

**Некоммерческое акционерное общество**

**«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Кафедра Электропривода и автоматизации промышленных  
установок

Специальность \_\_\_\_\_ Электроэнергетика \_\_\_\_\_

## **МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема: Разработка и исследование системы управления  
электропривода шахтного подъемника

Магистрант \_\_\_\_\_ Нурбек Д.М.  
подпись (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации \_\_\_\_\_ Жумагулов К.К.  
подпись (Ф.И.О.)

Алматы, 2014г.

### Обозначения и сокращения

U – напряжение

f - частота

Rя – сопротивление якорной цепи двигателя

M – момент на валу двигателя

Ф – магнитный поток двигателя

C<sub>e</sub>, c<sub>m</sub> — конструктивные постоянные двигателя

ШПУ – шахтная подъемная установка

ЭП- электропривод

АД – асинхронный двигатель

СД – синхронный двигатель

ПЧ – преобразователь частоты

САУ – система автоматического управления

ПРКС - пусковые резисторно - контакторные станции

СДТ - станции динамического торможения

НПЧ - непосредственный преобразователь частоты

РС – регулятор скорости

КП – координатный преобразователь

СИФУ – системы импульсно-фазового управления

## Содержание

	Введение	8
1	Основные элементы шахтных подъемных установок	11
1.1	Устройство, принцип действия и классификация шахтных подъемных установок	14
1.2	Привод шахтных подъемных установок	20
2	Электропривода ШПМ НКМЗ 2Ц-5*2,3 и ее модернизация с применением роторных преобразователей частоты	
2.1	Расчет экономии электроэнергии при применении частотных преобразователей	35
2.2	Расчет непроизводительных потерь электроэнергии действующей ШПМ	38
2.3	Снижение потерь электроэнергии при использовании электропривода с частотным преобразователем	40
3	Электропривод с высоковольтным АД с фазным ротором	46
3.1	Электропривод с подключением к сети 6 кВ 50 Гц через контакторный реверсор и рекуперативным инвертор в роторе	48
3.2	Электропривод с короткозамкнутым статором АД ФР и рекуперативным инвертором в роторе	51
3.3	Электропривод с рекуперативным низковольтным инвертором в статоре АД ФР и рекуперативным низковольтным инвертором в роторе	53
3.4	Машина двойного питания в частотно – регулируемом электроприводе шахтных подъемных установок	57
	Заключение	65
	Список литературы	68

### Аннотация

В диссертационной работе на примере шахтной подъемной машины типа НКМЗ 2Ц-5\*2,3 исследована система электропривода, рассмотрена проблема энергосбережения: проведен расчет экономии электроэнергии и уменьшения потерь в электроприводе при замене роторной станции электродвигателя с фазным ротором на регулируемый электропривод, что является целью работы. Показан экономический эффект применения частотных преобразователей: сокращение поломок и аварий оборудования, более точное регулирование разгона и торможения скипа; экономия электроэнергии составляет 9,8%; а также вся мощность скольжения ротора электродвигателей через преобразователь частоты возвращается в питающую сеть 6 кВ 50 Гц, а не затрачивается на нагрев роторных сопротивлений и нагрев электродвигателя.

Предложены варианты применения электроприводов:

- а) с АД ФР и транзисторными инверторами напряжения;
- б) с подключением статора АД ФР к сети 6кВ 50 Гц через контакторный реверсор и рекуперативным инвертором в роторе;
- в) с короткозамкнутым статором АД ФР и рекуперативным инвертором в роторе;
- г) с рекуперативным низковольтным инвертором в статоре АД ФР и рекуперативным низковольтным инвертором в роторе;
- д) машины двойного питания (МДП) в электроприводе шахтной подъемной машины.

## Annotations

On the dissertation work of a mine hoist machine type NKMZ 2C-5 \* 2.3 investigated motor drive system and considered the problem of energy saving: calculated energy savings when replacing the rotor with slip-ring station for regulated electric drive. Shows the economic impact of application of frequency converters: reducing breakdowns and accidents to the equipment , more accurate control of acceleration and deceleration to the skip , energy savings of 4%, as well as all the power slip of rotors to the motors returns in the supply network 6kV 50Hz and not spent to rotary resistance heating and motor heating .

Proposed applications of actuators:

- a) with induction motor with phase rotor and transistor voltage inverter;
- b) connecting the stator IM PR network 6kW 50 Hz via contactor reverser and regenerative inverter in the rotor;
- c) squirrel stator IM PR and regenerative inverter in the rotor;
- d) low-voltage inverter with regenerative IM PR in the stator and regenerative low-voltage inverter in the rotor;
- d) dual power supply machine (MDP) in the drive shaft hoisting machine.

## Андатпа

Диссертациялық жұмыста НКМЗ 2Ц-5\*2,3 типті шахталық көтергіш машинасының электржетегі жүйесі зерттелген және энергоүнемдеу мәселесі қарастырылған: фазалық роторлы электр қозғалтқышын реттелетін қозғалтқышқа ауыстырылу бақырысында электр энергиясының үнемделуі есебі көрсетілген. Жиілік түрлендіргішінің қолданудың экономикалық нәтижесі: бұзылудың және жабдық апатының қысқартылуы, скиптің бастапқы жылдамдық алу және тежелуінің реттелуі ; электр энергиясының үнемі 4%-ға төмендейді және электрқозғалтқыш роторы сырғуының барлық қуаты ротор кедергісі мен қозғалтқышты жылытуға кетпей, жиілік түрлендіргіші арқылы 6кВ 50 Гц қоректендіру желісіне қайтады.

Электржетектің қолданысының келесі нұсқалары ұсынылған:

- а) ФР АҚ және кернеуді транзистор терістеуіші;
- б) статордың қосуымен тозақ ФР 6кВ ауына 50 гц арқылы контакторный реверсор және жинағыш терістеуішпен роторда;
- в) қысқа тұйықталған статорлы ФР АҚ және роторында жинағыш терістеуішпен;
- г) ФР АҚ статорында жинағыш төменгі вольтты терістеуішпен және роторында жинағыш төменгі вольтты терістеуішпен ;
- д) қос қоректенуші машиналарының шахталық машинаның электржетегінде қолданылуы.

## Введение

Шахтная подъемная установка (ШПУ) — сложная механическая система, которая состоит из ряда сосредоточенных масс: сосудов, органов навивки, зубчатых передач, двигателей, шкивов, соединенных упругими элементами : канатами, валопроводами, пружинными муфтами.

