н = 975 \cdot 65 / 1000 = 63 \text{ кГм}.$$

$$C = (U_н - I_н R_{яц.}) / n_н = (440 - 160 \cdot 0{,}14)/1000 = 0{,}418$$

При реализации регулятора тока на операционном усилителе (рисунок 2.19)

$$R_{от} = T_я / C_{от} = 0{,}29 / 10^{-6} = 290 \text{ кОм},$$

где $C_{от}$ = 1 мкФ – принятое значение.

$$R_{зт} = a_1 \cdot T_п \cdot K_п \cdot K_I / R_э \cdot C_{от}.$$

Настройка контура скорости на МО

Передаточная функция регулятора скорости при настройке на МО

$$W_{рс.}(P) = K_I / a_2 \cdot T_п \cdot P \cdot K_с \cdot W_{ор2}, \qquad (2.18)$$

где $a_2 = 2\ a_1$ – коэффициент настройки контура скорости; $K_с$ – коэффициент обратной связи по скорости; $W_{ор2}$ – передаточная функция механической части объекта регулирования.

Подставляя значение $W_{ор2}$, в уравнение (2.18) получим

$$W_{рс.}(P) = K_I \cdot C \cdot T_м / a_2 \cdot T_п \cdot \cdot K_с \cdot Rэ$$

Из рассмотренного следует, что при настройке контура скорости на МО получаем П-регулятор скорости и статическую систему регулирования по управлению. Такая система, как правило, не обеспечивает требуемую жесткость механической характеристики.

Настройка регулятора скорости на СО.

Для получения жесткосткой механической характеристики используют настройку на СО.

Передаточная функция регулятора скорости при этой настройке

$$W_{рс}(P)=(8T_пP+1)\cdot T_м C\cdot K_I/32\cdot T_п^2\cdot K_с \qquad (2.19)$$

Величины $R_{зс}$, $R_{ос}$,$R_с$ могут быть определены из уравнения, связывающего передаточную функцию с элементами регулятора, реализованного на операционном усилителе

$$C_{об}\cdot Rоб = 8\ T_{п.} \qquad (2.20)$$

В уравнении (2.20) одной из величин следует задаться. Удобнее задаться величиной $C_{об.}$ Принимаем $C_{об}$ = 1мкФ = 10^{-6} Ф.Тогда

$$Rоб = 8\cdot 0{,}01/10^{-6} = 80\ кОм.$$

$$K_с = U_{зс.мах}/n_{мах} = 10/1000= 0{,}01.$$

$$C = (U_н - I_н\cdot\ R_я)/n_н = (440 - 160\cdot 0{,}14)/1000 = 0{,}418$$

$$R_{зс}\cdot C_{об} = T_м\cdot C\cdot K_I / 32\cdot T_п^2\cdot K_с$$

$$R_{зс} = 0{,}42\cdot 0{,}418\cdot 0{,}025/32\cdot 0{,}01^2\cdot 0{,}01 = 137\ кОм.$$

Схемы подключения регуляторов тока и скорости показаны на рисунках
2.22 и 2.23

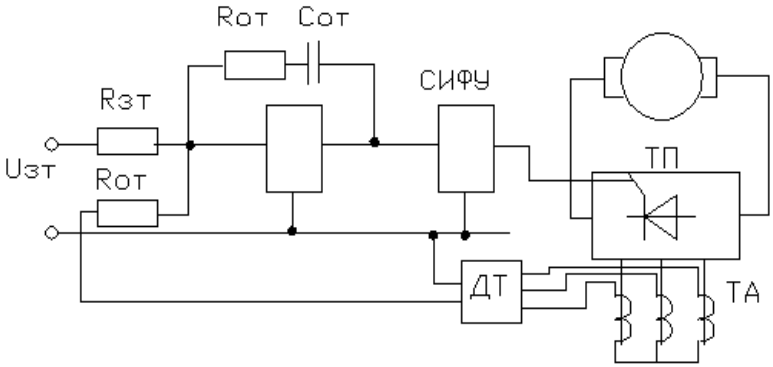


Рисунок 2.22 Схема подключения регулятора тока

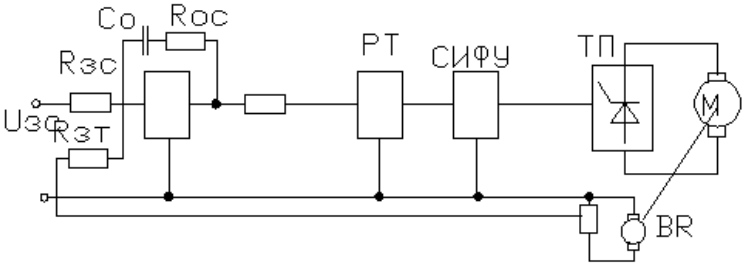


Рисунок 2.23 Схема подключения регулятора скорости

2.3 Электропривод с вентильным двигателем

В общем случае вентильным можно назвать любой электропривод, в котором регулирование режима работы электродвигателя производится с помощью управляемых вентильных (полупроводниковых) преобразователей электрической энергии: тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока (ТП-Д); асинхронный вентильный каскад (АВК) и др. В более узком, общепринятом смысле под электроприводом с вентильным двигателем имеется в виду электромеханическая система, состоящая из синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов или постоянным током, электронного коммутатора и системы регулирования.

В приводе используется принцип частотного регулирования с самосинхронизацией. Управление преобразователем частоты осуществляется от системы датчиков положения ротора, вследствие чего напряжение подается на каждую фазу двигателя при углах нагрузки $\theta < 90°$. При таком регулировании автоматически обеспечиваются условия устойчивой работы двигателя. Синхронные двигатели с инвертором, осуществляющим подачу напряжения на фазные обмотки двигателя в

зависимости от положения ротора, часто называют вентильным двигателем. Принцип работы электропривода с вентильным двигателем поясняется схемой, приведенной на рисунке (2.24)

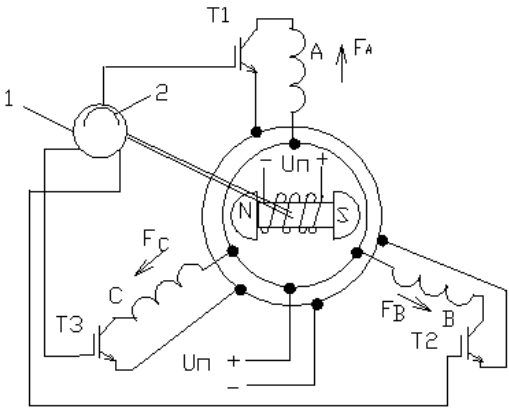


Рисунок 2.24 К пояснению принципа работы вентильного двигателя

Ротор двигателя представлен одной парой полюсов. Статор имеет три фазные обмотки А, В, и С, сдвинутые по окружности на 120^0. На валу двигателя установлен угловой датчик 1 УД. Датчик вырабатывает сигналы управления ключами в соответствующих положениях ротора. Ключевые элементы, в качестве которых чаще всего используются биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT, служат для подачи постоянного напряжения на обмотки статора.

При поступлении управляющего напряжения к одному из транзисторов замыкается цепь питания и на соответствующую обмотку подается напряжение и по фазе проходит ток якоря. Благодаря взаимодействию НС $\boldsymbol{F_a}$,
подключенной фазы статора и потока полюсов ротора Φ_o создается электромагнитный момент $M_э$, поворачивающий ротор.. При дальнейшем повороте ротора сигналами углового датчика я к источнику питания подключаются другие фазы статора.

При вращении ротора в обмотке якоря благодаря действию магнитного потока ротора, создаваемого обмоткой возбуждения, наводится ЭДС, уравновешивающая напряжение питания двигателя. так же как и в машине постоянного тока. Скачкообразное перемещение намагничивающей силы статора в пространстве приводит к скачкообразному изменению угла θ и пульсациям электромагнитного момнта двигателя.

$$\boldsymbol{M_э} = C_м \Phi_0 \sin\theta$$

Особенность ВД как элемента системы автоматизированного электропривода проявляется тогда, когда частота питающего тока от регулятора мощности ставится в зависимость от положения ротора. Вращение ротора приводит к наведению в обмотках ЭДС вращения, которая, как известно, пропорциональна скорости вращения ротора и потоку Φ_0. Форму кривой ЭДС вращения в первом приближении можно считать синусоидальной. ЭДС вращения ВД, как и ЭДС коллекторных и синхронных двигателей, стремится скомпенсировать подведенное к якорю напряжение. Очевидно, что при увеличении напряжения увеличивается компенсирующая его ЭДС, следовательно, возрастает скорость вращения ротора. Отсюда вытекает первый способ регулирования скорости вращения — изменением питающего напряжения. Второй способ регулирования скорости основан на уменьшении значения Φ_0 (например, с помощью тока обмотки возбуждения, если таковая имеется). При этом для поддержания значения ЭДС ротор двигателя вынужден увеличить скорость вращения. Для получения высокого качества регулирования в статических и динамических режимах в электроприводах с ВД используются различные обратные связи. Диапазон регулирования скорости, который можно получить в системе привода с ВД, имеющим дополнительную обратную связь по скорости, может достигать 1:50 000.

По сравнению с асинхронным двигателем, питаемым от преобразователя частоты, вентильный двигатель обладает следующими преимуществами: лучший КПД вследствие отсутствия потерь на скольжение, малый момент инерции и, как следствие, более высокое быстродействие и лучшая управляемость.

В современном электроприводе с вентильным двигателем (рисунок 2.25) в качестве источников постоянного напряжения используются управляемые выпрямители на обычных тиристорах. В инверторах, ведомых вторичной сетью, в качестве электронных коммутаторов в основном используются полностью управляемые силовые биполярные транзистора с изолированным затвором IGBT.

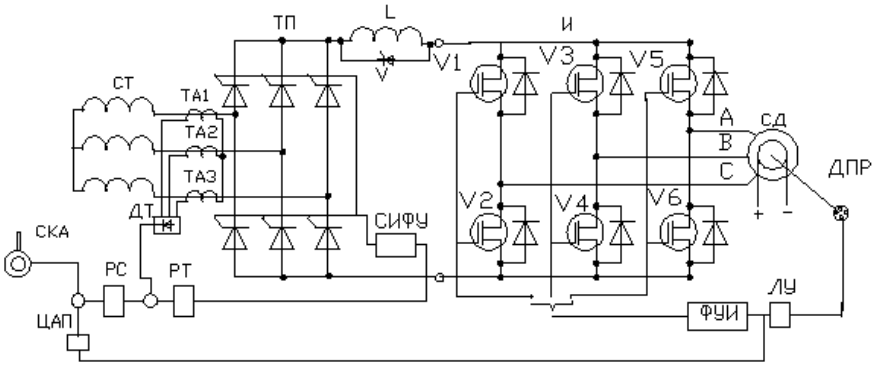


Рисунок 2.25 Принципиальная схема электропривода с вентильным двигателем

2.4 Электропривод преобразователь частоты–асинхронный двигатель (ТПЧ-АД)

В электроприводе тиристорный преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ТПЧ-АД) регулирование угловой скорости осуществляется изменением частоты напряжения на статоре. Силовая схема электропривода состоит из двух частей: преобразователя частоты и асинхронного двигателя с коротко замкнутым ротором. Преобразователь частоты - это устройство, состоящее из выпрямителя, преобразующего переменный ток промышленной частоты в постоянный и инвертора (в современных приводах с ШИМ), преобразующего постоянный ток в переменный требуемой частоты и амплитуды. Выходные тиристоры (GTO) или транзисторы IGBT обеспечивают необходимый ток для питания электродвигателя. Для исключения перегрузки преобразователя при большой длине фидера между преобразователем и фидером ставят дроссели.

Существуют два вида электропривода с частотным регулированием: с непосредственной связью и с промежуточным звеном постоянного тока. Первый вид электропривода в связи с множеством недостатков не получил широкого применения.

Принцип работы электропривода с частотным управлением поясняется диаграммами напряжений и токов (рисунок 2.26)

В правой части рисунка изображены графики напряжений и токов на выходе каждого элемента преобразователя.

Переменное напряжение, поступающее из сети, преобразуется выпрямителем УВ в постоянное напряжение. Фильтр, установленный на выходе УВ, выполняет две функции – сглаживает пульсации выпрямленного напряжения и поглощает реактивную энергию, поступающую от инвертора

И.

С выхода фильтра постоянное напряжение Ud поступает на вход автономного инвертора И.

В настоящее время инверторы выполняются на полностью управляемых элементах, запираемых по управляющей цепи: полевые транзисторы с изолированным затвором, биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), запираемые тиристоры IGCT.

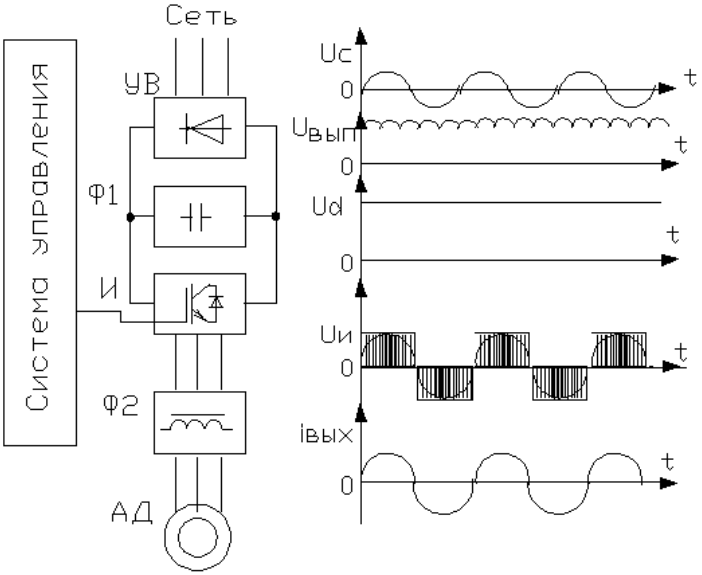


Рисунок 2.26 К пояснению работы электропривода ТПЧ-АД

В промышленных установках выпрямитель питается от сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц. Наиболее распространенной схемой силовой части инвертора является трехфазная мостовая схема (рисунок 3.27), состоящая из шести управляемых ключей, которые должны обладать двусторонней проводимостью, и поэтому выполнены на транзисторах, обеспечивающих протекание тока в прямом направлении от плюса источника питания к минусу. Обратная проводимость обеспечивается включенными параллельно транзисторам диодами обратного тока. С их помощью создается цепь для протекания обратного тока в процессе коммутации транзисторов и в тормозном режиме двигателя.

В инверторе осуществляется преобразование постоянного напряжения Ud в трехфазное (или однофазное) импульсное напряжение с изменяемой амплитудой и частотой. По сигналам системы управления

каждая обмотка электрического двигателя подсоединяется через соответствующие силовые транзисторы инвертора к положительному и отрицательному полюсам звена постоянного тока. Длительность подключения каждой обмотки в пределах периода следования импульсов модулируется по синусоидальному закону. Наибольшая ширина импульсов обеспечивается в середине полупериода, а к началу и концу полупериода уменьшается. Таким образом, система управления обеспечивает широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) напряжения, прикладываемого к обмоткам двигателя. Амплитуда и частота напряжения определяются параметрами модулирующей синусоидальной функции.

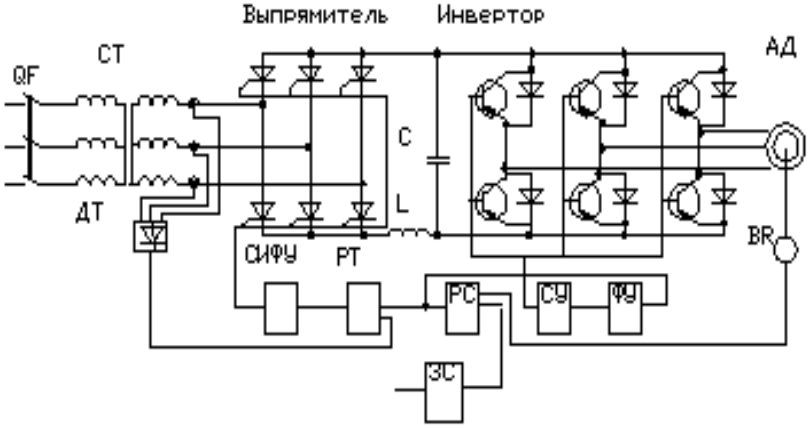


Рисунок 2.27 Силовая схема электропривода ТПЧ-АД

При высокой несущей частоте ШИМ (2 … 15 кГц) обмотки двигателя вследствие их высокой индуктивности работают как фильтр. Поэтому в них протекают практически синусоидальные токи.

Преобразователь переменного напряжения в постоянное может быть как управляемым, так и не управляемым. В схемах преобразователей с управляемым выпрямителем изменение амплитуды напряжения, подаваемого на вход инвертора, может достигаться регулированием величины постоянного напряжения Ud, а изменение частоты – режимом работы инвертора.

При необходимости на выходе автономного инвертора устанавливается фильтр (4) для сглаживания пульсаций тока. (В схемах преобразователей на IGBT в силу низкого уровня высших гармоник в выходном напряжении потребность в фильтре практически отсутствует.)

Таким образом, на выходе преобразователя частоты формируется трехфазное (или однофазное) переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды ($U_{вых}$ = var, $f_{вых}$ = var).

В электроприводе ТПЧ-АД применяются два вида управления: векторное и скалярное. При скалярном управлении формируются гармонические токи фаз двигателя. Векторное управление — метод управления синхронными и асинхронными двигателями, не только формирующим гармонические токи (напряжения) фаз, но и обеспечивающим управление магнитным потоком ротора (моментом на валу двигателя).

2.5 Комплектные электроприводы с частотным управлением

В настоящее время доминирующей системой электропривода является асинхронный привод с частотным управлением. Актуальный вопрос модернизации устаревшего оборудования решается в большинстве случаев переходом на электропривод с частотным управлением. К настоящему времени эта система настолько усовершенствована, что может удовлетворить самые высокие требования машин и механизмов, работающих в различных технологических процессах. Один только перечень объектов, где применяется электропривод с частотным управлением, говорит сам за себя.

Электропривод с частотным управлением выпускается многими европейскими странами, США, Японией, Китаем, Россией и многими другими . На Казахстанском рынке доминирующее положение занимают Германия, Франция, Россия и Китай.

Эти страны выпускают частотные преобразователи с мощностью от нескольких ватт до 1000 кВт.

Внешний вид частотных преобразователей малой мощности, выпускаемых компаниями SIEMENS и Шнайдер Электрик показаны на рисунке 2.28

а б

Рисунок 2.28 Частотные преобразователи: а – фирмы SIEMENS; б –

фирма Шнайдер Электрик.

Внутри корпуса находится силовая часть (выпрямитель и инвертор), и система управления инвертором. Содержание силовой части и элементов управления рассмотрим на примере преобразователя частоты типа Алтивар.

Схема силовой части преобразователя выполнена по типовой схеме (рисунок 1.51). Схема управления инвертором не приводится в справочной литературе. Техническая реализация преобразователя производится по схеме внешних соединений (рисунок 2.29).