Они обеспечивают выдачу полезного ископаемого, а также перемещение людей и грузов. От надежности работы этого важнейшего звена технологической цепи зависит бесперебойность работы всего предприятия. Любая аварийная ситуация на подъёме ведет к остановке предприятия. Поэтому вопросам обеспечения надежности и безопасности эксплуатации шахтных подъёмных установок всегда уделяли особое внимание.

Известны шахтные подъемные установки (ШПУ), высота подъема которых достигает до 2000 м, грузоподъемность сосудов достигает до 75 тонн, а максимальная скорость движения - 16 м/с. Также имеются подъемные установки, которые одновременно перевозят до 150 человек. Мощность таких электроприводов составляет до 5-10 тысяч кВт. Масса подъемных канатов может достигать 30 тонн. При этом значительно увеличиваются динамические нагрузки при разгоне и торможении, особенно в режиме предохранительного торможения.

Развитие современной математической теории машин переменного тока и создание усовершенствованных силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе, использование современных средств управления, включая микропроцессорные, позволили создать высококачественные и надежные системы регулируемых асинхронных электроприводов, которые становятся основным видом регулируемого электропривода.

На мировом рынке из общего числа регулируемых приводов электроприводы переменного тока составляют 68 %, а электроприводы постоянного тока - 15 %, механические и гидравлические приводы - 17%. Тенденция возрастания доли внедряемых регулируемых асинхронных электроприводов объективно сохранится и в дальнейшем, так как массовый регулируемый электропривод может быть реализован только на базе асинхронных двигателей. Это объясняется тем, что в диапазоне мощностей до 100 кВт их производится в 40 раз больше, чем двигатели постоянного тока. Широкое использование регулируемых электроприводов привело к тому, что современный электропривод является не только энергосиловой основой, позволяющей обеспечить производственный механизм необходимой механической энергией, но и средством управления технологическими процессами, так как задачи по реализации качества производственных процессов сейчас в большинстве случаев возлагаются

на системы управления регулируемые электроприводами в сочетании с системами технологической автоматики. А также в связи с возрастанием цен на энергоносители, в частности на электроэнергию, и ограниченными возможностями увеличения мощности генерирующих установок проблема энергосбережения, в том числе снижения электропотребления, очень актуальны.

Тенденция развития общепромышленных электроприводов основана на современных устройствах силовой электроники. Регулируемые, позиционные и следящие электроприводы (ЭП), выполняющие управляемое преобразование электрической энергии в энергию механического движения рабочих органов, являются основным исполнительным звеном систем автоматизации промышленных механизмов, машин и технологических установок. Такое совмещение в одном техническом устройстве функции автоматического управления технологическим процессом и преобразования видов энергии позволяет с той или иной степенью условности разделить все системы электропривода по принципам построения и внутренней оптимизации на два основных класса.

а) Силовой электропривод, основная их функция: управляемое преобразование электрической энергии в полезную механическую работу. Такие системы проектируются из соображений наилучшего использования установленной мощности силового оборудования ЭП - полупроводниковых преобразователей электрической энергии и электрической машины в установившихся режимах при удовлетворении, как правило, не очень жестких требований к показателям качества переходных процессов и точности регулирования. Среди силовых систем можно выделить общепромышленные и энергосберегающие ЭП, работающие в статистических режимах с медленно изменяющейся нагрузкой. Законы управления такими ЭП оптимизируются по одному из распространенных технических и энергетических критериев: критерию минимума тока потребления, минимума мощности потерь.

б) Информационный электропривод, главной функцией которых - предельно точное и следовательно, быстродействующее воспроизведение координатами механического движения рабочих органов заданных пространственных траекторий. Они работают преимущественно в переходных процессах, и энергия в них циркулирует (за вычетом потерь) между электрическими формами и кинетической энергией движущихся масс. Отсюда очевидны и критерии оптимизации информационных ЭП: предельное быстродействие, статистическая и динамическая точность.

Независимо от назначения электроприводов в настоящее время во многих отраслях промышленности лидирующие позиции прочно занимают системы переменного тока на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АДКР) и синхронных двигателей с магнитоэлектрическим (информационные) или электромагнитным (силовые системы) возбуждением. Это стало возможным благодаря достижениям

последних десятилетий в области теории электрических машин и электроприводов переменного тока, теории автоматического управления многосвязными нелинейными динамическими объектами, созданию современных, полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов, развитию микроэлектронных и микропроцессорных средств управления и обработки информации.

В ряде развитых стран разрабатываются новейшие технологии применяемые для улучшения качества работы всей системы электропривода и ее эффективности, что является актуальной задачей.

Энергосбережение - одно из приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира. Это связано, во-первых, с ограниченностью и не возобновляемостью основных энергоресурсов, во-вторых, с непрерывно возрастающими сложностями их добычи и стоимостью, в-третьих, с глобальными экологическими проблемами.

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

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

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

Поэтому исследование системы электропривода шахтных подъемных установок: выяснение недостатков и эффективность после модернизации с применением преобразователей частоты является целью настоящей работы. При этом ставятся следующие задачи:

- 1) Рассмотреть устройство и принцип работы ШПМ;
- 2) Подключение к системе и модернизация схемы электропривода ШПМ с применением роторных преобразователей частоты;
- 3) Рассчитать энергоэффективности применения ЧП;
- 4) Сделать рекомендации по применению частотных преобразователей.



## 1 Основные элементы шахтных подъемных установок

### 1.1 Устройство, принцип действия и классификация шахтных подъемных установок

В практике разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом наибольшее распространение нашли одноканатные шахтные подъемные установки. Одноканатная вертикальная ШПУ (рисунок 1.1) состоит из шахтной подъемной машины 5, подъемных канатов 2, огибающих направляющих шкивов 4. К подъемным канатам подвешены подъемные сосуды 1, в которых осуществляется подъем полезного ископаемого, спуск или подъем людей, материалов и оборудования. На глубоких шахтных подъемных установках к сосудам может быть подвешен хвостовой (уравновешивающий) канат 3[4].

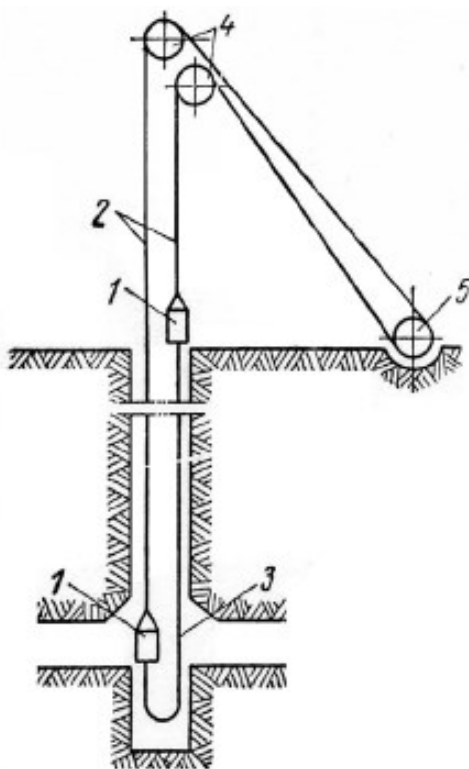


Рисунок 1.1 - Схема вертикальной одноканатной шахтной подъемной установки

К шахтной подъемной машине через редуктор или напрямую передается крутящий момент от вала подъемного двигателя. Подъемные канаты запасованы к органу навивки шахтной подъемной машины таким образом, что при их вращении один канат навивается, а другой свивается, и

при подъёме одного сосуда второй опускается. В результате собственный вес подъёмных сосудов уравнивается. На шахтных подъёмных установках с противовесом один подъёмный сосуд заменен противовесом, вес которого равен весу сосуда плюс половина веса поднимаемого в нем расчетного груза.

Шахтные подъёмные установки по типу привода классифицируются (с редуктором или без редуктора):

а) переменного тока:

- асинхронный двигатель с фазным ротором (с металлическим или жидкостным реостатом в цепи ротора);

- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и преобразователем частоты;

- синхронный двигатель с преобразователем частоты;

б) постоянного тока:

- с приводом по системе генератор-двигатель;

- с приводом по системе тиристорный преобразователь двигатель.

Для обеспечения направленного движения подъёмных сосудов шахтные стволы оснащены армировкой. Армировка - жесткая пространственная конструкция, размещенная по всей длине ствола. Направленное движение сосудов обеспечивается проводниками. Различают жесткие и гибкие проводники. Проводниками гибкой армировки служат натянутые в стволе канаты.

В качестве жестких проводников применяют рельсовый прокат, различные металлические профили (чаще всего сварные из двух уголков – проводники коробчатого сечения) и деревянные брусья.

Шахтные подъёмные машины устанавливаются на железобетонном фундаменте и крепятся анкерными болтами. Машины выполнены в виде сварной конструкции с винтовой нарезкой обечайки под канат. Крупные подъёмные машины с диаметром барабана 4 м и более снабжаются одним разрезным, двумя цилиндрическими или разрезным бицилиндро - коническим органом навивки. Один барабан двух барабанных машин и основная (большая) часть разрезных органов навивки жестко соединены с валом. Этот барабан (часть органов навивки) носит название заклиненного. Второй (переставной) барабан или переставная часть разрезного барабана устанавливается на валу на подшипниках и имеет возможность проворачиваться. Барабаны связаны с валом посредством специального механизма перестановки.

Механизм перестановки позволяет отсоединять переставной барабан или переставную часть барабана от вала шахтной подъёмной машины и выполнять операции по замене каната, регулировке длины каната, вращая один барабан или заклиненную часть барабана.

Шахтные подъёмные машины снабжены тормозными устройствами колодочного типа. Привод тормозных устройств малых шахтных подъёмных машин (диаметр барабанов 1,2 м, 1,6 м и 2,0 м) – пружинно-гидравлический. Одно и двух барабанные шахтные подъёмные машины с диаметром барабана

2, 5 м, 3,0 м и 3,5 м, а также многоканатные машины оснащены пружинно-пневматическими тормозами.

Тормозная система крупных шахтных подъёмных машин НКМЗ состоит из пневмогрузового привода тормоза, исполнительного органа и панели управления тормозом. Для повышения надежности на каждой машине установлено два исполнительных органа, каждый со своим приводом.

Тормоза работают независимо друг от друга.

Исполнительный орган пневмогрузового тормоза (рисунок 1.2) состоит из двух тормозных балок 1 с пресс-массовыми колодками 2, двух вертикальных стоек 3, установленных на опорах 4, трех треугольных рычагов 5, тяг 6 и 7. Тяга 6 состоит из двух частей, соединенных регулирующей гайкой 8. Тормоз имеет регулируемую стойку 9 и упоры 10 и 11.

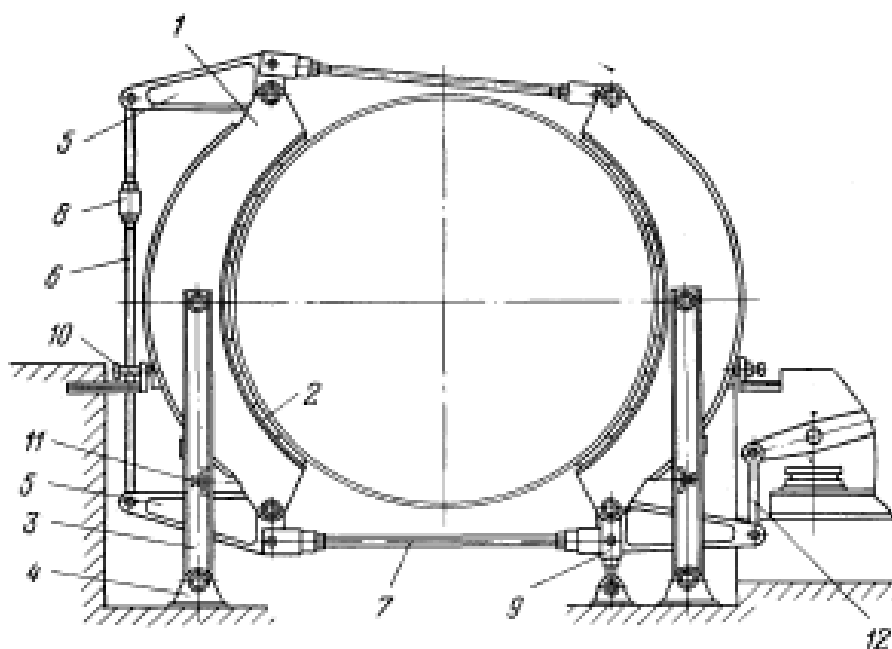


Рисунок 1.2 - Исполнительный орган тормоза шахтных подъёмных машин

Усилие тормозного привода передается через вертикальную тягу 12, систему рычагов 5 и тяг 6 и 7 на тормозные балки 1, которые прижимают тормозные колодки к ободу, производя торможение подъёмной машины. Растормаживание машины происходит за счет неуравновешенности веса элементов рычажной системы и веса элементов привода тормоза: поршня, штанги, дифференциального рычага.

Привод тормоза содержит цилиндр рабочего торможения, цилиндр предохранительного торможения, поршень которого соединен со штоком с тормозным грузом. Усилие от поршней цилиндров передается на вертикальную тягу исполнительного органа тормоза через дифференциальный рычаг.