Настройка и управление преобразователя частоты осуществляется с помощью элементов, расположенных на дисплее (рисунок 2.30).

Типовая (зводская) настройка выполняется на заводе изготовителя. Ниже приведена конфигурация этой настройки.

Другие конфигурации настроек осуществляются с помощью меня, приведенную на рисунке 2.31. Приведенный материал дает представление об устройстве, характере настроек и управлении электроприводом с частотным управлением.

Заводская конфигурация

ПЧ Altivar 31 имеет заводские настройки, соответствующие наиболее частым применениям:

- Отображение на дисплее: ПЧ готов (rdY) при остановленном двигателе и заданная частота двигателя при работе.
- Частота напряжения питания **двигателя** (bFr): 50 Гц.
- Применение с постоянным моментом, векторное управление потоком без датчика о.с. (UFt = n).
- Способ нормальной остановки с заданным темпом замедления (Stt = rMP).
- Способ остановки при неисправности: остановка на выбеге.
- Время разгона/торможения (ACC, dEC): 3 с.
- Нижняя скорость (LSP): 0 Гц.
- Верхняя скорость (HSP): 50 Гц.
- Тепловой ток двигателя (ItH) равен номинальному току двигателя (в соответствии с типом ПЧ).
- Ток динамического торможения (SdC1) равен 0,7 номинального тока преобразователя в течение 0,5 с.
- Автоматическая адаптация темпа в случае перенапряжения при торможении.
- Без автоматического повторного пуска при возникновении неисправности.
- Частота коммутации 4 кГц.
- Дискретные входы:
  - LI1, LI2 (2 направления вращения): 2-проводное управление по изменению состояния, LI1 = вращение вперед, LI2 = вращение назад, не активизированы для серии ATV 31●●●●●●A.
  - LI3, LI4: 4 заданные скорости (скорость 1 = задание скорости или LSP, скорость 2 = 10 Гц, скорость 3 = 15 Гц, скорость 4 = 20 Гц).
  - LI5 - LI6: не активизированы (не назначены).
- Аналоговые входы:
  - AI1: задание скорости 0-10 В, не активизирован (не назначен) для серии ATV 31●●●●●●A.
  - AI2: суммируемый вход по скорости 0±10 В.
  - AI3: 4-20 мА не активизирован (не назначен).
- Реле R1: контакт размыкается при неисправности (или при отсутствии питания ПЧ).
- Реле R2: не активизировано (не назначено).
- Аналоговый выход AOC: 0-20 мА, не активизирован (не назначен).

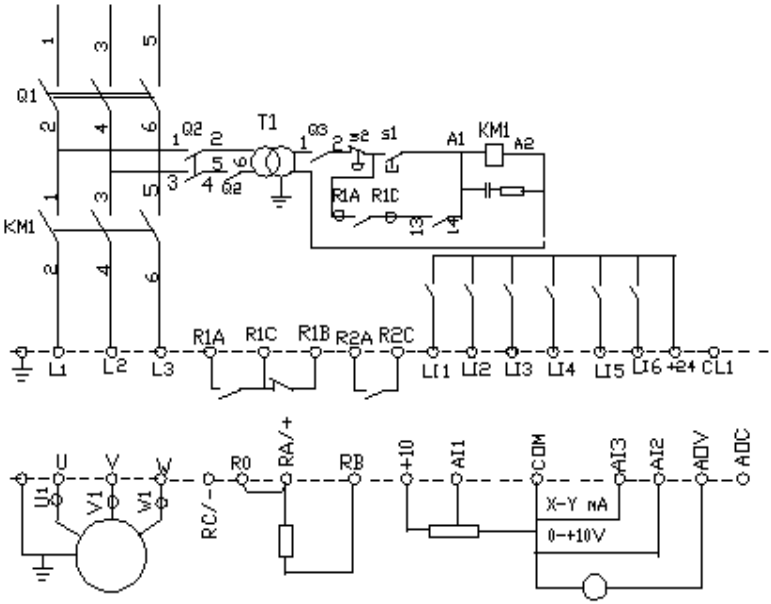


Рисунок 2.29 Схема внешних соединений в преобразователе типа Алтивар.

Функции дисплея и клавиш

• Нажатие на ▲ или ▼ не сохраняет выбора.

• Длительное нажатие (>2 с) на ▲ или ▼ убыстряет просмотр.

Сохранение, регистрация отображаемого выбора: ENT

Запись сопровождается миганием индикации.

Рисунок 2.30 Расположение на дисплее элементов управления и настройки преобразователя частоты.

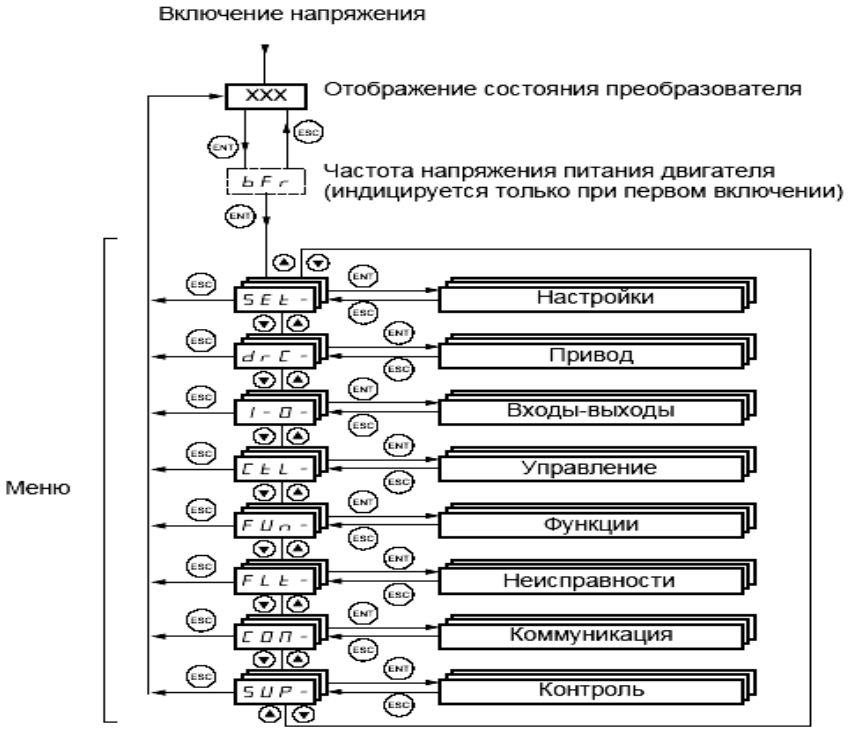


Рисунок 2.31 Меню настройки преобразователя частоты.

3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

3.1 Электропривод установок глубокого бурения

Общие сведения [14].

К основным механизмам установок глубокого бурения относятся: буровые насосы, ротор и спускоподъемный агрегат. В спускоподъемном агрегате можно выделить две системы управления: систему управления электропривода при подъеме колонны труб и систему обеспечивающую торможение при опускании колонны труб, которую в общем случае следует рассматривать как самостоятельную систему. Выбор привода и некоторых технологических его параметров для главных механизмов представляет собой комплексную задачу, что определяется следующими обстоятельствами.

Для питания главных приводов используются одни и те же источники энергии: высоковольтная электрическая линия для электрических буровых установок и автономная электростанция для установок, предназначенных для не электрифицированных регионов. Электродвигатели для каждой конкретной установки должны, как правило, выполняться на одинаковое напряжение. Особое значение это приобретает при применении наиболее перспективных тиристорных приводов (система ТП-Д, ТПЧ-АД), электропривод с аентильным двигателем.

Главные электроприводы работают не одновременно. В основных рабочих режимах действуют либо буровые насосы и ротор (в режиме бурения), либо буровая лебедка в режиме спускоподъемных операций.

Причем потребляемая электроприводами мощность в большой степени зависит от текущей глубины бурения. С учетом этого мощность главных электроприводов должна быть сбалансирована таким образом, чтобы максимальная потребляемая мощность в режимах бурения и СПО была одного порядка и не превышала мощность источника энергии.

Для упрощения производства и эксплуатации электрооборудования целесообразно использовать одинаковые виды привода для главных механизмов и максимально унифицировать электрооборудование электроприводов. Весьма перспективными представляются технические решения, позволяющие унифицировать электрооборудование электрических и автономных установок одного класса, а также установок разных классов. В одинаковой степени к разным электроприводам относится ряд конструктивных требований: климатическое исполнение электрооборудования, исполнение по механическим воздействиям, способы монтажа, демонтажа и транспортирования и т. д.

Возможность регулирования скорости для всех главных механизмов дает определенные эксплуатационные преимущества. Для всех главных электроприводов диапазоны регулирования скорости не заданы жестко и должны определяться на основании технико-экономических расчетов.

Решающим критерием выбора комплекса главных электроприводов является максимальная технико-экономическая эффективность для всей системы в целом. На стадии эскизного проектирования должен проводиться укрупненный технико-экономический анализ вариантов привода, в результате которого принимается решение о виде привода, мощности главных механизмов, количестве основных агрегатов и двигателей и о, системе электроснабжения (включая выбор напряжения источников электроэнергии и потребителей). Таким образом, при проектировании каждого в отдельности из главных электроприводов перечисленные параметры можно считать заданными.

3.1.1 Электропривод буровых насосов

Технологические функции буровых насосов в случае роторного бурения состоят в создании потока промывочной жидкости (бурового раствора) через бурильные трубы к забою скважины и через затрубное пространство от забоя до устья скважины, что необходимо для выноса от забоя на поверхность частиц разбуренной породы. В случае турбинного бурения промывочная жидкость, кроме того, приводит во вращение турбобур с долотом на конце, т. е. служит рабочим агентом для турбины турбобура.

Гидравлическую $P_г$ и приведенную $P_п$ мощность бурового насоса определяют по формулам

$$P_г = pQ\ ; \quad P_п = kQ/\eta \qquad (3.1)$$

где $\eta = 0{,}9 \div 0{,}92$ — КПД, учитывающий гидравлические и технические потери в БН.

Требуемая мощность БН при различных условиях в скважине и методах бурения различна. Поскольку каждая установка должна обеспечивать бурение как роторным, так и турбинным способом, мощность БН выбирается из условий турбинного бурения, где требуется наибольшая мощность.

На серийных буровых установках различных классов номинальная приводная мощность одного БН составляет от 300 до950 кВт, а на уникальных установках до 1180 кВт и более [15,17]. Номинальная частота вращения привода выбирается в пределах от 500 до 1000 об/мин. На серийных установках устанавливается, как правило, два, а на уникальных и морских установках - три насоса.

В отечественной практике для БН, как правило, используют

однодвигательный электропривод, за рубежом — двух двигательный (известны также случаи использования трех двигательного привода).

Целесообразность решения в данном случае зависит от условий унификации приводных электродвигателей всех основных исполнительных механизмов буровой установки. стандартизованные данные мощности буровых насосов установлены по классам таким образом, что мощности насосов будут достаточны для бурения скважин с глубиной, соответствующей классу установки, причем с некоторым запасом.

Буровые насосы , представляющие собой насосы поршневого типа, оснащаются сменными поршнями и втулками ряда диаметров. Сменные поршни нужны в связи с тем, что требуемое давление по мере углубления скважины изменяется. Со сменой поршней связаны следующие закономерности: по условиям прочности механизмов насоса (штоки, подшипники, передаточный механизм) усилия в них должны быть равными при разных диаметрах поршней; следовательно, при меньшем диаметре поршня допускается более высокое давление на выходе БН (обратно пропорционально площади поршня).

Трех поршневые насосы одностороннего действия более компактны(рисунок 3.1),.

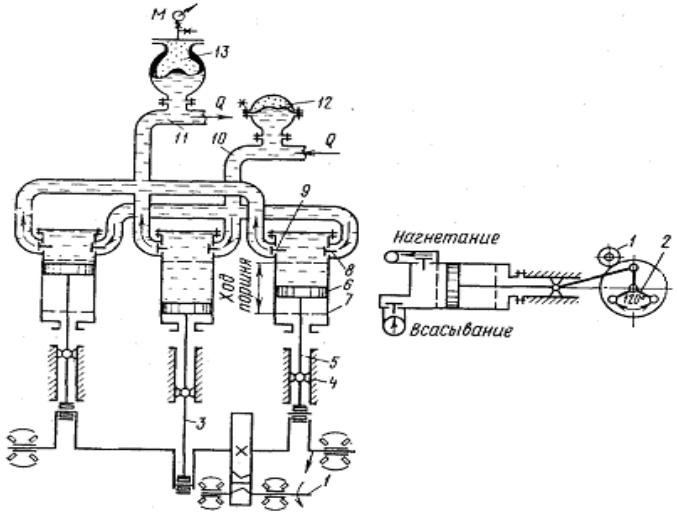


Рисунок 3.1 Кинематическая схема трех поршневого бурового насоса
одностороннего действия:

1 - приводной вал; 2 - коленчатый вал; 3 - шатун; 4 - ползун; 5 - шток; 6 - поршень; 7 - цилиндр; 8 - всасывающий клапан; 9 - нагнетательный

клапан; 10 – всасывающий трубопровод; 11 - нагнетательный трубопровод; 12 - всасывающий пневмокомпенсатор; 13 – нагнетательный пневмокомпенсатор

При уменьшении диаметра поршня и постоянной скорости его нижняя подача БН изменяется прямо пропорционально площади поршня (снижается);при смене диаметра поршня должен сохраняться режим постоянной мощности привода БН.

Оптимальный режим БН характеризуется постоянством развиваемой мощности, равной номинальной: pQ = const.

Приближение к этому режиму при нерегулируемом приводе достигается применением цилиндрических втулок разного диаметра.

Режим работы БН рассмотрим по графику характеризующему зависимость подачи Q от давления р на выходе и диаметра втулки D (рисунок 3.2). Если принять, что в комплект БН входят 5 типоразмеров сменных поршней, то основные расчетные точки *2, 4, 6, 8, 10,* соответствующие различным диаметрам поршней, будут располагаться на расчетной кривой постоянной мощности.

При этом точка *2* соответствует максимальному, а точка*10* — минимальному диаметру поршня. Заметим, что при неизменном диаметре поршня подача БН пропорциональна скорости привода, а момент на валу двигателя пропорционален давлению.

В соответствии с формулой (3.1) давление на выходе БН p пропорционально квадрату подачи жидкости Q, график ависимости $p = kQ^2$ для конкретного значения коэффициента гидравлического сопротивления $к$ называют "кривой нагрузки". Значение коэффициента $к$ увеличивается с ростом глубины скважины. Кривые нагрузки, проходящие через указанные расчетные точки, показаны на рисунке 3.2 тонкими линиями. Предположим, что при малой глубине бурения установлены поршни максимального диаметра D_5 и БН работает в точке *1*. С увеличением глубины скважины подача БН Q_5 остается постоянной, а давление возрастает. Продолжать работу с поршнем диаметра D_5 выше точки *2* недопустимо, так как мощность привода превысит допустимо Следовательно, в случае нерегулируемого электропривода БН и периодической замены поршней процесс протекает по отрезкам вертикальных прямых.

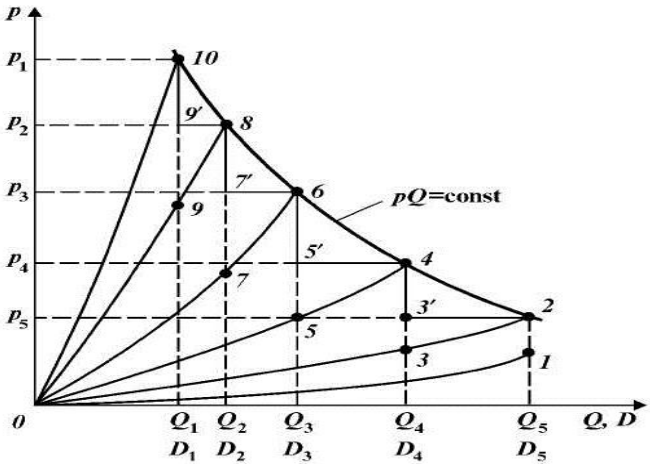


Рисунок 3.2 График режимов работы буровых насосов при различных способах регулирования производительности

Поэтому в точке *2* необходимо заменить поршень диаметра D_5 на поршень с диаметром D_4. Поскольку при той же скорости привода вследствие уменьшения диаметра поршня подача уменьшится, а кривая нагрузки останется неизменной, режим работы БН будет определяться точкой *3*.

По мере углублени скважины произойдет переход в точку *4* и т.д.*1—2, 3—4, 5—6, 7—8, 9—10*

Из графика видно, что в точках *1, 3, 5, 7, 9* фактически развиваемая мощность значительно меньше номинальной. Вынужденное недоиспользование мощности по сравнению с идеальной кривой *pQ* = const можно оценить суммарной площадью треугольника *4-5-6, 6-7-8, 8-9-10*.Рассмотрим теперь для тех же условий режимы работы БН, оснащенного регулируемым электроприводом. Благодаря возможности регулирования скорости вниз от номинальной, график работы насоса $1-2-3'-4-5'-6-7'-8-9'-10$. Анализ графиков показывает, что в данном случае недоиспользование мощности значительно меньше, чем при нерегулируемом приводе. Применение регулируемого электропривода обеспечивает уменьшение числа замен поршней при бурении скважины.

Более полное использование мощности БН при регулируемом электроприводе практически выражается в том, что при том же значении допустимого давления в нагнетательной системе подача БН будет больше, чем при нерегулируемом электроприводе. Благодаря этому при всех видах бурения улучшается очистка забоя, что приводит к увеличению механической скорости бурения, а также обеспечивается возможность повышения скорости бурения вследствие использования более высокой

нагрузки на долото. Одновременно возрастает проходка на долото, так как уменьшается степень повторного разрушения породы. В результате увеличения проходки на долото сокращается суммарное время спуско-подъемных и ряда вспомогательных операций. При турбинном бурении, кроме того возрастает механическая скорость бурения вследствие увеличения частоты вращения долота и подводимой к нему средней мощности.

Регулирование подачи БН необходимо также в осложненных условиях бурения. Ответственной операцией, особенно при бурении глубоких скважин, является восстановление циркуляции бурового раствора в гидравлической системе. В начале этой операции вязкость раствора и гидравлическое сопротивление в системе значительно выше, чем при рабочих режимах. Восстановление циркуляции значительно облегчается при возможности работы БН с пониженной подачей. Минимальная относительная подача при восстановлении циркуляции может составлять 0,1 от подачи в режиме бурения.

Таким образом, буровой насос целесообразно оснащать регулируемым электроприводом. Регулирование следует осуществлять в режиме постоянного момента,. Этот момент пределяется допустимым давлением в как отношение диаметров соседних типоразмеров поршней составляет 0,85 — 0,9 между их двумя заменами. Регулирование частоты вращения гидравлической системе буровой установки должно быть не менее 20 — 30 % в сторону уменьшения от номинальной.

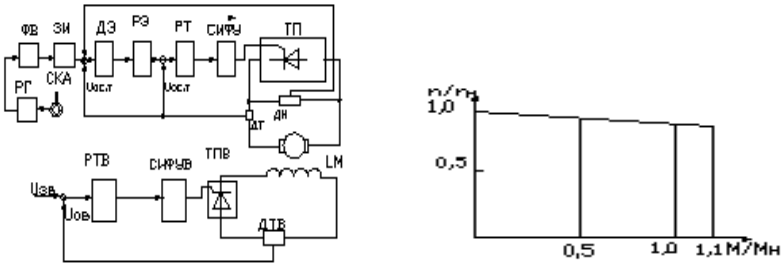
На основании изложенного следует, что электропривод БН должен отвечать следующим требованиям:

- возможность плавного, затянутого во времени пуска (до 60 с);
- пусковой момент не должен превышать номинальный на 10 %;
- возможность регулирования скорости привода в режиме бурения до 50 %, а в режимах восстановления циркуляции до 80 % и более вниз от номинального значения;
- при регулировании скорости вниз от номинальной привод должен обеспечивать постоянство давления БН, что соответствует постоянству момента на его валу;
- привод должен иметь жесткую механическую характеристику с относительным падением скорости от холостого хода до номинальной нагрузки порядка 5 %;
- привод нереверсивный, режим работы — продолжительный с относительно спокойной нагрузкой.

Перечисленные требования могут быть реализованы в двух системах электропривода: ТП-Д , ТПЧ – АД и электропривод с вентильным двигателем. На рисунке 3.3 приведена схема и характеристики электропривода по системе ТП-Д.

В связи с редкой необходимостью реверса привода, преобразователь может быть выполнен по нереверсивной схеме. Это существенно упрощает

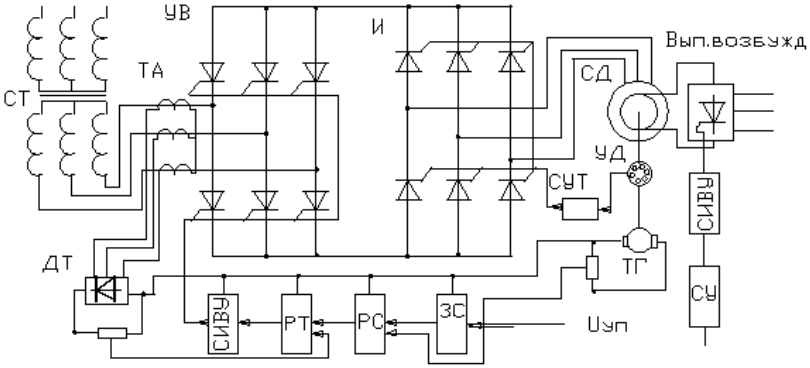
схему электропривода, ее обслуживание и надежность. Кроме этого стоимость реверсивного преобразователя значительно выше стоимости нереверсивного. С этой же целью вместо обратной связи по частоте вращения используется обратная связь по ЭДС.



а б

Рисунок 3.3 Электропривод бурового насоса: а–схема; б-характеристики. Блок регуляторов БР включает в себя гальваническую развязку РГ, фазочувствительный выпрямитель ФВ, задатчик интенсивности ЗИ, регулятор ЭДС РЭ с узлом ограничения УО и регулятор тока РТ. Блок датчиков содержит датчик тока ДТ и датчик напряжения ДН.

Схема электропривода с вентильным двигателем приведена на рисунке 3.4



3.4 Электропривод с вентильным двигателем

Этот вид привода для буровых насосов является наиболее перспективнымдля буровых насосов. В электроприводе с вентильным двигателем, постороенном на базе синхронного двигателя с электромагнитным возбудителем, основными элементами являются: управляемый выпрямитель, инвертор, ведомый вторичной сетью,система

управления инвертором с угловым датчиком. Регулирование скорости осуществляется изменение напряжения выпрямителя и изменением тока возбуждения. Основными достоинствами этого привода являются:

- высокий КПД, обусловленными малыми потерями в роторной цепи;
- высокий коэффициент мощности;
- изменением магнитного потока можно регулировать потребление и передачу реактивной мощности, т. е. можно влиять на качество напряжения в питающей сети.

3.1.2 Электропривод бурового ротора

Буровой ротор предназначен для приведения во вращение колонны бурильных труб. При роторном бурении привод используется для вращения долота., при турбинном бурении — для вспомогательных целей.

Долото, находящееся на нижнем конце колонны бурильных труб (КБТ) и создающее усилие на забой скважины за счет части веса КБТ, при его вращении разрушает породу и обеспечивает углубление скважины. Разрушению породы способствует также гидромониторное действие струй бурового раствора, истекающих под давлением из отверстий насадок долота.

Важная особенность наземных приводов КБТ и долота состоит в том, что скорость привода может достаточно просто регулироваться различными способами (с помощью механических многоскоростных передач, регулируемого электропривода и т.д.). При этом могут быть получены низкие скорости при высоких значениях момента.

За последние годы находят применение винтовые забойные двигатели, относящиеся к гидравлическим машинам объемного действия. Они характеризуются значительно меньшей частотой вращения вала, что обеспечивает достаточно высокую механическую скорость бурения и более высокую, чем турбобур проходку на долото.

Передача энергии долоту с поверхности через наземные передаточные механизмы КБТ вызывает значительные потери мощности и сильно снижает КПД всего процесса бурения, особенно когда глубина скважины достигает 4 — 5 тыс. м.

В процессе бурения неоднородных пород момент сопротивления на долоте непрерывно меняется. Наиболее сильно колебания момента выражены при долотах режущего типа, меньше — при шарошечных долотах. Колебания момента сопротивления на долоте передаются по КБТ приводному двигателю ротора в виде упругих волн кручения, продольных колебаний и других возмущений, распространяющихся в стальных трубах со скоростью около 3 км/с [20].

В результате отражения волн кручения, вызванных заклиниванием долота, напряжения кручения, могут вызывать поломку КБТ.

При заклинивании долота, когда низ КБТ неподвижен, а ротор

продолжает вращаться, закручивая трубы, момент двигателя может достигнуть своего максимального значения. Чтобы ограничить возникающие при этом напряжения кручения в КБТ, следует ограничить момент, передаваемый от двигателя ротору. Этого можно достигнуть, применяя двигатели со сравнительно небольшой кратностью максимального момента $\lambda \leq 1{,}6 \div 1{,}8$ или используя в приводе ротора средства ограничения момента.

С заклиниванием долота связан также процесс передачи КБТ кинетической энергии, запасенной во вращающихся частях поверхностного оборудования привода ротора. Для уменьшения кинетической энергии, передаваемой КБТ, целесообразно иметь привод ротора с минимальным моментом инерции вращающихся частей.

Необходимая мощность привода ротора на установках различных классов составляет от 75 до 400 кВт. Стандартами на буровые установки регламентируется мощность и номинальный момент на вращающемся столе ротора, а также максимальная частота вращения (при малых нагрузках) и максимальный момент (при нулевой частоте вращения).

Выбор вида привода и его характеристик должен производиться с учетом следующих требований и технологических особенностей работы:

- привод ротора реверсивный,
- в основных рабочих режимах ротор должен вращаться в одном (прямом) направлении;
- обратное направление вращения необходимо только в некоторых вспомогательных режимах, поэтому допустим реверс путем оперативных переключений с кратковременным перерывом питания;
- режим работы длительный, причем момент нагрузки может быть постоянным или колебаться в некоторых пределах (вплоть до максимального);
- при регулировании частоты вращения вниз от номинальной привод должен обеспечивать возможность длительной работы при номинальном моменте нагрузки, вверх от номинальной — при постоянной номинальной мощности, однако практически привод ротора работает при меньших моменте и мощности, в связи с чем автоматическое обеспечение указанных законов регулирования не требуется
- пусковые характеристики привода не регламентируются, необходимо лишь, чтобы момент на роторе не превышал максимального, который составляет обычно 1,5—1,6 номинального;
- требуемый статизм механической характеристики в пределах номинальной нагрузки должен быть не более 5—10% номинальной частоты вращения;
- требования к плавности регулирования частоты вращения зависят от расчетной глубины бурения — плавное регулирование необходимо на

установках глубокого бурения, а на прочих установках допустимо ступенчатое изменение частоты вращения;

- привод должен иметь мягкую механическую характеристику на участке от номинального до стопорного режима;

стопорный (максимальный) момент должен быть ограничен на уровне 1,6—1,8 от номинального значения;

- для ограничения динамических нагрузок в КБТ привод по возможности должен иметь минимальный момент инерции, приведенный к оси КБТ;

- для реализации оптимальных режимов бурения желательно регулирование частоты вращения в широком диапазоне: от 100 — 150 об/мин (реже бывает до 200 об/мин) при проходке верхних интервалов скважины и до 20 об/мин - при регулировании частоты вращения вниз от номинальной,

-привод должен обеспечивать длительную работу при номинальном моменте нагрузки (регулирование с постоянным моментом), а при регулировании частоты вращения вверх от номинальной должен

обеспечивать регулирование с постоянной мощностью, не превышающую номинальную;

- при турбинном бурении ротор часто используют для вращения КБТ с малой частотой вращения, что предотвращает "зависание" КБТ в скважине и способствует улучшению процесса бурения. С помощью ротора выполняется раскрепление резьбовых соединений труб и др.

Выполнение указанных требований в полном объеме возможно при использовании привода ротора с плавным регулированием частоты вращения в широком диапазоне.

Указанным выше требованиям отвечают несколько систем электропривода ТП-Д, ТПЧ – АД, АВК.

В настоящее время основные механизмы действующих буровых установок оборудованы системой ТП-Д. Новые буровые установки в основном оснащаются электроприводом по системе ТПЧ-АД. Основным достоинством этой системы является применение более дешевого, менее инерционного асинхронного двигателя по сравнению с двигателями постоянного тока.

Схема электропривода бурового ротора, выполненного по системе ТП-Д, приведена на рисунке 3.5. Она в полной мере отвечает указанным требованиям. Схема привода ротора аналогична схеме управления электроприводом бурового насоса. Отличие состоит в наличии управляемого ограничителя УОТ уровня выходного напряжения регулятора ЭДС и узла управления УО, автоматически изменяющего этот уровень, т.е. сигнал $U_{ЗТ}$ задания тока (момента) двигателя ротора. Благодаря узлу УО в рабочем диапазоне достигается мягкая механическая характеристика электропривода. Точке А характеристики соответствует максимальное, а точке Q — минимальное.

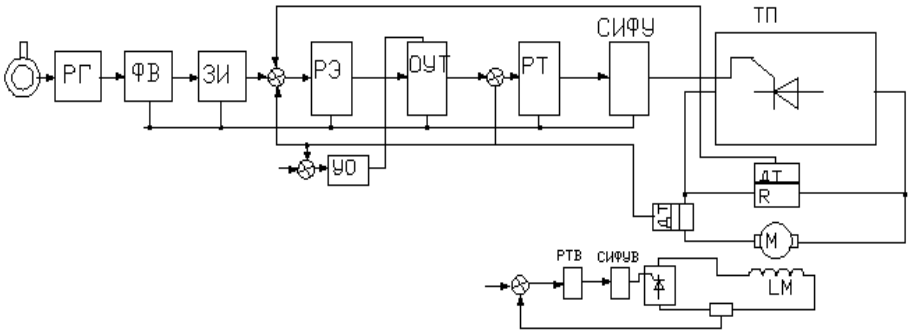


Рисунок 3.5 Принципиальная схема электропривода бурового ротора

3.1.3 Электропривод спуско-подъемного агрегата

Спуско-подъемным агрегатом называется комплекс механизмов буровой установки, предназначенный для перемещения (подъема или спуска) колонны бурильных или обсадных труб в соответствии с принятой технологической схемой [14].

Традиционный спуско-подъемный агрегат (рисунок 3.6) состоит из буровой лебедки с приводным и тормозным устройствами, буровой вышки, талевой системы (кронблок и талевый блок с элеватором), механизмов для закрепления колонны труб (клинья) и свинчивания и развинчивания труб (машинные ключи, автоматический ключ АКБ-3М). Процесс перемещения бурильных или обсадных труб — дискретный (на длину одной свечи). Установки глубокого бурения оснащаются механизмами для полуавтоматического отвода свечей от устья скважины и их расстановки на подсвечнике или для подачи свечей к скважине, получившими наименование ЛСП (автомат спуско-подъема).

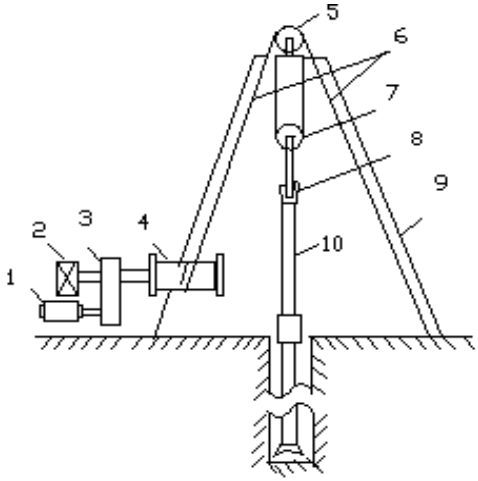


Рисунок 3.6 Конструктивная схема спуско-подъемного агрегата буровой установки: 1-двигатель лебедки; 2-тормозная машина; 3-редуктор; 4-барабан лебедки; 5-крон-блок; 6-талевый канат; 7-талевый блок; 8-элеватор; 9-вышка; 10-бурильная колонна.

Кроме подъема или опускания колонны бурильных труб (КТБ) с помощью буровой лебедки можно осуществлять подъем и опускание незагруженного элеватора, подачу долота на забой и ряд других вспомогательных операций. Так как все эти операции требуют различной мощности и характеристик электропривода, то в современных буровых установках для вспомогательных операций применяются отдельные механизмы с индивидуальным электроприводом. В этом случае буровая лебедка с электроприводом в основном используется для подъема и опускания КТБ, причем для подъема КТБ служат приводные двигатели, а для торможения при опускании — вспомогательные тормоза или приводные двигатели, работающие в генераторном режиме.

Подъем КТБ состоит из отдельных циклов, число которых равно числу свечей; за время одного цикла происходит подъем на высоту одной свечи (25 — 37 м), затем ее отвинчивают, переносят и устанавливают, после чего цикл повторяется. Таким образом, по мере подъема вес КТБ дискретно уменьшается и, следовательно, уменьшается момент статического сопротивления на валу приводного двигателя. Диапазон изменения момента статического сопротивления определяется отношением веса максимального груза к весу крюка с незагруженным элеватором и составляет от 14:1 до 20:1, причем большой диапазон относится к буровым лебедкам большей грузоподъемности. Так как время работы привода лебедки при подъеме КТБ труб перемежаются паузами для отвинчивания, переноса и установки труб, а также спуска

крюка с незагруженным элеватором, то режим работы привода лебедки — повторно-кратковременный с относительной продолжительностью включения 25 — 40 %.

При наличии уменьшающегося момента статического сопротивления на валу двигателя номинальной мощностью ее наибольшая производительность лебедки (без учета времени переходных процессов) может быть достигнута, если по мере подъема труб скорость подъема увеличивается, т.е. если выполняется условие

$$\xi = м_с \omega_б / \eta = const \qquad (3.2)$$

где $м_с$ - момент сопротивления на валу барабана лебедки;

$\omega_б$ — угловая скорость барабана лебедки; η - КПД передач от двигателя к барабану лебедки.

Передаточные числа, число передач и диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя выбирают обычно таким образом, чтобы механическая характеристика привода была близка к кривой постоянной мощности.

Изменять частоту вращения барабана лебедки (скорости подъема груза) для выполнения условия (3.2) можно ступенчато с помощью многоскоростных трансмиссий или бесступенчато с помощью электропривода с широким диапазоном регулирования частоты вращения. Возможно также уменьшение числа ступеней механической передачи до 2 при наличии электропривода с ограниченным диапазоном регулирования частоты вращения.

При бесступенчатом изменении скорости подъема упрощается и становится дешевле лебедка, однако ее привод становится сложнее и дороже; при ступенчатом изменении повышаются сложность и стоимость лебедки, но уменьшается сложность и стоимость привода. Технико-экономическими расчетами установлено [14], что чем больше глубина бурения, тем эффективнее применение регулируемого электропривода.

Число приводных электродвигателей определяется многими причинами (унификация применяемых электрических машин, удобство компоновки на ограниченной площади и др.), поэтому встречаются однодвигательные, двухдвигательные, трех-и даже четырехдвигательные схемы. Появление трех- и четы-рехдвигательных схем объясняется стремлением к унификации электрооборудования, применяемого на установках большой мощности.

В отечественной и зарубежной практике широко применяют двух двигательный привод. Двигатели двух двигательного привода лебедки выбирают равной мощности с обязательной проверкой возможности подъема КБТ максимального веса одним двигателем на низкой передаче.

Такой привод обеспечивает работу с пониженной произ-

водительностью в случае выхода из строя одного из двигателей, а также позволяет отключить один из двигателей при снижении нагрузки, что дает экономию электрической энергии. Однако два двигателя половинной мощности в 1,2 раза тяжелее и дороже, чем один двигатель большой мощности; требуется устройство для равномерного распределения нагрузки между двумя двигателями, работающими на один вал и др.

Основное время спускоподъемных операций (примерно 50 %) затрачивается на выполнение операций с КБТ, когда нагрузка на крюке Q составляет некоторую часть £ максимальной грузоподъемности Q_{max} спускоподъемного агрегата, т.е. £ = Q/Q_{max}. Поэтому особое внимание при проектировании буровых установок уделяют выбору высших скоростей перемещения КБТ и особенно незагруженного элеватора (подъем его осуществляется на каждом цикле спуска КБТ на одну свечу).

Исследованиями установлено [14], что при длине свечи 25м рациональная величина высшей скорости составляет 1,6 — 1,7 м/с. Во всех случаях скорость подъема незагруженного элеватора должна быть не менее 1,4—1,5 м/с.

Требуемая механическая характеристика регулируемого электропривода буровой лебедки изображена на рисунке 3.7.

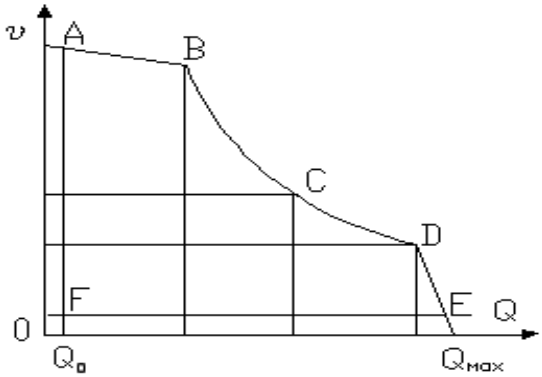


Рисунок 3.7 Механические характеристики спускоподъемного агрегата: υ - линейная скорость крюка; Q – усилие на крюке.

В связи с дискретным характером изменения нагрузки на крюке и постоянной величиной установленной мощности привода необходимо в результате рационального выбора числа передач и соответствующих им передаточных отношений обеспечить наилучшее использование ограниченной мощности привода.