## 1.2 Привод шахтных подъёмных установок

Электропривод шахтных подъёмных установок осуществляется электродвигателями постоянного или переменного тока. Большинство шахтных подъёмных установок оснащено асинхронными двигателями с фазным ротором с металлическим или жидкостным реостатом, что объясняется их небольшой стоимостью, простотой обслуживания и высокой эксплуатационной надёжностью АД. В связи с большой частотой вращения асинхронных двигателей их подключение осуществляется через редуктор. Схема асинхронного привода с фазным ротором приведена на рисунке 1.3. Контактторы реверсоров В и Н осуществляют изменение направления вращения двигателя М [6].

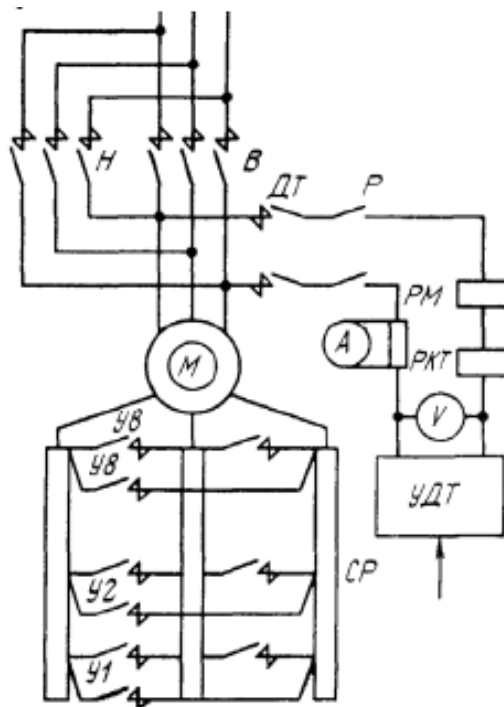


Рисунок 1.3 - Схема асинхронного привода

Для регулирования частоты вращения двигателя используется регулируемое сопротивление СР, включаемое в цепь ротора и изменяемое при включении роторных контактов У1–У8.

Асинхронные приводы шахтных подъёмных машин оборудуются динамическим торможением, регулируемый источник постоянного тока УДТ которого подключается к статору двигателя через контактор динамического торможения ДТ при отключенных контакторах В и Н.

Зависимость частоты вращения двигателя от развиваемого им момента носит название механической характеристики. Механические характеристики

асинхронного привода приведены на рисунке 1.4.

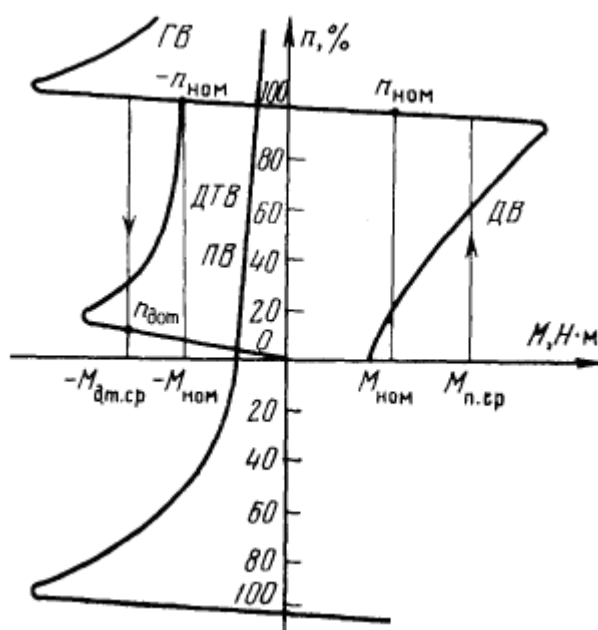


Рисунок 1.4 - Механические характеристики асинхронного двигателя

При вращении органа навивки в направлении «вперед» асинхронный двигатель может работать в следующих режимах:

- двигательный режим (область ДВ, рисунок 1.4) – направление движения сосудов совпадает с направлением развиваемого двигателем момента. Вращающий момент создается взаимодействием тока ротора с вращающимся магнитным полем;

- режим генераторного торможения ГВ – двигатель вращается моментом, создаваемым разностью натяжения подъёмных канатов. Тормозной момент, препятствующий разгону системы, создается взаимодействием тока ротора с вращающимся магнитным полем. В этом режиме активная мощность передается в сеть;

- торможение против включением ПВ – крайне редко встречающийся режим, когда торможение осуществляют включением двигателя в обратном направлении, то есть магнитное поле статора двигателя и ротор вращаются встречно;

- режим динамического торможения ДТВ – создается подключением обмоток статора к источнику постоянного тока. Тормозной момент создается взаимодействием тока ротора с неподвижным магнитным полем.

Асинхронные двигатели имеют относительно жесткие естественные механические характеристики с номинальным скольжением  $S_{ном} = 0,02...0,03$ .

Для выполнения диаграмм движения шахтной подъёмной машины двигатель разгоняется с  $n_{дв} = 0$  до номинальной скорости средним пусковым моментом  $M_{п.ср}$  (рисунок 1.4). На этой скорости при положительном

статическом моменте  $M_c$ , равном номинальному  $M_{ном}$ , осуществляется движение до точки + пном. Генераторное торможение применяется при спуске груза. При номинальном статическом моменте  $M_{ном}$  двигатель работает на естественной характеристике в точке - пном. Замедление машины от максимальной скорости до малой скорости может быть осуществлено в режиме динамического торможения с использованием механической характеристики со средним тормозным моментом  $M_{ДТ ср}$  от точки - пном до точки пдот.

Торможение противовключением (ПВ) применяется в аварийных ситуациях.

Механические характеристики асинхронного двигателя при подключении роторных сопротивлений приведены на рисунке 1.5.