Таким образом, электропривод спускоподъемного агрегата в

режиме подъема КБТ должен отвечать следующим основным требованиям:

- иметь необходимый диапазон регулирования скорости (10:1) и возможность регулирования скорости в режиме постоянной мощности;
- иметь достаточную перегрузочную способность (1,8 — 2,2 от номинального момента) для выполнения операций, связанных с ликвидацией аварий и расхаживанием колонны обсадных труб;
- пусковые характеристики должны обеспечивать плавный, но достаточно интенсивный разгон электропривода;
- жесткость механической характеристики должна быть такой, чтобы статизм не превышал *5 — 8%* номинальной частоты вращения;
- должен обеспечивать остановку крюка талевой системы с точностью ±(30 — 40) мм.

Режим работы электропривода повторно-кратковременный с изменяющейся от цикла к циклу относительной продолжительностью включения.

Указанным требованиям в полной мере удовлетворяют электроприводы по системе ТП — Д и ПЧ — АД. В современных отечественных буровых установках с индивидуальным электроприводом основных механизмов получил широкое применение электропривод по системе ТП — Д с подчиненным управлением координат и двух зонным регулированием скорости.

Функциональная схема электропривода буровой лебедки с зависимым управлением током возбуждения электродвигателя изображена на рисунке 3.8.

Управление скоростью подъема КБТ в первой зоне осуществляется следующими регуляторами: ПИ-регулятором тока РТ, П-регулятором скорости РС и регулятором мощности РМ. При этом САУ действует как обычная система регулирования скорости, обеспечивающая режим постоянной мощности электропривода. Скорость подъема КБТ задается сель-синным командоаппаратом СК.

Управление приводом осуществляется по двум каналам - по цепи якоря и по цепи возбуждения. Угол поворота СКА разделяет процесс регулирования на две характерные зоны.

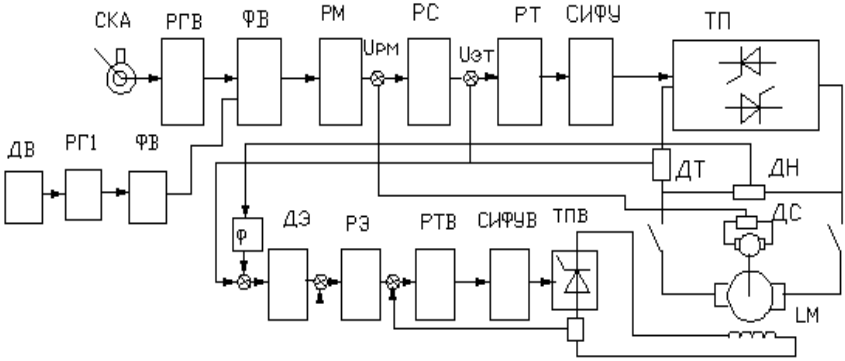


Рисунок 3.8 Принципиальная схема электропривода спуско-подъемного агрегата: СК – сельсинный командоаппарат; ДТ, ДН, ДВ, ДТВ,ДЭ, ДС – датчики соответственно тока якоря, напряжения, веса КБТ, тока возбуждения,ЭДС, скорости,; РМ, РС, РТ, РЭ, РТВ – регуляторы соответственно мощности, скорости,тока якоря, ЭДС, тока возбуждения; УОТ – узел ограничения тока якоря, РГ1,РГ2 – гальванические развязки; ЗИ – задатчик интенсивности, LM – обмотка возбуждения двигателя; К– контактор; ФВ – фазочувствительный выпрямитель; Ф – фильтр; ДСВ – делитель сигнала веса КБТ; U_{pc}, U_{pnz} , U_{pnd} , U_p - сигналы соответственно задания скорости, тока якоря и тока возбуждения, ЭДС;

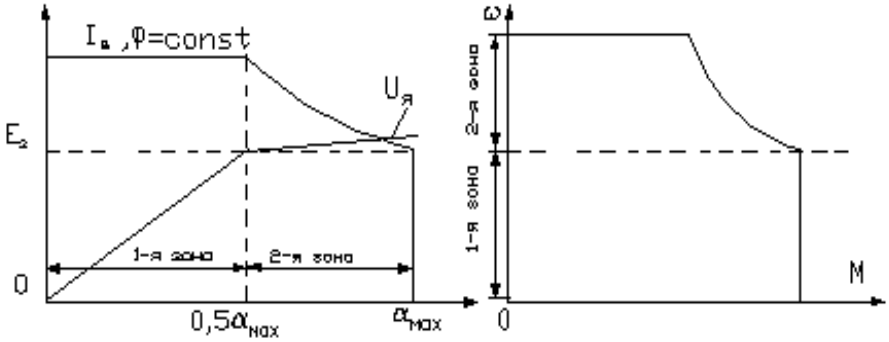
Параметры регулятора РС настраиваются таким образом, что номинальная скорость подъема КБТ и ЭДС двигателя достигаются уже при небольшом угле поворота рукоятки командоаппарата

$\alpha = 0{,}5\ \alpha_{max}$. Дальнейшее увеличение угла поворота СК приводит к увеличению скорости за счет ослабления магнитного поля

Управление скоростью во второй зоне (рисунок 3.9) осуществляется ПИ-регулятором тока возбуждения РТВ и П-регулятором ЭДС РЭ, при этом САУ действует как система стабилизации ЭДС двигателя. Сигнал, пропорциональный фактическому значению ЭДС, получают как разность сигналов датчика напряжения ДН и датчика тока ДТ, причем сигнал ДН является преобладающим. На вход регулятора РЭ подается постоянный сигнал задания U_{33}, соответствующий номинальному значению ЭДС, и сигнал обратной связи по ЭДС $U_{ос\ э}$.

При регулировании скорости в первой зоне сигнал на выходе РЭ максимальный и равен уставке узла ограничения регулятора РЭ (регулятор находится в зоне "насыщения"), в связи, с чем ток возбуждения остается постоянным и равным номинальному. После того, как будет достигнуто номинальное напряжение якоря, при дальнейшем увеличении угла поворота СК в пределах от $0{,}5\ \alpha_{max}$ до α_{max} напряжение на якоре и ЭДС

несколько возрастает. При этом ЭДС немного превышает заданную величину. В этом случае вступает в действие регулятор РЭ и уменьшает ток возбуждения, поскольку регулятор РЭ выходит из зоны "насыщения" и работает на линейном участке характеристики. Сигнал задания на входе РС (сигнал $U_{зс}$) почти полностью компенсируются сигналом обратной связи по скорости, снимаемым с тахогенератора BR. При повышении скорости во второй зоне от номинальной до максимальной напряжение на якоре увеличивается лишь на несколько процентов.



а б

Рисунок 3.9 Характеристики управления (а) и механическая характеристика электродвигателя (б).

Таким образом, управление возбуждением является зависимым от управления каналом регулирования по цепи якоря, причем сигнал обратной связи по ЭДС является тем связующим звеном, который обеспечивает согласованное действие обоих каналов управления. Рассмотренная САУ обеспечивает линейную зависимость скорости от сигнала задания $U_{зс}$ в диапазоне от нуля до максимального значения.

В электроприводе буровой лебедки уровень максимальной скорости должен изменяться в зависимости от веса КБТ таким образом, чтобы мощность, развиваемая приводом, оставалась приблизительно постоянной. С этой целью предусмотрен узел регулирования мощности РМ (точнее — ограничения мощности) в зависимости от веса КБТ. Узел представляет собой пропорциональный усилитель с управляемым ограничением выходного напряжения. Уровень ограничения регулируется с помощью функционального преобразователя по нелинейному закону в зависимости от величины сигнала U датчика усилия на крюке. При этом скорость с увеличением веса КБТ автоматически снижается, обеспечивая режим постоянной мощности электропривода. С увеличением усилия на крюке, благодаря действию узла ограничения мощности, напряжение на

входе РС U_{3C}, а, следовательно, и скорость подъема КБТ будут тем меньше, чем больше ее вес. При номинальном и более высоком усилии на крюке ослабление магнитного поля двигателя не происходит. Под подачей долота понимают последовательное опускание верхней точки КБТ, осуществляемое в процессе разрушения породы. В установившемся режиме бурения скорость подачи долота должна быть равна скорости разбуривания породы. Если скорость подачи долота превосходит скорость разбуривания породы, то нагрузка на забой растет, что может повлечь за собой искривление ствола скважины или поломку бурильных труб. Если скорость подачи долота меньше скорости разбуривания, то нагрузка на забой уменьшается, что приводит к уменьшению скорости бурения.

Процесс бурения горных пород контролируется по показания амперметра, измеряющего ток якоря, и датчика веса.

При ручной подаче по показаниям приборов (амперметра в цепи статора бурового двигателя и индикатора веса) периодически растормаживают барабан лебедки, что приводит к подаче долота. Ручным способом весьма трудно получить плавную и равномерную подачу долота. Эта задача решается применением автоматических регуляторов подачи долота.

3.1.4 Анализ систем автоматизации процессом бурения

При использовании автоматических регуляторов долото подается на забой автоматически в зависимости от параметров, характеризующих режим бурения, например, давления на забой или тока статора бурового двигателя.

В зависимости от места расположения автоматические регуляторы подачи долота бывают наземными или глубинными (погружными).

Наземные автоматические регуляторы подачи по конструктивному признаку силового узла разделяют на электромашинные, гидравлические и фрикционные. Если конструкция силового узла позволяет только опускать КБТ с различной скоростью, то такие автоматические регуляторы называют пассивными. Если же имеется возможность не только опускать, но и поднимать КБТ, то такие регуляторы называют активными.

Эффективность работы буровой установки в значительной мере зависит от качества работы тормозной системы. Существует несколько устройств, решающих эту задачу.

Схема электропривода постоянного тока с автоматическим регулированием скорости подачи приведена на рисунке 3.10. В схеме используется режим динамического торможения. Принципиально система динамического торможения может быть реализована при электроприводе как постоянного, так и переменного тока, Практическое применение получили только системы постоянного тока.

Схема содержит следующие элементы: МЛ - электродвигатель

лебедки; ОВ - обмотка возбуждения; *BR* - тахогенератор; $R_{д.т}$ - сопротивление динамического торможения; ТПВ - тиристорный возбудитель; ДС, ДТВ, ДВ - датчики соответственно скорости, тока возбуждения и веса; ЯГР - ячейка гальванической развязки; РСС, РТВ - регуляторы соответственно скорости спуска и тока возбуждения; ФВ - фазочувствительный выпрямитель; СКТ - сельсинный командоаппарат торможения; УЗ, УК, УН, УП, УОВ - узлы соответственно запирания, коррекции, нелинейности, перемножения и ограничения возбуждения; БО - блок ограничения. Кривая *1* соответствует номинальному рабочему режиму системы (ток якоря 1640 А), кривая *2* - ограничению по току якоря (2600 А).

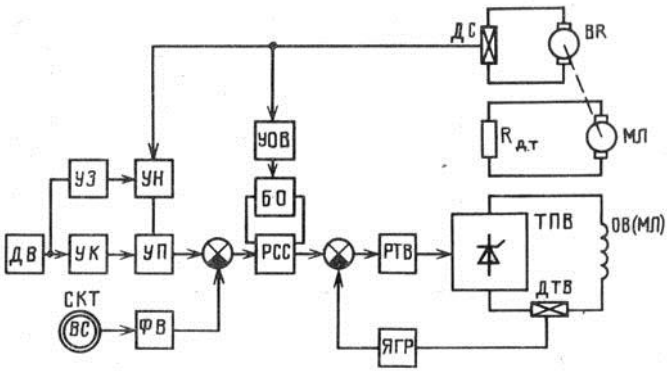


Рисунок 3.10 Схема автоматического регулирования процесса спуска КБТ и динамическим торможением.

Система управления динамическим торможением состоит из трех контуров. Первый (внутренний) - это контур регулирования тока возбуждения, второй - контур регулирования тока якоря, третий (главный) — контур регулирования скорости. На вход регулятора скорости спуска (РСС) задающий сигнал подается по двум каналам: в основном режиме (разгон на спуск и движение на установившейся скорости) - каналу обратной связи по скорости, в режиме замедления - каналу форсировки торможения. По первому каналу задание скорости спуска подается автоматически в функции веса. При управлении по этому каналу производится разгон системы на спуск и автоматический выход на оптимальный установившийся режим работы. По второму каналу оператор управляет режимом замедления системы в конце цикла спуска или в любой желаемый момент времени. Управление по второму каналу осуществляется от сельсинного командоаппарата торможения (СКТ). При этом обеспечивается форсированное нарастание тока возбуждения и момента динамического торможения.

На установках наземного бурения с глубиной скважин до 5000 м при

централизованном электроснабжении применяется асинхронный электропривод буровой лебедки с тиристорным регулятором скольжения (АД-ТРС), допускающий только кратковременное регулирование скорости. Система АД-ТРС представляет собой асинхронный привод с фазовым управлением тиристорным преобразователем в роторе двигателя (рисунок 3.11). В цепь ротора двигателя включен трехфазный управляемый выпрямитель, собранный по мостовой схеме, нагрузкой которого служат пусковые сопротивления, шунтируемые в процессе разгона тиристорами. Выбор регулировочной характеристики обеспечивается положением рукоятки сельсинного командоаппарата.

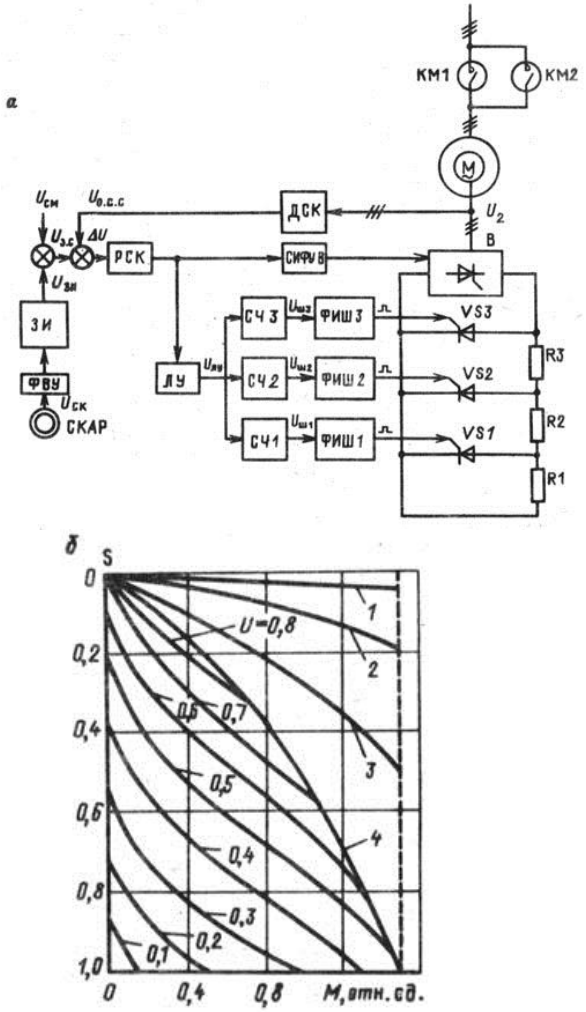


Рисунок: 3.11 Функциональная схема (а) и механические характеристики буровой лебедки с тиристорным регулятором скольжения

СИФУ - система импульсно-фазового управления; КМ - реверсор высокого напряжения; М - электродвигатель; В - тиристорный выпрямитель; R-пусковые сопротивления; VS- шунтирующие тиристоры; СКАР - сельсинный командоаппарат; ЗИ - задатчик интенсивности; ДСК - датчик скольжения; РСК - регулятор скольжения; ФИШ - формирователи импульсов управления шунтирующими тиристорами; СЧ - счетчики; ЛУ - логическое устройства; ФВУ - фазочувствительное выпрямляющее устройство; $U_{зн}$, $U_{к}$, $U_{ш}$, $U_{см}$, $U_{з.с}$, $U_{о.с.}$: сигналы соответственно задатчика интенсивности, сельсинного командоаппарата, управления шунтирующими тиристорами, смещения, задания скорости и обратной связи по скорости. *1-4* - характеристики (/ — естественная, *2—4* - реостатные)

Более качественно автоматизация опускания КБТ обеспечивают электромашинные регуляторы подачи долота активного типа РПДЭ-7, РПДЭ-8, заменившие выпускаемые ранее с электроприводом по системе Г — Д регуляторы подачи долота типа РПДЭ-3. Они обеспечивают поддержание режимов бурения скважин при турбинном и роторном бурении. Они входят в комплект серийных буровых установок последних выпусков (РПДЭ-7 для морских буровых установок). Регуляторы обеспечивают режим поддержания заданного значения нагрузки на долото (веса инструмента на крюке), т.е. основной режим, и режим поддержания заданного значения скорости подачи или подъема инструмента — вспомогательный режим. Регуляторы подачи долота РПДЭ-7 и РПДЭ-8 оснащены электроприводом по системе ТП — Д.

Объектом регулирования в автоматической системе подачи долота является буровой инструмент в соприкосновении с породой. Входной величиной для объекта регулирования служит скорость подачи, а выходной (регулируемой величиной) — нагрузка на долото.

В серийно выпускаемых регуляторах подачи электромашинного типа использован способ поддержания нагрузки на долото путем формирования скорости подачи как величины, пропорциональной рассогласованию между текущим и заданным значением нагрузки. При этом нагрузка на долото является разностью между полным весом КБТ и усилием на крюке. Функциональная схема регулятора подачи долота типа РПДЭ-8 изображена на рисунке 3.10.

В зависимости от грузоподъемности спускоподъемного агрегата буровой установки могут применяться два исполнения измерительного узла датчика веса — упругое кольцо растяжения или чашечная мембрана. Диапазон измерения усилия на крюке 0 — 4000 кН, выходное напряжение датчика 0—10 В, погрешность измерения усилия на крюке ±1,5 %.

Разность между сигналом задания U3B и сигналом UB, поступающим от датчика веса воздействует на регулятор РВ, выходной сигнал которого в свою очередь является сигналом заданного значения ЭДС (в

установившемся режиме сигналом заданного значения скорости подачи долота) регулятора ЭДС РЭ.

Таким образом, изменение усилия на крюке при бурении приводит к изменению сигнала на выходе регулятора РВ, являющегося задающим сигналом для контура регулирования скорости подачи долота.

Система управления электроприводом состоит из двух контуров регулирования: внутренний контур регулирования тока включает в себя регулятор тока РТ, систему импульсно-фазового управления СИФУ, тиристорный преобразователь ТП и датчик тока ДТ; внешний контур регулирования ЭДС включает в себя регулятор ЭДС РЭ, контур регулирования тока и датчик ЭДС ДЭ. Сигнал, пропорциональный ЭДС двигателя, получают как разность сигналов датчиков напряжения ДН и тока ДТ.