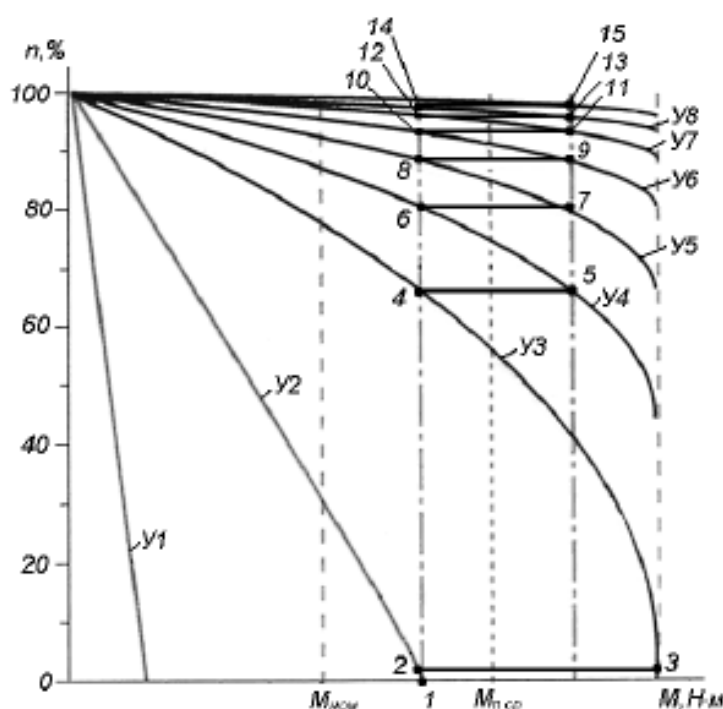


Рисунок 1.5 - Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором

При максимальном значении роторных сопротивлений момент двигателя определяется характеристикой  $U_1$ . Он обеспечивает плавное приложение нагрузки к валу подъемной машины. На второй ступени (характеристика  $U_2$ ) происходит трогание машины и разгон по линии 1 – 2. При включении третьей ступени момент двигателя скачком увеличивается по линии 2 – 3 и происходит разгон подъемной установки по линии 3 – 4.

Дальнейшее выведение роторных сопротивлений обеспечивает ступенчатое увеличение скорости по ломаной линии 4, 5, 6, 7, ..., 14, 15 до номинальной скорости  $n_{ном}$ .

В практике эксплуатации шахтных подъемных установок максимальная скорость движения сосудов бывает ограничена. В этом случае не все

контакты станции управления включаются, и подъемный двигатель работает на одной из искусственных характеристик. Например, при работе двигателя на характеристике У4 двигатель при номинальном моменте на валу будет вращаться с частотой  $n_{У4}$ . Соответственно с меньшей скоростью будет происходить движение подъемных сосудов. В этом случае подъемный двигатель имеет «мягкую» характеристику и скорость движения будет изменяться при изменении момента сопротивления на валу подъемной машины.

Мощные шахтные подъемные установки оснащены приводом постоянного тока. В настоящее время в эксплуатации находятся установки с приводом по системе генератор–двигатель (силовая схема приведена на рисунке 1.6) и с приводом по системе тиристорный преобразователь–двигатель.

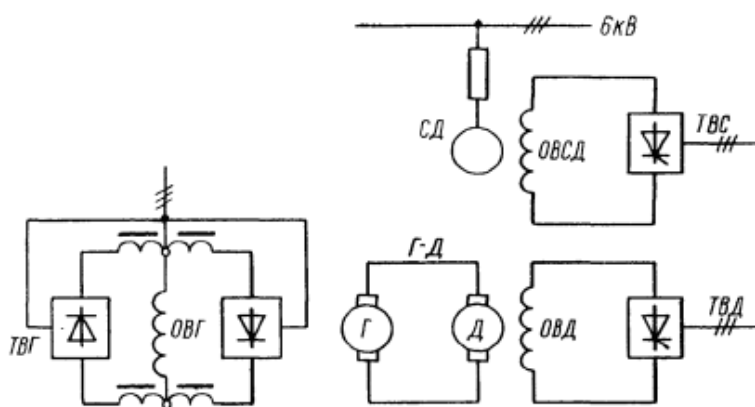


Рисунок 1.6 - Силовая схема привода по системе Г–Д

Механические характеристики двигателя постоянного тока определяются зависимостью

$$n_{\text{дв}} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{MR_{\text{я}}}{c_e c_M \Phi^2}, \quad (1.1)$$

где  $U$  – напряжение на якоре двигателя;  $R_{\text{я}}$  – сопротивление якорной цепи двигателя;  $M$  – момент на валу двигателя;  $\Phi$  – магнитный поток двигателя;  $c_e$ ,  $c_M$  — конструктивные постоянные двигателя.

Графики зависимости частоты вращения двигателя от момента на его валу показаны на рисунке 1.9. Наклон характеристик определяется падением напряжения в якорной цепи двигателя.

В приводе шахтных подъемных машин по системе Г–Д управление частотой вращения двигателя  $D$  осуществляется при постоянном магнитном потоке двигателя  $\Phi = \text{const}$  изменением подводимого к его якору напряжения генератора  $G$  путем регулирования его тока возбуждения.

Питание обмотки возбуждения генератора осуществляется от реверсивного тиристорного преобразователя. Реверсивный привод Г–Д

шахтных подъёмных машин управляется в четырех квадрантах механических характеристик. Изменению линейной скорости подъёма и движущих усилий на органе навивки шахтной подъёмной машины соответствует изменение частоты вращения и момента на валу двигателя на механических характеристиках привода (рисунок 1.7).

Разгон системы при подъёме груза до номинальной скорости осуществляется по линиям 0–1–2–3. Точка 1 определяет момент  $M_d$ , создаваемый подъёмным двигателем. Под действием разности моментов двигателя и момента сопротивления  $M_c$  происходит и разгон системы по линии 1–2.

В точке 3  $M_d = M_c$  и дальнейшее движение происходит с постоянной скоростью. Замедление системы в конце подъёма может происходить при двигательном (линии 3–4–7–8) или генераторном (линии 3–4–5–6–7–8) режиме работы двигателя. В точке 8 осуществляется дотяжка сосудов с постоянной скоростью. При этом  $M_d = M_c$ .

При спуске груза подъёмный двигатель работает в генераторном режиме (второй квадрант механической характеристики). Изменение момента  $M_d$  при выполнении заданного закона движения происходит аналогично.

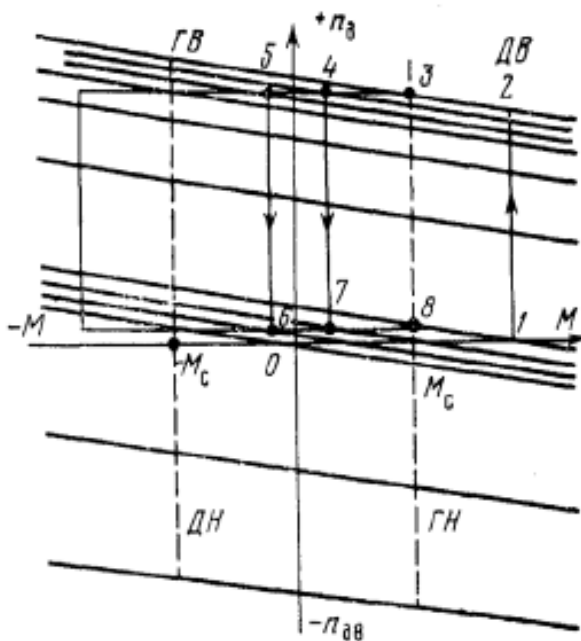


Рисунок 1.7 - Механические характеристики двигателя

При движении сосудов в обратном направлении («назад») двигатель работает в третьем (двигательный режим ДН) и четвертом (генераторный режим ГН) квадрантах. Привод по системе ТП–Д в настоящее время реализуется по двум принципиально отличающимся схемам:

а) с реверсом по якорной цепи двигателя (силовая схема приведена на рисунок 1.8, а);



б) с реверсом по цепи возбуждения двигателя ( рисунок 1.8, б).