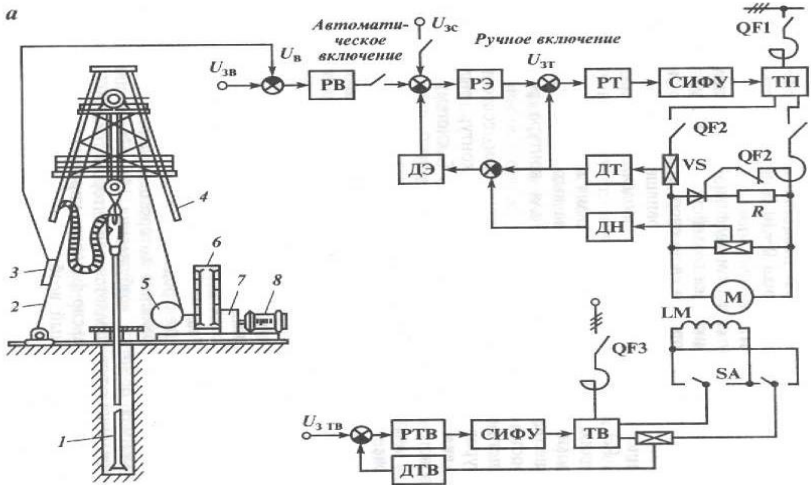


Рисунок 3.12 Функциональная схема автоматического регулятора подачи долота(а); механические характеристики электропривода; 1- бурильный инструмент; 2 – талевый канат; 3- датчик веса; 4 – буровая вышка,

Система автоматического регулирования нагрузки на долото работает по принципу отклонения. Отклонение нагрузки от заданного значения через систему управления электропривода изменяет скорость подачи долота и восстанавливает нагрузку на долото до заданного значения.

Реверсирование электродвигателя М производится переключателем SA, с помощью которого изменяется полярность на зажимах обмотки возбуждения LM. Стабилизация тока возбуждения осуществляется регулятором тока РТВ, который через систему импульсно-фазового управления СИФУ воздействует на тиристорный возбудитель ТВ. На вход регулятора РТВ поступает разность сигналов заданного тока возбуждения U3ТВ и от датчика тока возбуждения ДТВ.

Для защиты электрических цепей от короткого замыкания используются автоматические выключатели QF.

В режиме динамического торможения якорь двигателя с помощью тиристора VS подключается на сопротивление R.

В системе управления предусмотрены также следующие виды защит:

щита тиристорного преобразователя от коммутационно-перенапряжений;

быстродействующая защита от аварийных перегрузок по

щита от превышения максимально допустимой скорости приводного электродвигателя; защита от перегрузки талевой системы буровой установки с помощью регулируемой системы ограничения стопорного момента электродвигателя.

Основные технические требования к электроприводу РПДЭ:

- режим работы длительный с относительно спокойной нагрузкой;
- пусковой момент должен быть достаточным для создания требуемого максимального усилия на крюке;
- диапазон регулирования скорости от нуля до номинально значения, регулирование скорости в режиме постоянного момента;
- электропривод реверсивный;
- статизм механической характеристики не более ***5—10 % от*** номинальной скорости.

К основным параметрам электропривода РПДЭ относятся установленная мощность привода и максимальная частота вращения, соответствующая максимальной скорости подачи *КБТ — 80 — 90* м/ч.

Совмещение функций регулятора подачи аварийного привода, рассчитанного на подъем КБТ максимального веса со скоростью, достаточной для предотвращения осложнений в стволе скважины, приводит к тому, что параметры электропривода регулятора подачи долота выбирают***ся*** не по основному, а по аварийному режиму.

Кроме того, электропривод регулятора подачи долота используется для подъема и кратковременного приложения максимальной нагрузки при монтаже и испытании буровой установке..

На буровых установках в зависимости от максимальной грузоподъемности используются приводные электродвигатели мощностью 55; 75 ***и*** 90 кВт с номинальной частотой вращения 1000—1180 об/мин.

Основным оборудованием РПДЭ является электродвигатель и комплектное устройство управления (шкаф с силовым ТП и схемой управления). Для дистанционного управления регулятором подачи долота используется аппаратура, расположенная на пульте бурильщика.

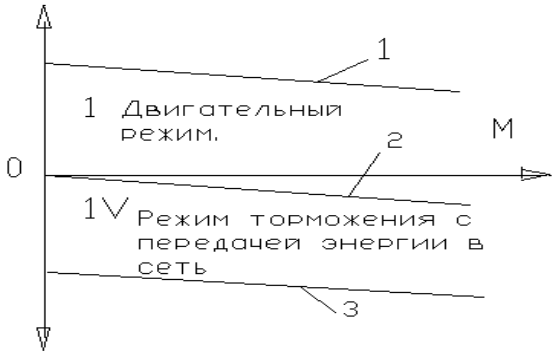


Рисунок 3.13 Механические характеристики привода спуско-подъемного агрегата с рекуперативным торможением.

3.2. Электроприводы горных машин

Общие сведения[8]

Современный одноковшовый экскаватор (прямая лопата) — являются основной горной машиной при производстве погрузочно-разгрузочных работ на открытых горных разработках. Она широко используется при производстве погрузочно-разгрузочных работ на открытых горных разработках. От бесперебойной работы экскаваторов существенно зависит эффективность работы горного предприятия в целом.

В состав механического оборудования экскаватора-лопаты (рисунок 3.14) входят: рабочее оборудование, поворотная платформа 4 и ходовая часть (тележка 3.

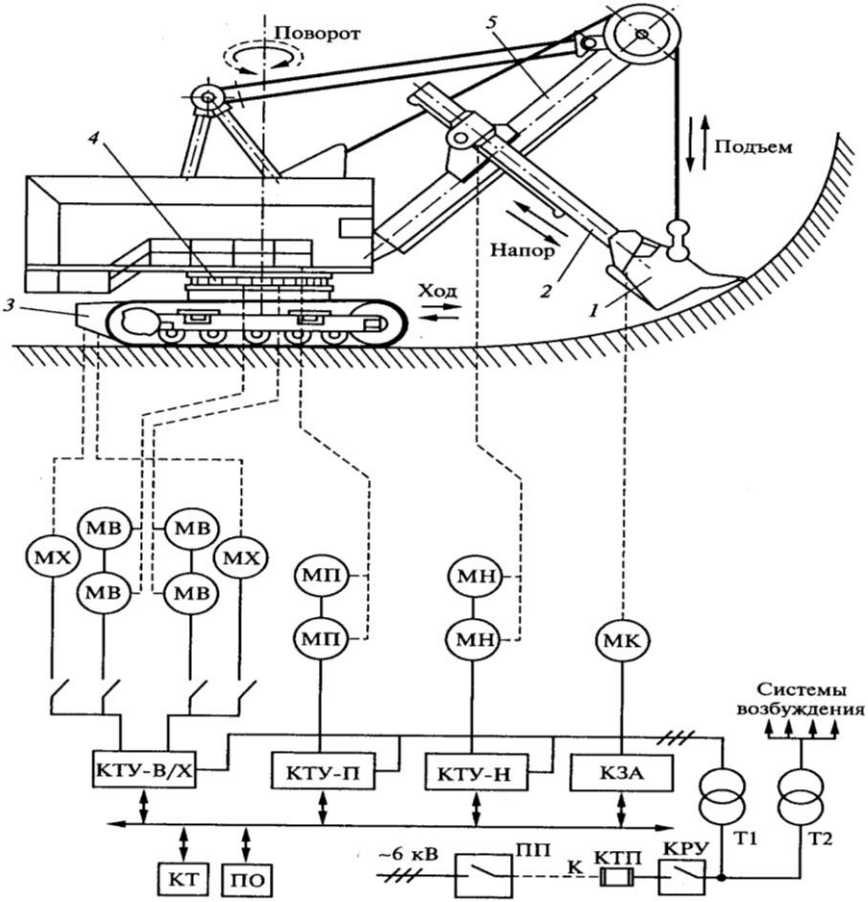


Рисунок 3.14 Основные элементы экскаватора: ПГТ -приемный пункт; К - кабель гибкий; КТП-кольцевой токоприемник; КРУ - комплектное распределительное устройство; ТI и Т2 - главный и вспомогательный трансформаторы; КТУ-П, КТУ-Н и КТУ-В/Х - соответственно комплектные тиристорные устройства электроприводов подъема, напора и поворота (вращения); КЗА - коммутационно-защитная аппаратура; МП, МН, МВ и МХ - электроприводы подъема, напора, поворота и хода соответственно.

Экскаватор содержит комплект электрифицированных механизмов, рассчитанных на длительную работу в тяжелых условиях. Эти машины, начиная с ковшей в 2,5 м^3, изготовляются как электрические лопаты, и как драглайны.

Основное отличие экскаваторов-лопат и драглайнов заключается в конструктивной связи ковша с рабочим оборудованием и способе экскавации

грунта. Ковш лопат сочленен с подвижной рукоятью, а ковш драглайнов подвешен на канатах. Кроме того, драглайны оборудуются длинными направляющими стрелами, а наиболее крупные из них с ковшами емкостью 6 $м^3$ и более — шагающим механизмом передвижения

Процесс экскавации заключается в разработке горного массива, т.е. его разрушении с циклическими режимами копания в забое, и транспортировании ковша к месту разгрузки. Продолжительность цикла малых машин с ковшами объемом 2,5...5 м3 составляет 5...32 с и растет одновременно с увеличением геометрических размеров ковша и рабочего оборудования. Цикл заключает в себе следующие технологические операции: копание, подъем груженого ковша с одновременным поворотом платформы к месту выгрузки, разгрузка и возвращение порожнего ковша в забой.

Оперативное перемещение ковша характеризуется трех координатной системой воздействия со стороны главных электроприводов. Периодически, по мере отработки забоя, возникает необходимость перемещения экскаватора, что выполняет механизм хода. Условно к главным относится маломощный электропривод механизма открывания днища ковша, необходимый для разгрузки лопат.

3.2.1 Электропривод одноковшовых экскаваторов

Экскаватор питается переменным трехфазным током от карьерной или строительной сети электроснабжения. Через кольцевой токоприемник электроэнергия передается в высоковольтный распределительный шкаф, расположенный на поворотной платформе.

Находящиеся сейчас в эксплуатации экскаваторы оснащены электроприводами главных механизмов по схеме силовой магнитный усилитель - генератор - двигатель (СМУ-Г-Д) постоянного тока - экскаваторы самых массовых серий ЭКГ-5А и ЭКГ-8И. На отдельных экскаваторах серии ЭКГ-10 и ЭКГ-12,5 использованы тиристорные возбудители генераторов, то есть, реализована система ТВ-Г-Д. На экскаваторах ЭКГ-20 использованы электроприводы с тиристорными преобразователями в якорных цепях - схема ТП-Д.

Формирование заданных механических характеристик главных электроприводов обеспечивается индивидуальным электроприводом, выполненным по системе Г-Д с управлением от статических возбудителей. Генераторы электроприводов совместно с приводным высоковольтным двигателем скомпонованы в электромашинный преобразовательный агрегат.

Электропривод подъемного механизма предназначен для управления скоростью и направлением перемещения ковша в вертикальной плоскости. Основными являются следующие технологические функции для лопат: подъем ковша в процессе копания в забое, подъем или опускание ковша для разгрузки в транспорт или отвал и опускание ковша при возвращении в забой.

Механизм состоит из подъемной лебедки и канатов. Реверсивная лебедка приводится в движение индивидуальным двигателем через редуктор. Режим работы двигателей - интенсивный повторно-кратковременный. Конструктивное исполнение двигателей - горизонтальное с двумя концами вала для соединения с муфтой редуктора и установки тормозного шкива. Имеются образцы экскаваторов с без редукторным тихоходным электроприводом, на валах двигателей которого непосредственно установлены барабаны подъемной лебедки. При использовании двигателей постоянного тока регулирование скорости двигателей ведется изменением напряжения на обмотках якоря при питании их от индивидуальных преобразователей. Для ускоренного опускания ковша к подошве забоя после разгрузки применяется ослабление магнитного потока путем регулирования напряжения на обмотке возбуждения или включение последовательно с обмоткой дополнительного резистора.

При использовании асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором применяется частотное регулирование скорости. Ускоренное опускание также выполняется при ослабленном потокосцеплении. Оперативное торможение привода, включая режимы удержания груженого ковша, - электрическое. Привод оборудован стояночным колодочным тормозом и концевым командным аппаратом ограничения пути для исключения «переподъема» ковша.

В группе главных электроприводов электропривод подъема является основным в соответствии с заданным значением нагрузки, скоростью подъема ковша и производительностью экскаватора.

Электропривод напорного механизма лопаты обеспечивает управление скоростью и направлением поступательного перемещения рукояти с ковшом в горизонтальной плоскости. Он предназначен для управления положением ковша при копании в забое, выводе из забоя, перемещении к транспортному средству или отвалу и возвращении в забой. С помощью электропривода оператор задает необходимое напорное усилие на забой, выбирает степень заглубления ковша и трассу копания. Существенна роль электропривода и при коррекции положения ковша во время разгрузки в кузов транспортного средства и иных маневрах, требующих точного управления.

Механизм состоит из напорной лебедки и канатов в канатном варианте или зубчатой плоской передачи в реечном варианте. Реверсивная лебедка или реечная передача приводятся в движение индивидуальными двигателями через редуктор. Режим работы двигателя и конструктивное исполнение аналогичны электроприводу подъема. Для защиты механизма от чрезмерных динамических нагрузок привод может быть оборудован муфтой предельного момента, содержащей эластичное и фрикционное звенья.

Оперативное торможение - электрическое с применением стояночного тормоза колодочного типа. Ограничение рабочего хода рукояти обеспечивается механическими упорами, а для смягчения ударов при

неправильном маневрировании ковшом дополнительно используется интенсивное торможение по сигналу концевых командных аппаратов.

Электропривод поворотного механизма (рисунок 3.15) обеспечивает управление скоростью и направлением вращательного движения

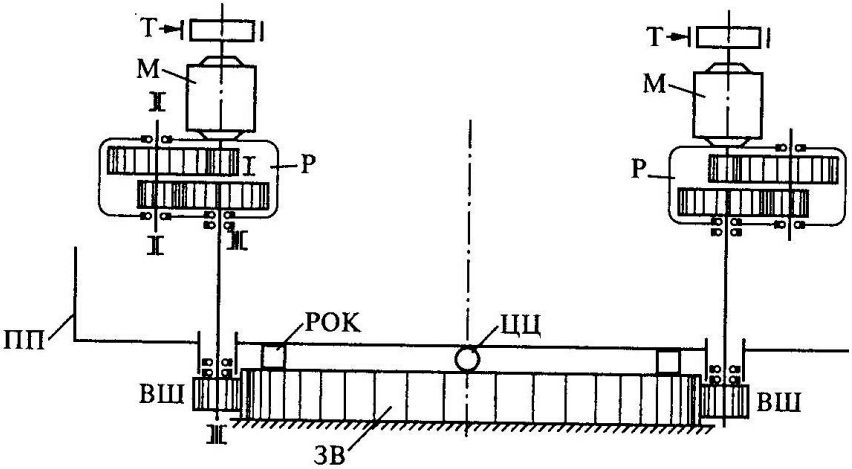


Рисунок 3.15. Механизм поворота

полноповоротной платформы экскаватора с установленным на ней рабочим оборудованием. Электропривод предназначен для вывода ковша из забоя путем вращения платформы, перемещения к месту разгрузки и обратно. При точной разгрузке ковша в транспортное средство необходима полная остановка платформы, разгрузка в отвал выполняется на ходу, т.е. в процессе реверса платформы. Особенность механизма состоит в изменении момента инерции в значительных пределах.

Механизм состоит из редуктора с большим передаточным числом и выходных валов-шестерен, которые вращаются по неподвижному зубчатому венцу, расположенному на ходовой тележке лопат или опорных базах драглайнов. Привод, как правило, многодвигательный. Реверсивный режим работы с плавным нарастанием ускорения и управляемой скоростью обеспечивается индивидуальными двигателями, управляемыми от индивидуальных преобразователей. Ряд крупных драглайнов изготовлен с тихоходным электроприводом поворота.

На валах электродвигателей поворотного механизма установлены стояночные колодочные тормоза с дистанционным электропневматическим или электромагнитным управлением. Конструктивное исполнение двигателей — вертикальное с двумя концами вала.

Электроприводы механизмов перемещения экскаватора отличаются большим разнообразием, обусловленным конструктивным исполнением

механизмов. Наиболее распространен электропривод с индивидуальными двигателями. Механизм перемещения состоит из редуктора, тормоза и бортовых передач гусеничного хода.

Основные параметры электроприводов перечисленных механизмов экскаватора следующие: режим работы - S8; частота включений в 1 ч - не более 1000 (для поворотного механизма — 500, для механизмов хода и электромеханического шагания - 100); кратность перегрузки по моменту - 2...2,5; диапазон регулирования скорости - 10:1 (для механизмов хода - 5:1).

На большинстве действующих экскаваторов установлены электропри-воды, выполненные по системе Г-Д (генератор-двигатель постоянного тока)

Преобразовательный электромашинный агрегат имеет обычно синхронный или асинхронный электродвигатель и три генератора постоянного тока. От каждого генератора получает питание группа электродвигателей одного из главных механизмов, соединенных последовательно, параллельно или по смешанной схеме. Электродвигатели хода обычно питаются от одного из главных генераторов, когда соответствующий главный механизм не действует. Необходимое изменение угловой скорости двигателей обеспечивают регулированием тока возбуждения генератора и соответственно напряжения, подаваемого на электродвигатели. В некоторых случаях для дополнительного повышения скорости (выше номинальной) уменьшают ток возбуждения электродвигателя. Напряжение генератора должно автоматически регулироваться так, чтобы при малых нагрузках развивалась наибольшая угловая скорость электродвигателя, а при увеличении момента нагрузки скорость быстро снижалась вплоть до нуля при резком стопорении привода. Для этого система возбуждения генератора должна иметь высокое быстродействие, что реализовать весьма непросто, поскольку обмотка возбуждения обладает большой электромагнитной постоянной времени.

Электроприводы главных механизмов должны обеспечивать высокопроизводительную работу экскаватора при одновременном ограничении нагрузок механического и электрического оборудования. Этим требованиям наиболее полно отвечает экскаваторная механическая характеристика.

Применительно к копающим механизмам при рабочих перегрузках по моменту на валу обеспечивается незначительное снижение скорости двигателя (по сравнению со скоростью холостого хода). Когда момент двигателя достигает момента отсечки Мотс, скорость двигателя уменьшается до нуля при стопорном режиме. Значение стопорного момента Мост близко к предельно допустимому моменту по условиям прочности механизма и перегрузочной способности двигателя. Участок характеристики, на котором момент меньше Мотс называют рабочим, а участок, на котором он больше Мотс, — участком ограничения момента.