Система ТП–Д с реверсом по якорной цепи двигателя, так же, как и привод по системе Г–Д, обеспечивает управление движением подъёмных сосудов путем изменения величины и полярности подводимого напряжения преобразователя.

При реверсировании тока возбуждения подъёмного двигателя направление тока якоря остается неизменным.

Механические характеристики привода по системе ТП–Д (рисунок 1.11) аналогичны зависимостям в приводе Г–Д. Исключение составляет зона прерывистых токов, ограниченная штриховой линией, в которой характеристики искажены.

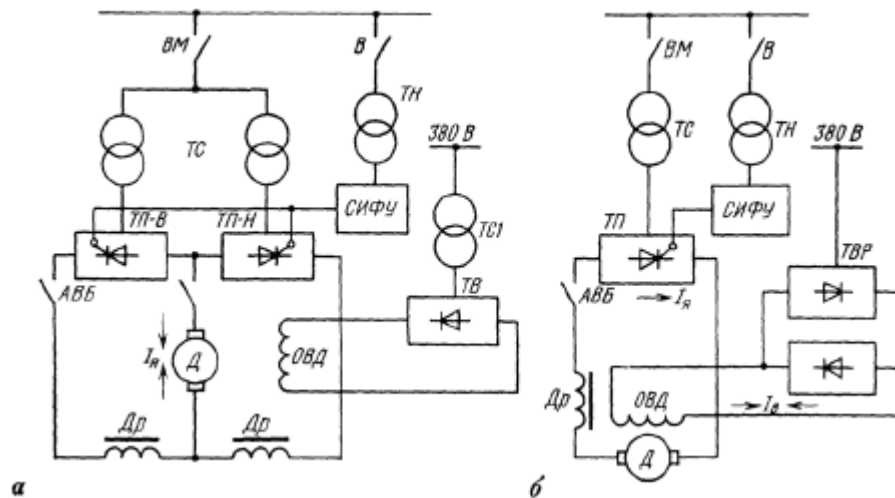


Рисунок 1.8 - Силовые схемы привода по системе ТП–Д

При работе подъёмного двигателя в генераторном режиме тиристорный преобразователь якорной цепи переходит в инверторный режим, обеспечивая преобразование постоянного тока в переменный и передачу энергии из цепи двигателя в питающую сеть.

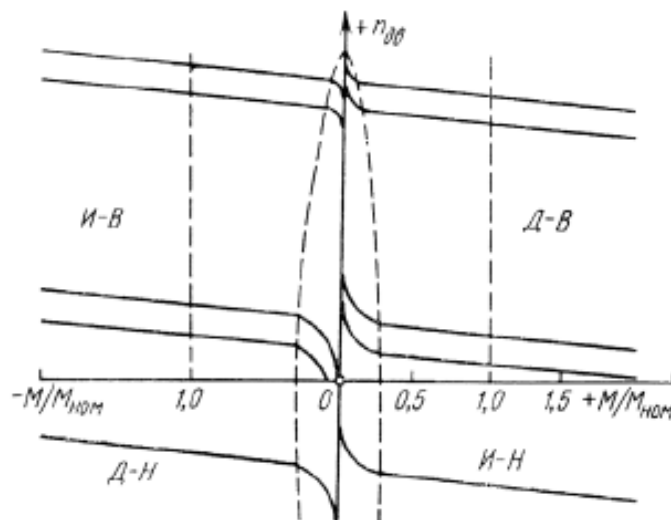


Рисунок 1.9 - Механическая характеристика привода по системе ТП–Д

## 2 Электропривод ШПМ типа НКМЗ 2Ц-5\*2,3 и ее модернизация с применением роторных преобразователей частоты



Рисунок 2.1 - Электропривод шахтной подъемной машины

Традиционный электропривод переменного тока шахтной подъемной машины (ШПМ) содержит высоковольтные асинхронные электродвигатели с фазным ротором, высоковольтные статорные реверсоры, роторные пусковые резисторно - контакторные станции управления (ПРКС) и станции динамического торможения (СДТ) [14].

Рассмотрим однолинейную структурную схему традиционного двухдвигательного электропривода переменного тока шахтной подъемной машины, которая показана на рисунке 2.2.

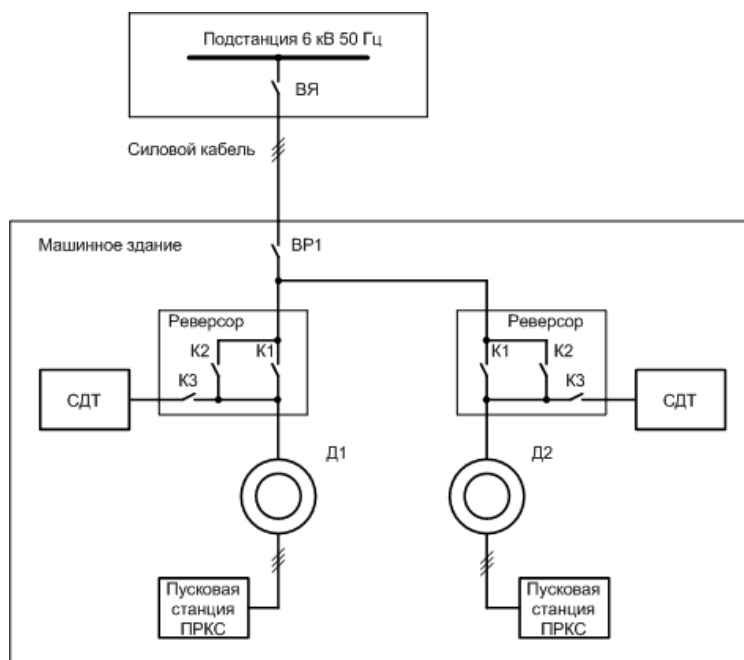


Рисунок 2.2 - Однолинейная схема электропривода ШПМ

Этот привод имеет существенные недостатки, которые заключаются в следующем [14]:

а) использование коммутационной аппаратуры для пуска и регулирования скорости ограничивает по мощности применение асинхронного привода;

б) асинхронный ЭП с роторной резисторно-контакторной станцией управления и динамическим торможением не обладает регулировочными качествами, необходимыми для ШПМ, не обеспечивает высокую точность управления и не позволяет автоматизировать управление ШПМ, что приводит к снижению производительности;

в) при разгоне, торможении и работе ШПМ на пониженной скорости расходуется значительная электроэнергия, идущая на нагрев роторных сопротивлений ПРКС, нагрев электродвигателя и износ механических тормозов. Непроизводительно расходуемая электроэнергия повышает себестоимость продукции и снижает прибыль;

г) асинхронный электропривод с пусковой резисторно-контакторной станцией потребляет из сети значительную реактивную мощность, которую необходимо оплачивать, либо компенсировать достаточно дорогими компенсаторами реактивной мощности.

Замена пусковой роторной резисторно - контакторной станции управления и станции динамического торможения на рекуперативный частотно-регулируемый электропривод позволяет устранить все перечисленные выше недостатки электропривода переменного тока с асинхронными электродвигателями с фазным ротором. ЧРЭП устанавливается между ротором электродвигателя и высоковольтной питающей сетью и обеспечивает:

а) выбор зазоров в механических передачах и плавное натяжение канатов в паузах между пусками шахтной подъемной машины;

б) формирование с высокой точностью требуемой многопериодной диаграммы скорости подъемной машины независимо от изменения нагрузки;

в) плавный разгон сосудов ШПМ за заданное время без потерь мощности в цепи ротора электродвигателя;

г) стабилизацию скорости сосудов ШПМ в периоды равномерного движения с точностью не хуже 1% независимо от степени уравновешенности и характера изменения концевых усилий;

д) выравнивание нагрузки электродвигателей на всех интервалах движения сосудов ШПМ;

ж) рекуперативное торможение с возвратом энергии движущихся масс в питающую сеть;

з) замедление сосудов ШПМ за заданное время с формированием требуемого усилия любого знака;

к) рекуперативное торможение электродвигателей с возвратом энергии движущихся масс в питающую сеть в периоды замедления сосудов ШПМ при формировании отрицательных тормозных усилий;

л) малое время замедления и высокую точность остановки ШПМ без применения механического тормоза, который включается только после полной остановки ШПМ;

м) работу ШПМ на пониженных скоростях в режимах маневрирования, дотягивания, постановки на кулаки, движения в разгрузочных кривых, осмотра ствола шахты без непроизводительных потерь электроэнергии в роторной управляющей станции;

н) компенсацию реактивной мощности, потребляемой асинхронными электродвигателями ШПМ, без применения дополнительных компенсаторов реактивной мощности.

За счет перечисленных выше достоинств ЧРЭП обеспечивает снижение потребления электроэнергии ШПМ более чем на 30% по сравнению с традиционным электроприводом на базе пусковой резисторно- контакторной станции.

Кроме экономии электроэнергии электропривод позволяет повысить производительность ШПМ за счет сокращения интервалов движения сосудов ШПМ с малой скоростью и формирования требуемой диаграммы скорости с высокой точностью.

За счет обеспечения высокой точности управления с плавным замедлением и точной остановкой сосудов ШПМ частотно-регулируемый электропривод исключает проскакивания и удары клетки, удары скипа по разгрузочным кривым, что продлевает срок службы механизмов и снижает эксплуатационные затраты.

На рисунке 2.3 показана однолинейная структурная схема двухдвигательного электропривода ШПМ после модернизации с применением роторных преобразователей частоты.

В силовой схеме электропривода (рисунок 2.3) после модернизации сохранено в качестве резервного все оборудование традиционного электропривода с ПРКС и СДТ (рисунок 2.2). Оборудование, работающее в составе частотно-регулируемого электропривода, выделено зеленым цветом. Для частотного управления каждым электродвигателем дополнительно введены роторные преобразователи частоты, которые подключаются к питающей сети 6 кВ 50 Гц через согласующие трансформаторы (Тр1, Тр2) и высоковольтные разъединители (ВР2, ВР3). Силовые выходы преобразователей подключаются к обмоткам ротора электродвигателей (Д1, Д2) через роторные низковольтные переключатели (НП1, НП2), которые обеспечивают быстрый переход от традиционного электропривода к частотно-регулируемому и обратно.