Недостатки силовой схемы электроприводов по системе Г-Д:

- большая установленная мощность электрических машин;
- пониженный КПД.;
- высокая инерционность цепей возбуждения генераторов.
- необходимость обеспечения непрерывного контроля состояния оборудования экскаватора в процессе эксплуатации, а также диагностики технического состояния его отдельных узлов и систем

В электрической схеме (рисунок 3.16) главных электроприводов, вы-полненных по системе ТП-Д, использован пяти обмоточный силовой транс-форматор ТI. Группа двигателей каждого из главных механизмов получает питание от соответствующего комплектного тиристорного преобразователя (КТУ), все силовые ТП-реверсивные. Электродвигатели хода подключаются контакторами к преобразователю привода поворота, когда последний не работает.

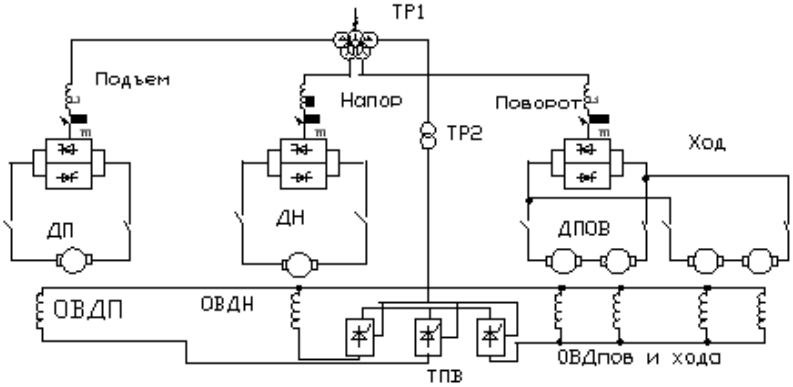


Рисунок 3.16 Схема включения силового оборудования экскаватора

Управление всеми электроприводами, так же и как в системе Г-Д, осуществляет машинист экскаватора с пульта управления.

Применение ТП и электродвигателей постоянного тока с малым динамическим моментом инерции и пониженной частотой вращения в сочетании с САР, обеспечивающей оптимальную форму механической характеристики и высокое быстродействие, позволяет придать экскаватору новые качества.

В тиристорном преобразователе при уменьшении выходного напряжения, от номинального, ухудшаются энергетические показатели системы: снижается коэффициент мощности, увеличивается содержание высших гармоник напряжения питающей сети. Это — главные недостатки тиристорного электропривода постоянного тока. Действие указанных факторов нейтрализуется применением фильтро-компенсирующих устройств

(ФКУ).

Принципиальная схема системы ТП-Д подъемного механизма приведена на рисунке 3.17. Для формирования механической характеристики экскаваторной формы предусмотрена двухконтурная система регулирования. Токовый контур формирует падающий участок экскаваторной характеристики. Для формирования горизонтального участка в контур тока введен регулятор ЭДС, что позволило исключить дополнительную машину-тахогенератор, Известно, что тахогенератор не является надежным звеном даже в более комфортабельных условиях эксплуатации. Для ослабления поля при опускании ковша в забой предусмотрено реле РОП, которое своими контактами шунтирует резистор, введенный в цепь питания обмотки возбуждения. В режиме копания этот контактор замкнут.

Система регулирования по цепи возбуждения стабилизирует заданную величину тока возбуждения. Управление приводом осуществляется сельсинным командоаппаратом СКА.

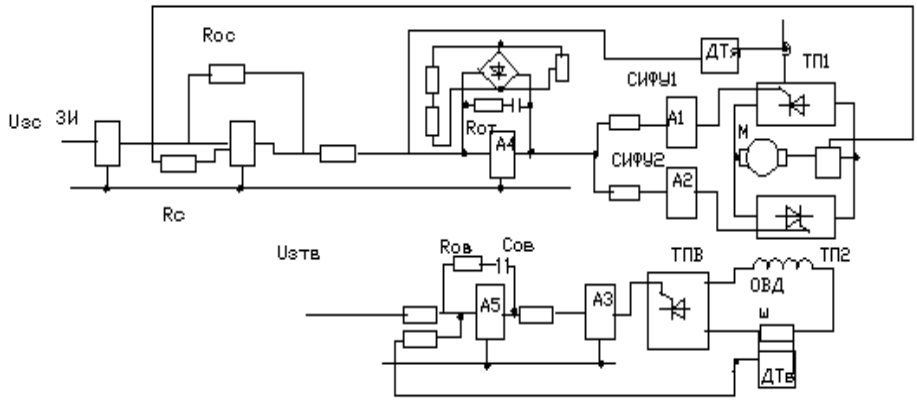


Рисунок 3.17 Электропривод подъемного механизма

Перспективным для экскаватора является применение частотно-регулируемого электропривода переменного тока, в частности ПЧ с неуправляемым входным выпрямителем, промежуточным звеном постоянного тока и выходным инвертором регулируемой частоты с формированием синусоидального выходного напряжения методом широтно-импульсной модуляции. Использование неуправляемого входного выпрямителя позволяет кардинально улучшить энергетические показатели преобразователя: получить коэффициент мощности, близкий к 1, и минимальное содержание высших гармоник.

Недостатком привода с ШИМ является сложность реализации тормозных режимов, необходимых, например, при спуске грузов. Для

рекуперации энергии в сеть требуется дополнительный инвертор (аналогичный тиристорному выпрямителю). Простым решением является рекуперативно-резисторное торможение, при котором энергия спуска выделяется в резисторах и преобразуется в теплоту [10]

Современным решением, использующим полностью управляемые полупроводниковые элементы, является преобразователь частоты с активным выпрямителем, система управления которого обеспечивает режимы рекуперации и поддержания значений напряжения и коэффициента мощности.

Основные недостатки, препятствующие широкому применению частотного электропривода в экскаваторах: повышенная сложность оборудования и недостаточная отработка изделий для тяжелых условий эксплуатации; дополнительная сложность в обеспечении тормозных режимов, необходимых в реверсивных электроприводах (в частности при спуске грузов); повышенная стоимость по сравнению с приводами постоянного тока.

3.2.2 Электропривод роторных экскаваторов

Общие сведения[22]

Одним из путей повышения эффективности работы машин землеройного комплекса является совершенствование систем электропривода и способов авторегулирования отдельных процессов. К главным приводам роторного экскаватора относятся электроприводы роторного колеса. Поворота платформы, ходового механизма и лебедки роторной стрелы, которые непосредственно участвуют в экскавации и транспортировке полезного ископаемого. Общий вид роторного экскаатора приведен на рисунке 3.18.

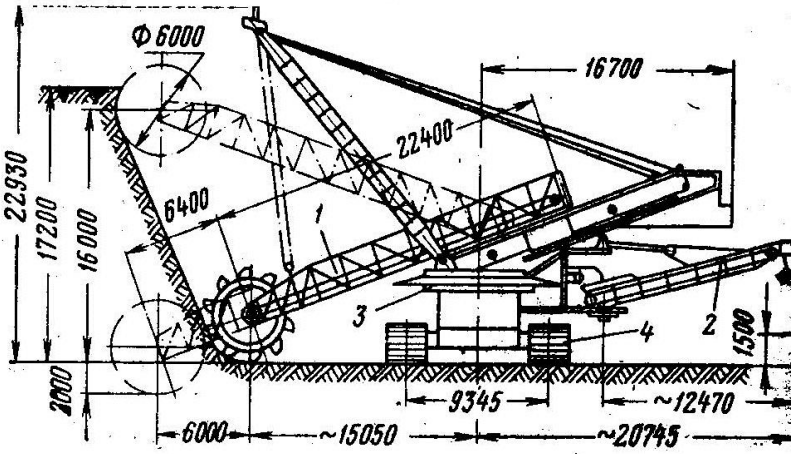


Рисунок 3.18 Общий вид роторного экскаватора

Для использования роторного экскаватора при обработке карьеров со сложной гипсометрией для лебедки наклона роторной стрелы используется привод постоянного тока.

Наибольший практический интерес представляют привода ротора и поворота платформы. Высокие регулировочные свойства этих приводов позволяют обеспечить полное использование машин комплекса. Автоматическое управление приводом поворота и компьютерное управление по программированию параметров стружки с помощью привода хода и лебедки наклона роторной стрелы обеспечивают использование конструктивных параметров экскаватора при заданной производительности и повышения коэффициента использования экскаватора за счет сокращения на вспомогательные операции.

Жесткая отрицательная обратная связь по толщине стружки и радиуса резания вводится с целью повышения точности обработки и быстродействия САР. В проекте решение требуемых характеристик обеспечивается за счет применения электропривода с высокими регулировочными свойствами.

Эффективность работы таких экскаваторов в значительной мере зависит от регулировочных свойств привода главных механизмов.

3.2.2.1 Устройство и режимы работы основных механизмов роторного экскаватора

К главным приводам роторного экскаватора относятся электроприводы роторного колеса, поворота платформы, ходового механизма и лебедки роторной стрелы, которые непосредственно участвуют в экскавации и

транспортировки вскрыши или полезного ископаемого. Электроприводы ходового механизма и лебедки роторной стрелы участвуют в определение высоты и толщины стружки, однако в процессе работы эти параметры не корректируются и производительность экскаватора определяется лишь скоростью поворота платформы и в отдельных случаях скоростью вращенья роторного колеса.

Поэтому на экскаваторах средней производительности, предназначенных для неселективной отработки карьеров, для лебедки роторной стрелы и ходового механизма, подходит асинхронный привод.

Для использования роторных экскаваторов при обработке карьеров со сложной гипсометрией для лебедки наклона роторной стрелы экскаваторов применяется привод постоянного тока по системе ТП-Д или привод переменного тока по системе ТПЧ-АД. Эти приводы обеспечивают возможность гибкого управления от программного устройства, которые в ряде случаев при селективной выемке полезных ископаемых может оказаться единственным эффективным средством, обеспечивающим удовлетворительную селекцию, с точки зрения оптимальной производительности.

В приводе поворота роторной стрелы необходимость плавного регулирования скорости с целью компенсации потерь производительности (по весу или объему) является в мировой практике общепризнанной. Для решения этой задачи могут быть использование системы Г-Д, ТП-Д, ТПЧ-АД, каскадные схемы. Выбор конкретной системы может быть сделан на основе сравнительной их оценки.

Применение индивидуального электропривода открывает большие возможности автоматизации процесса, повышения производительности за счет внутренних резервов системы, позволяет сравнительно легко выполнить требование к форме механических характеристик, к статическому и динамическому перепаду скорости, к диапазону регулирования и быстродействию.

3.2.2.2 Требования к электроприводу основных механизмов роторного экскаватора

Системы электроприводов главных механизмов роторного экскаватора должны иметь минимальный вес и габариты при небольших капитальных и эксплуатационных затратах, быть виброустойчивыми, защищенными от влаги и пыли, обеспечивать надежную работу, осуществлять автоматический пуск, торможение и реверсирование, иметь технологические блокировки, защищать двигатель и механизмы от перегрузок при встрече рабочего органа с непреодолимым препятствием.

Указанные требования являются общими для всех механизмов роторного экскаватора. Основные механизмы обычно дополняются дополнительными требованиями, связанными с процессом экскавации.

Регулирование процесса экскавации производится с поддержанием

постоянной мощности $P_{рот}$= const, $M_{рот}$=const., производительности $Q_{рот}$=const или площади сечение стружки $F_{ст}$=const. В основе оценки этих способов является критерий обеспечения максимальной производительности. Регулирование по закону $P_{рот}$=const не позволяет получить максимальную производительность экскаватора и обеспечить защиту двигателя от перегрузок. Этот способ дает лишь минимальную энергоемкость. Способ $M_{рот}$=const имеет преимущество, которая заключается в том, что он предохраняет весь механизм роторного колеса от перегрузок и дает возможность получить максимальную производительность только при определенных параметрах стружки, а именно t/b=0,8/1,5, где t-толщина снимаемой стружки, b-ширина стружки.

Третий способ сложно реализуется.

Четвертый способ регулирования $F_{ст}$=const обеспечивает получение максимальной производительности при различных соотношениях t/b и может применяться для любого грунта. Однако он не защищает от перегрузок двигателя роторного колеса.

Наиболее эффективным способом является четвертый способ, а для ограничения нагрузки можно использовать коррекцию.

Наиболее энергоемким процессом является копание. Даже для мягких пород он составляет порядка 60% от всей мощности экскавации. С увеличением крепости пород величина ее может достигать 80%. Поэтому требование к электроприводу могут быть сформулированы только с учетом процессов копания.

Для обеспечения высокой производительности роторного экскаватора угловая скорость и диапазон регулированя роторного колеса выбираются из условия разгрузки ковшей. Эти условия зависят от характеристик разрабатываемых пород. Наиболее высокая скорость возможна при разработке песков. При разработке суглинков скорость должна быть ниже на 20%. Кроме этого на процесс разгрузки влияет положение стрелы в вертикальной плоскости. Это обстоятельство заставляет снизить скорость еще на 25%.

Таким образом, диапазон регулирования скорости роторного колеса из-за условий разгрузки ковшей должен составлять порядки 2:1. Работа привода ротора характеризуется отсутствием статического режима работы ввиду непрерывного изменения нагрузки на валу двигателя. Это обуславливается периодичностью входа ковшей в забой, неоднородностью разрабатываемой породы, наличием других упругих деформаций и т.п. В случае мягких характеристик непостоянство момента может привести к недопустимому увеличению ширины снимаемой стружки, что в свою очередь увеличит момент нагрузки. Опыт показывает, что при жесткостях, меньше 10, резко возрастают динамические нагрузки.

Вторым фактором, положенным в основу оценки жесткости рабочей части механической характеристики, является определение потерь производительности в однородном грунте. При крутизне рабочей части

механической характеристики, равной 5%, потери производительности составляет 3-4% по сравнению с производительностью при бесконечно жесткой характеристике. Дальнейшее смягчение характеристики приводит к интенсивной потере производительности.

Кроме того, производительность экскаватора существенно зависит от способности роторного колеса преодолевать препятствия в виде неоднородных включений при меньшей потере скорости двигателя. Работа по преодолению податливого препятствия резко увеличивается при крутизне характеристике меньше 6%. Поэтому для получения максимальной производительности крутизна рабочей части характеристике должна быть меньше 5% в динамике. Экскаваторная характеристика привода не защищает механизм ротора при внезапных стопорениях. В таких случаях необходимо применять предохранительные муфты.

Механизм поворота накладывает дополнительное требование на привод поворота вследствие серповидности стружки, снимаемой при экскавации. Заполнение ковшей по мере удаления стрелы от продольной оси экскаватора уменьшается. Это приводит к снижению производительности при угле поворота в 70^0 до 40%. В целях повышения производительности экскаваторов необходимо регулировать скорость вращения двигателя поворота по закону

$$\omega=\omega_0/\cos\varphi;$$

где ω- скорость вращения двигателя поворота; ω_0 -скорость вращения двигателя поворота при φ=0; φ-угол поворота стрелы от продольной оси экскаватора. Практика показывает, что регулирование скорости вращения двигателя поворота целесообразно производить так: при $\varphi=60^0$ скорость его равнялась удвоенной скорости ω_0 и вплоть до углов $\varphi=90^0$ оставалась постоянной. При этом потери производительности не превышают 7%.Для сохранения постоянного сечения стружки должно выполняться условие $\omega_{рот}/\omega_0$=const. Таким образом, требуемый диапазон регулирования скорости поворотного механизма должен быть не менее 4:1.

Рассмотренным требованием в наибольшей мере отвечают системы ТПЧ-АД , ТП-Д. и электропривол с вентильным двигателем

Принципиальная схема электропривода по системе ТП-Д, удовлетворяющая перечисленным требованиям, приведена на рисунке 3.19. Схема содержит нереверсивный тиристорный преобразователь, выполненный по трехфазной мостовой схеме, систему возбуждения на тиристорах и систему регулирования, включающую регуляторы и датчики. При построении структурной схемы использован принцип подчиненного регулирования.

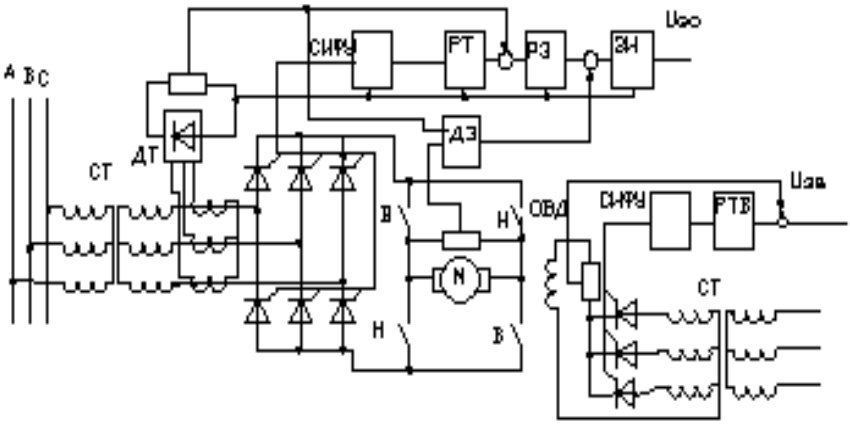


Рисунок 3.19 Принципиальная схема электропривода роторного колеса

В связи с небольшим диапазоном регулирования, для стабилизации заданной частоты вращения двигателя использован регулятор ЭДС. Исключение тахогенератора из системы регулирования существенно повышает надежность работы привода. С этой же целью в качестве датчика тока используются трансформаторы тока, выходные напряжения которых подаются на выпрямитель, выполненный по трехфазной мостовой схеме.

В системах подчиненного управления электроприводом выходной сигнал каждого предыдущего регулятора является задающим сигналом для последующего регулятора.

Системы подчиненного управления электроприводами по сравнению с ранее применяемыми системами, имеющими общий суммирующий усилитель, на входе которого суммируются задающий сигнал и сигналы обратных связей по скорости, напряжению, току и т.д., обладают рядом преимуществ. Отметим некоторые из них:

-возможность построения самых разнообразных схем управления по агрегатному принципу, т.е. на основе небольшого числа стандартных элементов (ячеек, блоков и т.д.);

-простота осуществления связи электропривода с бесконтактными логическими и вычислительными устройствами для управления сложными технологическими процессами;

-малая мощность управления;

-применение комплектных высоконадежных элементов, выпускаемых на основе современных технологий;

-возможность реализации оптимальных законов управления каждой управляемой величины по отдельности и электроприводом в

целом;

-простота схем, обеспечивающих ограничения управляемых величин (тока, скорости и др.) на заданном уровне;

-значительное снижение стоимости и сокращение сроков проектирования, монтажа и ввода в эксплуатацию электрооборудования и др.

В системах подчиненного управления задача регулирования координат электропривода возлагается на систему управления, использующую средства вычислительной техники и последние достижения электроники. В зависимости от использованной элементной базы системы управления могут выполняться аналоговыми, цифровыми и цифро-аналоговыми. В настоящее время в системах управления электроприводами основных механизмов отечественных экскаваторов применяются аналоговые системы. Ведутся работы по созданию цифровых систем управления на базе микропроцессорной техники.

Системы управления, построенные на аналоговых элементах, выполняются из функциональных блоков, решающих определенные задачи. Последние могут повторяться в различных по своему назначению электроприводах. В их номенклатуру входят: источники питания, задатчики входных сигналов, датчики управляемых величин (тока, напряж

3.2.3 Электропривод шагающего экскаватора

Общий вид шагающего экскаватора приведен на рисунке 3.20. Основными механизмами экскаватора являются: механизм поворота платформы, тяговый механизм и механизм подъема ковша. Электрооборудование экскаватора состоит из двух двигателей подъема, двух двигателей хода, четырех двигателей поворота платформы и двух двигателей тяги (натяжения). Характер нагрузок каждого двигателя определяется характером работы основных механизмов экскаватора.

Механизм поворотной платформы предназначен для горизонтального перемещения стрелы шагающего экскаватора с ковшом. Цикл работы механизма состоит из следующих этапов. Ковш набирает породу, в это время привод поворота платформы не работает. Затем происходит поворот платформы на некоторый угол α, который зависит от условий отработки забоя. Расчетный угол α равен 120°. Высыпание породы с ковша начинается еще до полной остановки привода, поэтому отдельной паузы для опорожнения ковша нет. Сразу после торможения начинается разгон в обратную сторону

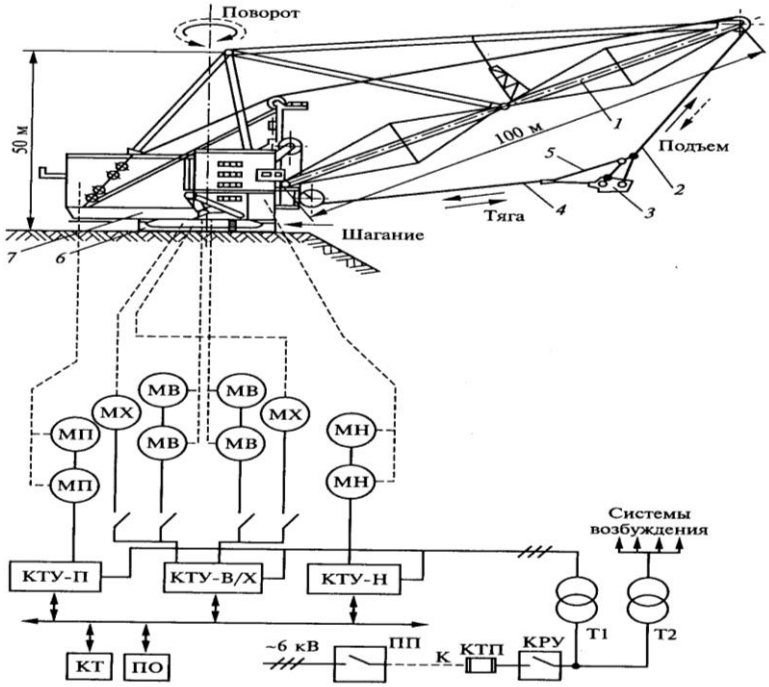


Рисунок 3.20 Общий вид шагающего экскаватора

Пауза для забора грунта определяется особенностями грунта исоставляет 8^0 , 20 секунд. Обычно считают, что отработка полного цикла с углом 120° должна занимать 60 секунд. Примерный вид тахограммы И нагрузочной диаграммы показан на рисунке 3.2.1..

Следует заметить, что из-за пространственно - распределенных масс и наличия ковша на гибкой подвеске для данного привода характерно требование ограничения рывка. Это требование реализуется ограничением темпа изменения момента на уровне 1-1.5 номинального в секунду, что видно на рисунке 3.21.

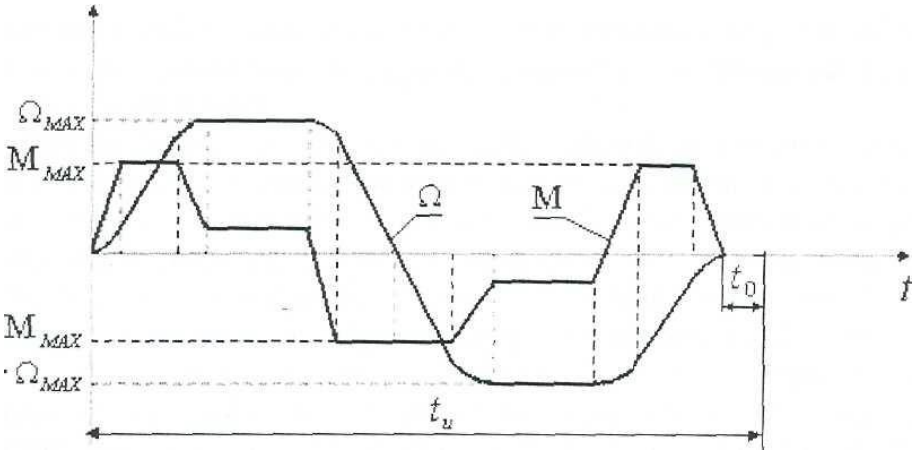


Рисунок 3.21 Нагрузочная диаграмма поворотного механизма

Тяговым механизмом осуществляется поступательное перемещение ковша в горизонтальной плоскости. Привод этого механизма обеспечивает черпание грунта в забое, натяжение канатов для отрыва ковша и поддержание его наклонного положения при перемещении к транспорту или отвалу.

Электропривод также обеспечивает разгрузку ковша и возвращение в забой. Механизм состоит из тяговой лебедки и канатов. Реверсивная лебедка приводится в движение индивидуальным двигателем независимого возбуждения через редуктор. Питание двигателя осуществляется от реверсивных преобразователей. Обычно, с целью унификации, электродвигатели подъема и тяги выбирают одного типа. Режим работы двигателей повторно - кратковременный. Для разгрузки ковша на ходу без снижения скорости подъема необходимо ослабить тормозной момент тяговых канатов. Такая операция достигается увеличением скорости травления и уменьшением потока возбуждения двигателей. Особенность привода-ударный характер нагружения и резкие стопорения при черпании в тяжелых грунтах.

Ввиду больших усилий и моментов установка механических предохранительных муфт исключена. Оперативное торможение - электрическое. Привод обеспечивается колодочным тормозом и концевым командоаппаратом ограничения пути.

Электропривод подъемного механизма предназначен для поддержания малого натяжения канатов при черпании грунта в забое, подъем ковша после заполнения к голове, удержание в процессе разгрузки и опускание снова в забой.

Механизм состоит из подъемной лебедки и канатов. Реверсивная лебедка приводится в движение индивидуальным приводом

через редуктор. Режим работы двигателей- интенсивный повторно-кратковременный. Регулирование скорости двигателей ведется изменением напряжения якоря. Для ускоренного опускания ковша к подошве забоя после разгрузки необходимо увеличивать скорость вверх от основной. Для оперативного торможения привода, включая режимы удержания груженого ковша, необходимо использовать электрическое торможение. Из анализа работы основных механизмов экскаватора следует, что эффективная их работа может быть система с высокими регулировочными свойствами, надежная в работе в тяжелых горных условиях. Кроме этого она должна быть проста в наладке и эксплуатации. В настоящее время такими свойствами обладают две системы: Г-Д и ТП-Д. Система ТП-Д имеет меньшее количество и лучшие энергетические показатели. Схема силовой части преобразователей приведена на рисунке 3.22.

Питание преобразователя осуществляется от четырех обмоточного трансформатора. Для защиты преобразователя от токов короткого замыкания в цепи питания включены ограничительные реакторы

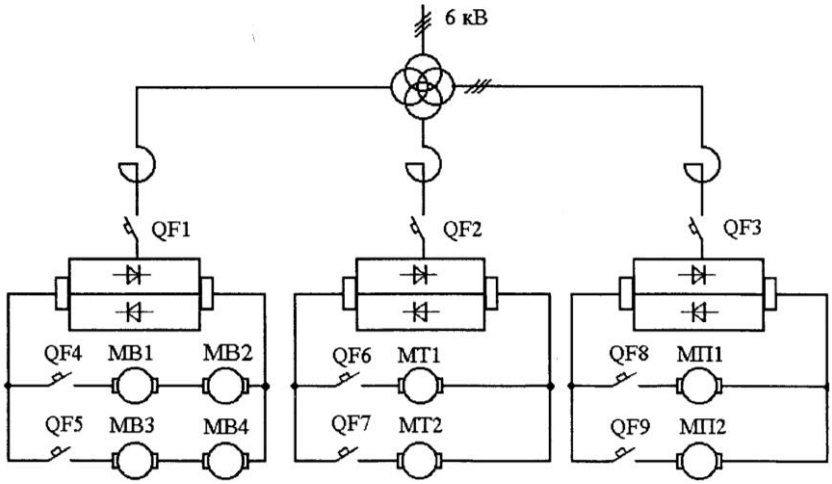


Рисунок 3.22 Схема силовой части преобразователей

L,-L_4 и автоматические выключатели. На стороне постоянного тока каждый двигатель защищается автоматическим выключателем. Есть и схемное решение защиты

3.2.4 Разработка принципиальной схемы электропривода

Принципиальная схема электропривода поворотной платформы приведена на рисунке 3.23. Схема содержит реверсивный преобразователь по якорной цепи, нереверсивный преобразователь по цепи возбуждения,

систему регулирования. Система регулирования включает датчики и регуляторы, включенные в два контура. Первым внутренним контуром является контур тока, содержащий регулятор тока. На вход регулятора тока поступает два сигнала - сигнал обратной связи по току от датчика тока и сигнал задания на ток, которым является выходной сигнал датчика ЭДС. Выходной сигнал регулятора тока является управляющим напряжением для СИФУ. На вход Регулятора ЭДС. поступает три сигнала сигнал обратной связи по току, сигнал обратной связи по напряжению и сигнал задания на скорость от сельсинного командоаппарата (ЗС). Выходной сигнал задатчика скорости регулируется изменением угла поворота сельсина. Поворачивая ось сельсина можно задавать нужную скорость двигателя.

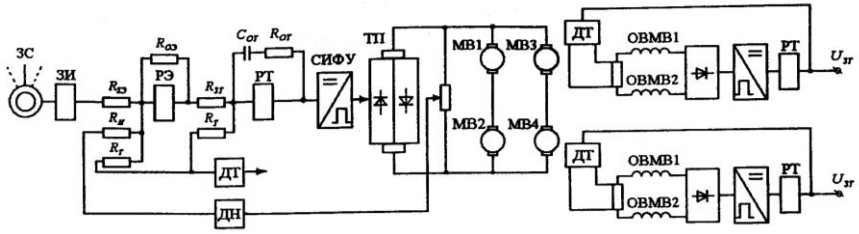


Рисунок 3.23 Принципиальная схема электропривода поворотного механизма

3.2.4 Электропривод мостовых кранов

Кранами называются грузоподъемные машины, предназначенные для вертикального и горизонтального перемещения грузов на небольшие расстояния. По особенностям конструкции, связанным с назначением и условиями работы, краны разделяются на мостовые, портальные, башенные и др. В цехах промышленных предприятий машиностроения наиболее широко распространены мостовые краны. Самое широкое распространение получили мостовые краны. С их помощью может производиться подъем и опускание грузов, а также их перемещение вдоль и поперек цеха.

Кран состоит из моста, движущегося на колесах по подкрановому рельсовому пути, который находится *в* верхней части цеха. По мосту может перемещаться тележка с подъемной лебедкой и крюком для захвата груза. Кран снабжен тремя основными электроприводами: подъемной лебедки; механизма передвижения тележки; механизма передвижения моста. *Управление работой* крана производится из кабины крановщика, *в* которой установлены также панели с аппаратурой. Электроэнергия к крану подводится посредством скользящих токоприемников от главных контактных проводов -троллеев, расположенных вдоль подкранового пути.

В настоящее время в промышленности используются разнообразные

по конструкции и назначению подъемно-транспортные устройства. Среди этих механизмов особое место занимают мостовые краны. Большое разнообразие конструкций мостовых кранов требует индивидуального подхода к разработке и проектированию электрооборудования для основных механизмов. Поэтому, приступая к разработке и проектированию электропривода необходимо изучить множество факторов, определяющих условия эксплуатации, характер работы каждого механизма, требования к электроприводу и электрооборудованию.

При выборе системы электропривода любого механизма необходимо учитывать такие факторы, как устойчивость работы электропривода, стоимость электрооборудования, его вес и габариты, эксплуатационные расходы, удобство управления системой и ее надежность в работе.

Дополнительными критериями оценки, характерными для крановых механизмов, являются [1]:

- регулирование скорости в различных режимах и этом выясняются возможности системы в отношении пониженных и повышенных скоростей в двигательном (подъем и силовой спуск груза, передвижение и поворот) и тормозном (тормозной спуск грузов) режимах;
- плавность регулирования скорости рассматриваемой системы привода, характеризующаяся количеством механических характеристик, которое обеспечивается в заданном диапазоне регулирования скорости;
- жесткость механических характеристик при номинальной и пониженных скоростях;
- непрерывность механических характеристик в области малых нагрузок;
- плавность разгона и торможения привода. Плавность торможения, например, определяется возможностью обеспечения электрического торможения с регулируемой величиной тормозного момента при переходе с высоких скоростей на низкие (без разрыва силовой цепи во избежание проседания груза либо наложения механического тормоза); она также характеризуется возможностью электрического торможения перед наложением тормоза при постановке контроллера в нулевое положение. Плавность разгона, например механизма передвижения, определяется возможной степенью регулирования пускового момента;
- плавность подъема груза. Сила рывка при подъеме с подхватом зависит от скорости, до которой может разогнаться привод на холостом ходу; степень плавности определяется в каждом конкретном случае величиной этой скорости и параметрами механизма;
- стандартность применяемого электрооборудования (используются ли в системе обычные машины и аппараты либо изготовляемые специально для данной системы, данного механизма);
- ложность схемы, трудность понимания ее эксплуатационным персоналом, требования по уходу за электрооборудованием. Этот критерий для исследуемых механизмов особенно важен потому, что любая неполадка в

схеме крана должна устраняться в кратчайший срок, причем в большинстве случаев самим крановщиком либо дежурным электромонтером, т.е. работниками относительно низкой квалификации.

Следует подчеркнуть, что решающим фактором при выборе той или иной системы электропривода должно быть соответствие технических возможностей этой системы требованиям, предъявляемым к ней со стороны механизма, а также надёжность работы электрической схемы. Считаться со стоимостью электрооборудования, эксплуатационными затратами и некоторыми другими факторами следует лишь при прочих ранее отмеченных равных условиях.

Простейшим электроприводом любого механизма является привод с электродвигателем с короткозамкнутым ротором.. Его преимуществом, помимо дешевизны, простоты ухода, надежности в работе является возможность использования в помещениях со взрывоопасной средой.

Статистические данные [22] свидетельствуют о том, что расходы на эксплуатацию двигателей с фазным ротором с пускорегулирующим сопротивлением в 5 раз, а двигателей постоянного тока в10 раз выше, чем двигателей с короткозамкнутым ротором.

Величина потерь в короткозамкнутых двигателях во время переходных процессов – один из основных факторов, ограничивающих использование их в крановом электроприводе. Кроме того, они могут создавать недопустимые динамические нагрузки в механизме и приводить к раскачиванию груза, так как пусковой и максимальный тормозной моменты (при переключении с высшей скорости на низшую в двигателя с изменяемым числом пар полюсов) трудно регулируются.

Представляет интерес для крановых механизмов электропривод по системе тиристорный регулятор (преобразователь) напряжения – асинхронный двигатель с короткозамкнутым и фазным ротором. [10].

Принципиальная схема ТРН-АД с коротко замкутым двигателем приведена на рисунке 3.24. На схеме обозначено: ТГ — тахогенератор, ЗП — потенциометр задания требуемой скорости (скольжения) двигателя. Схема обеспечивает поддержание скорости ω и тем самым скольжения с определенной точностью при изменениях момента нагрузки Мс.

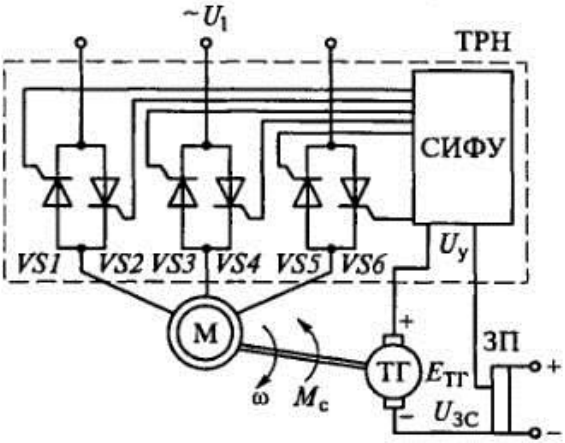


Рисунок 3.24 Электропривод ТРН-АД с асинхронным короткозамкнутым двигателем.

Механические характеристики этой системы приведены на рисунке 3.25.

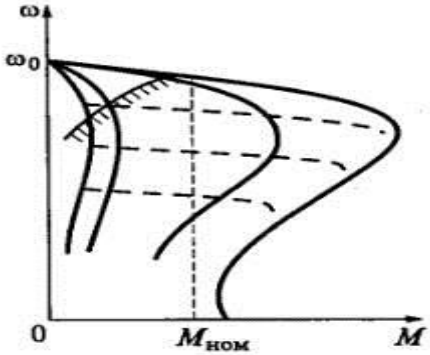


Рисунок 3.25. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании напряжения на статоре

Сплошными линиями показаны характеристики в разомкнутой системе. Характеристики, полученные в замкнутой системе, показаны пунктирными линиями.

На характеристиках очевидны недостатки рассмотренной схемы

- скорость двигателя на холостом ходу не регулируется;

- перегрузочная способность снижается по мере снижения скорости

Вместе с тем тиристорный регулятор напряжения, используемый по основному назначению — плавный пускатель, энергосберегающее устройство при малых нагрузках — очень полезное средство, широко используемое за рубежом,

Принципиальная схема электропривода по системе ТРН-АД с электродвигателем с фазным ротором показана на рисунке 3.26 Схема включает тиристорный регулятор напряжения (силовой блок ВБ и СИФУ), асинхронный двигатель с фазным ротором и систему регулирования. Регулирование частоты вращения двигателя осуществляется путем изменения напряжения, подводимого к статору. Регулирование напряжения осуществляется путем изменения угла открывания управляющих импульсов. Формирование управляющих импульсов и изменение угла регулирования α осуществляется СИФУ. Получение жестких характеристик осуществляется путем изменением напряжения, подводимого к статору с увеличением нагрузки. С ростом нагрузки сигнал обратной связи, пропорциональный скорости, воздействует на уменьшение угла α. Использование таких замкнутых систем позволяет получить довольно жесткие характеристики в I и IV квадрантах и регулировать частоту вращения в диапазоне 40:1. При наличии таких характеристик обеспечивается эффективная работа подъемного механизма, выполняющего сложные монтажные операции.

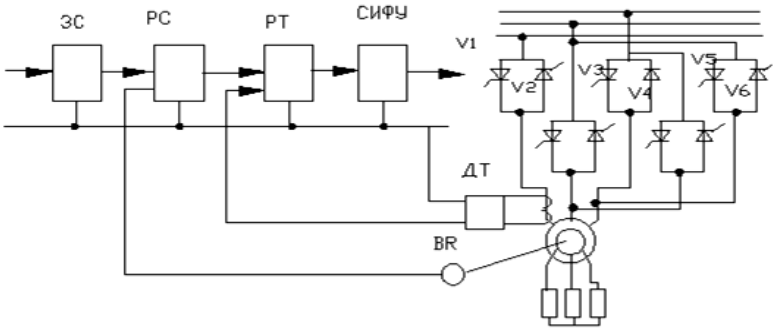


Рисунок 3.26 Принципиальная схема Электропривода по системе ТРН-АД

Схема обеспечивает торможение двигателя в режиме противовключения и тормозной спуск в этом режиме. Здесь не требуется введение дополнительных элементов в силовую цепь и в цепь управления. При правильном выборе сопротивлений пусковых реостатов в роторной цепи нагрев двигателя не превышает нагрева при работе в режиме динамического торможения (при работе на аналогичных характеристиках). Необходимое для

работы в установившемся режиме сопротивление цепи ротора электропривода подъема рассчитывается из условия при полностью открытых тиристорах. Момент двигателя должен на 10-30% превышать момент номинального груза. Если устойчивые скорости требуются только в зоне низких скоростей (S = 0,9-1,1) то полное сопротивление цепи ротора находится в пределах 0,6-9,8 номинального. Если необходимо, кроме пониженной, иметь промежуточные скорости подъема и спуска, то в зависимости от этих скоростей и статического момента номинального груза могут понадобиться еще две три ступени, а сопротивление резистора в пределах 0,38-1,3 номинального.

Требуемые статические характеристики могут быть получены в замкнутой системе автоматического регулирования момента двигателя. Механические характеристики приведены на рисунке 3.27.

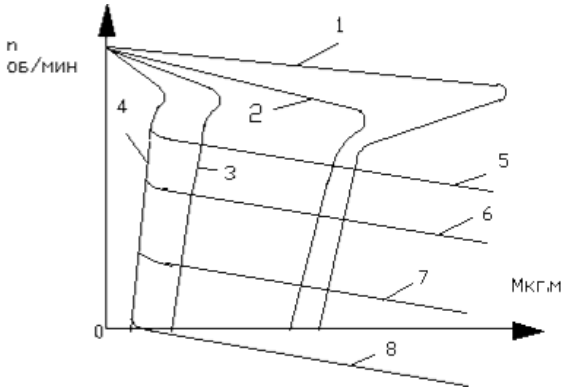


Рисунок 3.27

Механические характеристики двигателя в системе ТРН-АД: 1,2,3,4 – характеристики привода в разомкнутой системе; 5,6,7,8 - характеристики в замкнутой системе.

Рисунок 3.27 Механические характеристики двигателя в системе ТРН-АД

Электропривод механизмов передвижения работает не в напряженном режиме, чем привод лебедки. Требованиям к электроприводу этих механизмов может удовлетворить более простая, а, следовательно, и более дешевая система. При такой схеме силовой части системы электропривода существенно упрощается система регулирования, ее обслуживание и уменьшаются габариты привода. Упрощенная принципиальная схема электропривода и его характеристики приведены на рисунках 3.28 и 3.29. Схема содержит обратную связь по скорости, регулятор скорости, на вход которого подается сигнал задания от

командного контроллера и сигнал обратной связи по скорости. Изменением угла открывания α регулируется степень асимметрии напряжения, прикладываемого к обмотке статора. При $\alpha \leq \varphi$ в нагрузке протекает непрерывный ток, к двигателю прикладывается симметричное напряжение.

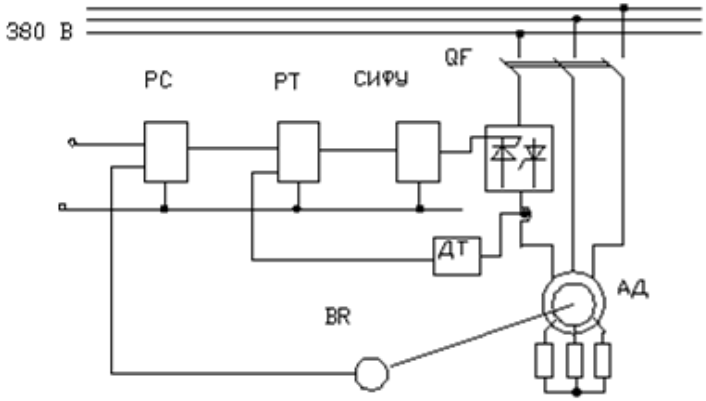


Рисунок 3.28 Принципиальная схема ТРН-АД с несимметричным регулятором напряжения

При $\alpha(\varphi \lhd \alpha \lhd \pi)$ к двигателю периодически подключается третья фаза, т.е. двигатель переводится в несимметричный режим работы. Применение замкнутой системы автоматического регулирования позволяет получить довольно жесткие характеристики в двигательном режиме и в режиме торможения противовключением. Регулирование скорости осуществляется изменением задающего напряжения с помощью команда контроллера, жесткость характеристик зависит от типа регулятора и его настройки Регулировочные свойства асинхронного двигателя с несимметричным можно повысить путем включения параллельно тиристорам конденсатора.

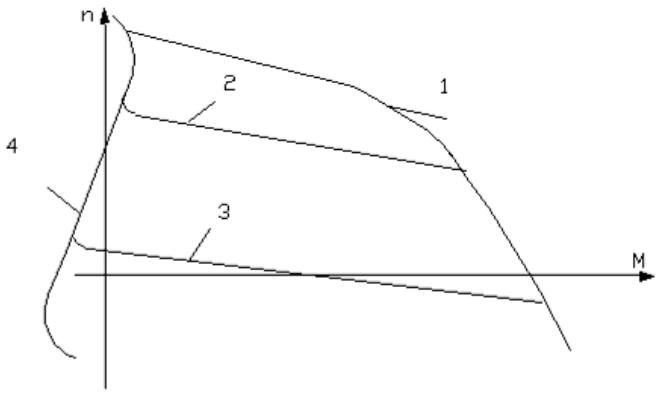


Рисунок 3.29. Характеристики привода: 1,4 – в разомкнутой системе; 2,3 – в замкнутой системе

БИБЛИОГАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамович И.И., Березин В.Н., Яуро А.Г.,Грузоподъемные краны промышленных предприятий.- М,: Машиностроение,1989.

2. . Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. – Высшая школа, 2000.

3. Блантер С.Г, Суд И.И « Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности». - М.: Недра. 1980).

4. Белкин Т.С., Вариводов В.Н. Состояние и перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения//Электричество. 2001.

5..Беспалов В.Я.,Котеленец Н.Ф.Электрические машины. – М.: Издательский центр «Академия»,2008.

6. Волков Д.П., Каминская Д.А.Динамика электромеханических систем экскаваторов. .- М,: Машиностроение,1991..

7. Грамолин В.Н. Новые комплектные буровые установки ОАО "Урал-маш"//Нефтегазовая вертикаль. — 1999. — № 10.Дацковский Л.Х

8. ГерасимякР.П. Тиристорный электропривод для кранов. .М.: Энергия 1978.

9 Домбровский Н.Г. Экскаваторы,.- М,: Машиностроение,1960.

10. Кругликов А.П. Силовые преобразователи энергии –Алматы: КазНТУ, 2008.

11. Ключев В.А. Теория электропривода: Учеб. для вузов. 2-е изд. пере-
раб. и доп. — М: Энергоатомиздат, 1998.

12. Кругликов А.П., Музгин С.С.Тиристорные преобразователи в электроприводе гонных мащин. Алматы.2015.

13. Корытин А.М. и др. Синхронные приводы. М.: Энергия, 1967.

14.. Лимитовский А.М. Электрооборудование и электроснабжение геологоразведочных работ.М.: Недра,1996.

15. Моцохейн Б.И., Парфенов Б.М., Шпилевой В.А. Электропривод, электрооборудование и электроснабжение буровых установок. — Тюмень. :Издательство "í¸ÏÂÌ,", 2001.

16. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: Учеб. для вузов. — М:Недра, 2000.

17. Онищенко Г.Б. Асинхронный вентильный каскад.М.: Энергия 1967

18. Парфенов А.Н «Автоматизированный электропривод в нефтяной промышленности» (М., Недра . 1992).

19. Решмин Б.И., Ямпольский А.С. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. -М.: «ЭНЕРГИЯ»,1995.

20. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода.М.: Энергоатомиздат1997.

21, Черник Г.В «Электропривод и электрооборудование установок алмазного бурения» (Л., Недра, Ленинградское отделение , 1998).

22. ЧудновскийВ.Ю Экспериментальное исследование роторных экскаваторов производительностью 2100 $м^{3}$./час. Свердловск. Известия вузов .

Приложение А

Технические данные двигателей постоянного тока, применяемых в приводе прокатных станов

Тип двигателя	$P_н$,кВт	$U_н$,*В*	Скорость, об/мин		К.п.д., %	Mmax/M*н* При		GD^2 $тм^2$
			$n_н$	n_{max}		0÷ $n_н$	n_{max}	
1	2	3	*4*	*5*	6	7	8	9
МП600-300	600	400	300	*600*	90,5	2,5	1,0	1,35
МП1000-210	1000	250	210	800	92	2,0	0,9	6
МП640-700УЧ	640	600	700	1000	93,6	2,5	1,0	0,16
МП1000-330	1000	440	330	800	92,9	2,0	0,9	1,9
МП1100-150	1100	600	150	200	92	2,5	1,0	6,5
МП1250-200	1250	750	200	360	92,5	2,5	1,0	4,6
МП1250-320	1250	750	320	640	93,1	2,5	1,0	4,75
МП1600-400УЧ	1600	750	400	850	92,7	2,5	1,0	7
МП2000-40	2000	825	45	90	88,7	2,5	1,0	110
МП2000-80	2000	825	80	160	94,1	2,5	1,0	42
МП2000-125	2000	825	140	300	91,5	2,5	1,0	35
МП2000-200	2000	825	220	440	91,5	2,5	1,1	26
2МП2000-210	2x1000	440	210	800	92	2,5	0,9	10,5
2МП2000-330	2x1000	440	330	800	92,9	2,0	0,85	4,6
МП2000-350	2000	450	350	720	92,7	2,5	1,0	12

МП2400-120УЧ	2400	750	120	240	94	2,5	1,1	30
МП2400-260	2400	750	260	500	94,2	2,5	1,0	17
МП2500-75	2500	825	75	150	92	2,5	1,0	120
3МП3000-210	3х1000	440	210	300	92	2,0	0,9	17,5
3МП3000-330	3х1000	440	330	800	92,9	2,0	0,85	6,7
МП3200-55	3200	900	60	120	92	2,5	1,0	110
2МП3200-160УЧ	2х1600	900	160	190	91,8	2,5	1,0	38
МП3100-75	3100	825	75	150	92,5	2,5	1,25	165
2МП3200-285УЧ	2х1600	900	300	500	92,8	2,5	1,1	2,5
МП1600-160УЧ	1600	900	160	420	93,1	2,5	1,2	18
2МП4800-120УЧ	2х2400	750	120	240	94	2,5	1,25	70
2МП4800-260УЧ	2х2400	750	260	500	94,2	2,2	1,0	40
МП5000-65	5000	825	65	120	94,3	2,5	1,0	195
МП5000-110	5000	750	110	220	92,9	2,5	1,25	160
МП7500-60	7500	900	60	120	92	2,5	1,0	275
МП-6200-80	6200	750	80	160	94,4	2,5	1,1	260
МП-6300-63УЧ	6300	900	63	100	94	2,5	1,1	200
МП7000-115УЧ	6300	900	125	300	94	2,5	1,1	170
МП6800-60	6800	930	60	90	93,5	2,5	1,1	215
МП8000-80	8000	900	80	160	95	2,2	0,8	300
МП8000-110	8000	900	110	200	95	2,5	1,0	280
2МП8500-250	2х4250	825	250	475	93,5	2,25	1,0	110

МП9000-60	9000	930	60'	90	94	2,5	1,0	350
МП11500-63УЧ	11500	930	63	90	95	2,5	1,1	500
2МП11000-70	2х5500	900	70	120	93,7	2,5	1,0	296
2МП12600-115УЧ	2х6300	930	125	300	94,5	2,25	1,0	380
2МП12600-190УЧ	2х6300	200	200	400	94,5	2,0	1,0	240
2МП16000-65	2х8000	900	65	100	93,5	2,5	1,0	650
МП7000-50	7000	750	50	120	91	2,5	0,9	385
2МП6500-200	2х2400	750	300	400	84	2,5	1,0	50
2МП6500-330	2х3250	750	330	600	94,2	2,2	0,9	40
2МП10000-280УЧ	2х5000	930	300	500	94	2,5	1,1	110
2МП12600-50УЧ	2х6300	930	50	100	93	2,5	1,0	850
П21-100-15к	3300	630	110	200	93	2,5	1,0	100
П21-70-15к	3300	630	160	230	93,2	2,5	1,0	90
П21-55-15к	3300	630	230	380	93,4	2,5	1,0	85
П20-45-7к	2800	1000	350	515	93,1	2,5	1,0	17,1
2П20-50-7к	2х1650	630	200	450	92,7	2,5	1,0	45
2П18-75-9к	2х1000	500	220	550	92,9	2,5	1,0	11
2П25-85-3,6	2х3600	900	58	150	93,1	2,5	1,0	630
2П25-105-3,15	2х3150	750	37,5	95	91,5	2,5	0,9	850
2П25-62-3,6	2х3600	900	85	190	93,2	2,5	1,0	400
2П25-43-3,6	2х3600	900	118	270	93,3	2,5	1,0	360
2П25-71-3,6	2х3600	900	150	330	93,4	2,5	1,0	270

2П22-80-3,б	2х3600	825	200	400	94,5	2,5	1,0	150
ПБК250/145	4560	825	70	120	91,8	2,25	1,0	175
ПБК380/125	7350	825	60	90	92	2,5	1,0	450
ПБК250/145	4000	700	60	120	92	2,5	1,0	142
2ПБК250/145	2х3300	630	50	80	92	2,5	1,0	180
ДПП310/150-18	4600	750	50	100	80,5	2,5	1,0	275
ДПП310/125-18	4400	825	70	140	91,5	2,5	1,0	220
МП11000-65	6800	830	60	90	92,3	2,5	1,0	300
ПП9100-67	9100	980	67	90	94,8	2,5	0,9	380
МПС8000-63	8000	930	63	120	94,8	2,5	0,8	240
П23/135-5,4	5400	900	67	115	93,0	2,5	1,0	192
П2-25/130-7	7000	750	53	90	94,3	2,5	1,4	310
П2-800-218-8СУЧ	2800	860	40	80	90,3	2,25	0,9	89,5
П24-160-6,8	6800	850	60	90	94,2	2,5	1,2	280

Приложение В

Технические характеристики буровых насосов

Параметры	Тип насоса					
	НБТ-600	УНБТ-800	УНБТ-900	БрН-1	У8-6М	У8-7М
Мощность, кВт	600	800	950	430	600	825
Полезная мощность, кВт	540	720	855	365	480	660
Предельное давление, МПа	25	32	32	20	25	32
Наибольшая подача, л/с	43	42,9	46	38	51	51
Давление при наибольшей подаче, МПа	11,3	17	19	9,8	11	14,2
Подача при предельном давлении, л/с	13	22,4	27,8	18,6	18,9	22,7
Диаметр сменных цилиндровых втулок, мм	120—180	130—180	140—180	130—180	130—200	140—200
Длина хода поршня, мм	250	250	290	300	400	400
Максимальная частота ходов в мин	135	135	125	80	66	66
Масса, кг	18 800	22 800	22 220	14 750	27 000	37 100

СОДЕРЖАНИЕ

Стр

ВВЕДЕНИЕ **3**

1. Элементы автоматизированного электропривода **4**

1.1 Машины постоянного тока 4

1.1.1 Устройство и принцип действия машин постоянного тока 4

1.1.2 Электромеханические свойства двигателей постоянного тока 8

1.1.3 Способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока 11

1.1.4 Способы торможения двигателей постоянного тока 14

1.2 Асинхронные двигатели 19

1.2.1 Устройство и принцип действия 19

1.2.2 Электромеханические свойства асинхронных двигателей 21

1.2.3 Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей 30

1.3 Синхронные машины 40

1.3.1 Устройство и принцип действия синхронных 40

1.3.2 Электромеханические свойства синхронных двигателей 46

1.4 Силовые полупроводниковые преобразователи 50

1.4.1 Выпрямители 51

1.4.2 Реверсивные преобразователи 62

1.4.3 Тиристорные регуляторы переменного напряжения 64

1.4.4 Импульсные регуляторы постоянного напряжения 65

1.4.5 Автономные инверторы и преобразователи частоты 67

1.4.6 Регуляторы 71

1.4.7 Задатчики и датчики 74

1.4.8 Тахогенераторы постоянного тока 77

1.4.9 Асинхронные тахогенераторы 78

1.4.10 Импульсный датчик скорости 80

1.4.11 Датчик ЭДС 80

2. Электропривод 83
2.1 Типовые схемы управления асинхронными двигателями 83
2.2 Электропривод тиристорный преобразователь двигатель постоянного тока 87
2.2.1 Анализ работы электропривода 87
2.2.2 Формирование статических характеристик и динамических свойств двигателя постоянного тока 90
2.2.3 Критерии настройки параметров электропривода 91
2.2.4 Оптимизация контура на МО оптимум, объект в котором имеет интегрирующее звено и звено с малой постоянной времени 94
2.2.5 Оптимизация контура на СО, объект которого содержит интегрирующее звено и звено с малой постоянной времени 95
2.2.6 Принцип построения многоконтурных систем 99
2.2.7 Расчет и выбор параметров регулятора при настройке на МО 102
2.3 Электропривод с вентильным двигателем 106
2.4 Электропривод преобразователь частоты асинхронный 109
2.5 Комплектные электроприводы с частотным управлением 112
3. Автоматизированный электропривод производственных механизмов 117
3.1 Электропривод установок глубокого бурения 117
3.1.1 Электропривод буровых насосов 1118
3.1 .2 Электропривод бурового ротора 124
3.1.3 Электропривод спуско – подъемного агрегата 127
3.1.4 Анализ систем автоматизации процесса бурения 134
3.2 Электропривод горных машин 140
3.2.1 Электропривод одноковшовых экскаваторов 142
3.2.2.Электропривод роторных экскаваторов 148
3.2.2.1 Устройство и режимы работы основных механизмов роторного экскаватора 149
3.2.2.2 Требования к электроприводу основных механизмов роторного экскаватора 150
3.2.3 Электропривод шагающего экскаватора 154
3.2.4 Электропривод мостовых кранов 158

БИБЛИОГАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 166

Приложение А

Приложение В

Учебное издание

Юсупова С.А. Чигамбаев Т.О.

ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебное пособие

Подписано в печать
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16. Усл.п.л. 9. Уч. изд.л.9,2
Тираж 500 экз. Заказ №____ Цена договорная

Издание г. Алматы,