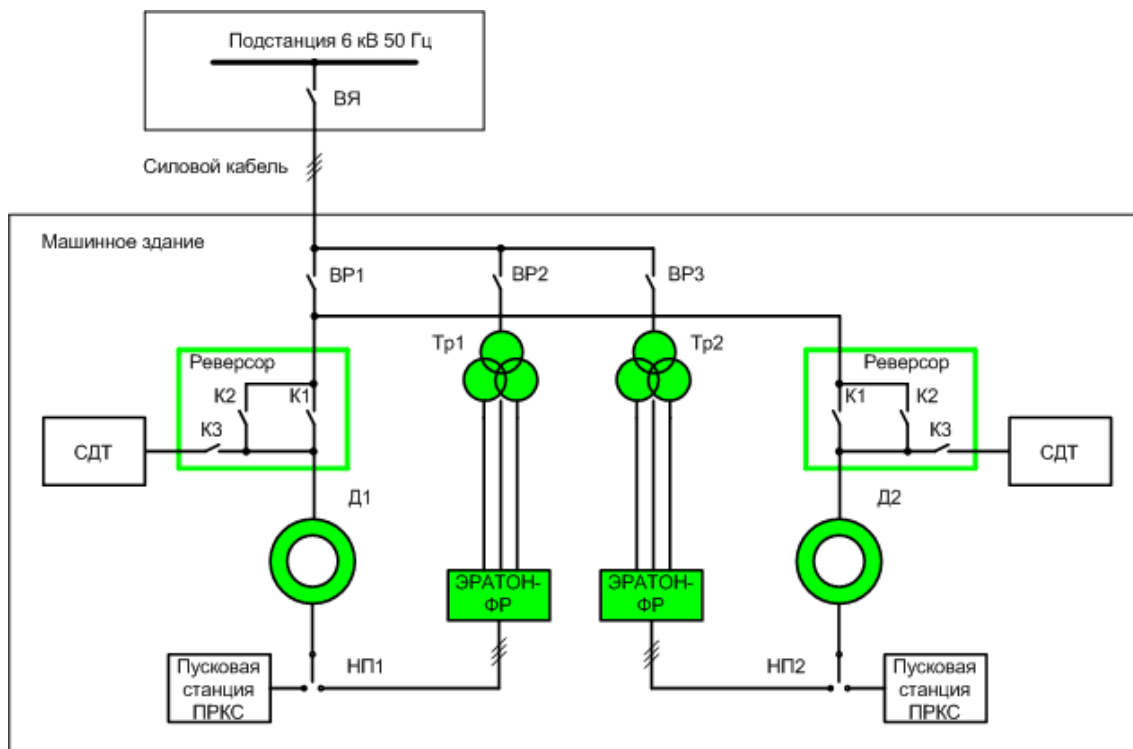


Рисунок 2.3 – Однолинейная схема ЭП ШПМ после модернизации

Преобразователи частоты предназначены для преобразования напряжения питающей сети с постоянной частотой 50 Гц в трехфазное напряжение ротора с регулируемой амплитудой и частотой и регулирования величины и направления потока активной мощности в цепи ротора, определяющей момент электродвигателя. Преобразователь обеспечивает передачу активной мощности скольжения из ротора в питающую сеть, а также из сети в цепь ротора электродвигателя. Рекуперация энергии скольжения АД ФР в сеть обеспечивает плавный пуск и работу в двигательном режиме без потерь мощности в резисторах пусковой станции. При этом из питающей сети потребляется только мощность, передаваемая на вал электродвигателя. Изменение направления потока активной мощности в цепи ротора электродвигателя на противоположный (из сети в цепь ротора) переводит электродвигатель в режим рекуперативного торможения с возвратом энергии вала через электродвигатель в питающую сеть. При этом осуществляется рекуперативное торможение электродвигателя с минимальными потерями мощности в электродвигателе и преобразователе частоты.

Изменение направления движения сосудов ШПМ в рассматриваемой схеме частотно-регулируемого электропривода выполняется аналогично традиционной схеме за счет изменения порядка чередования фаз статора электродвигателей с помощью контактных реверсоров при заторможенных сосудах ШПМ.

Существует возможность бесконтактного реверса направления движения сосудов ШПМ за счет отключения статора электродвигателей от

сети 6 кВ 50 Гц и замены контакторных реверсоров на низковольтные рекуперативные транзисторные преобразователи частоты, как показано на рисунке 2.4, или на тиристорный непосредственный преобразователь частоты (НПЧ).

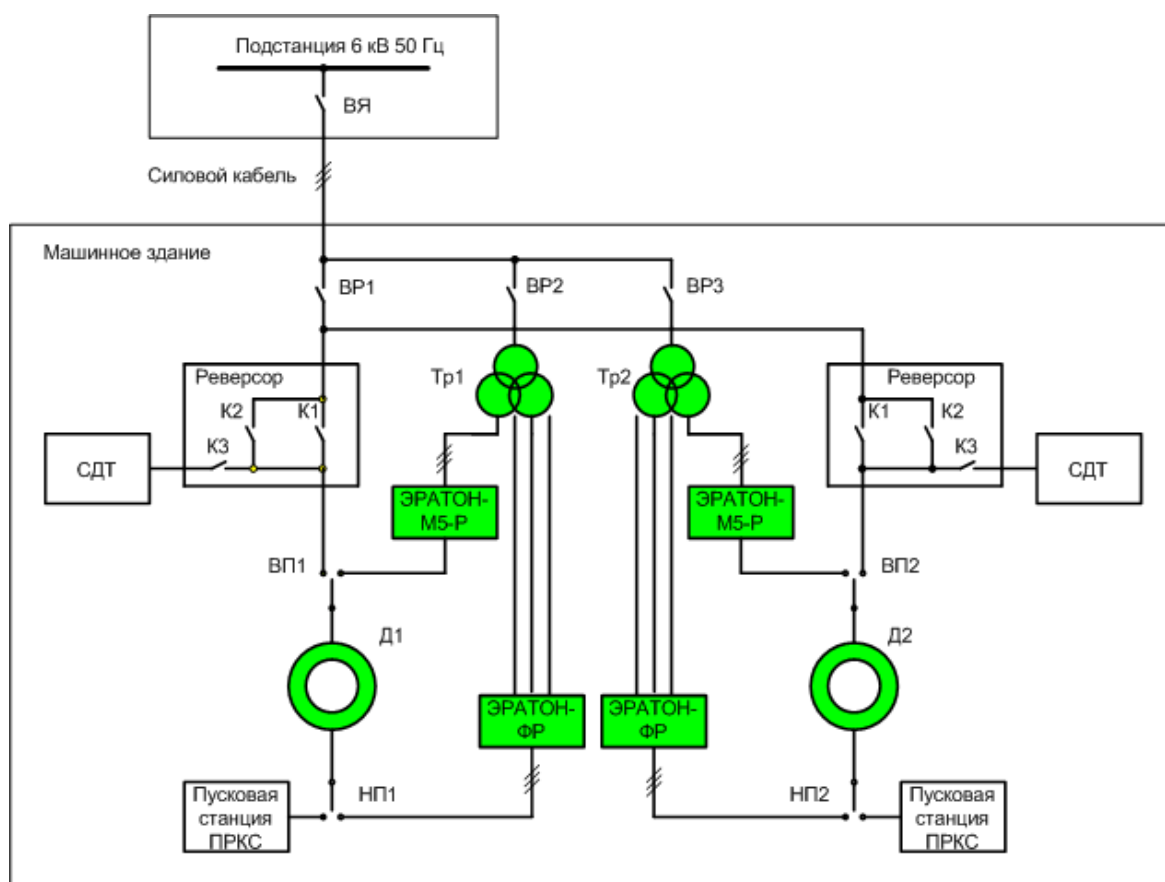


Рисунок 2.4 - Однолинейная схема ЭП ШПМ после модернизации с дополнительными высоковольтными переключателями

Для перехода от схемы электропривода с роторными преобразователями и контакторными реверсорами к частотно-регулируемому электроприводу с отключением статоров электродвигателей от сети 6 кВ 50 Гц и включением электронных реверсоров в статор электродвигателей схему электропривода дополнительно введены два высоковольтных переключателя ВП1, ВП2. При включении преобразователей частоты в статор и ротор электродвигателей с фазным ротором создается электропривод по схеме полностью управляемой машины двойного питания, который обеспечивает регулирование скорости в двигательных и генераторных (тормозных) режимах, а также бесконтактный реверс направления движения. При этом высоковольтные контакторные реверсоры сохраняются в схеме электропривода только для использования резервной традиционной схемы электропривода с ПРКС и СДТ при отключенном частотно-регулируемом электроприводе.

При выборе целесообразного построения асинхронного частотно-регулируемого электропривода, определения областей рационального

применения ЧРЭП и рассмотрения конкурентоспособности был сопоставлен весь комплекс показателей с коэффициентами их относительной весомости, а именно технико-экономические показатели; энергетические; динамические; эксплуатационные; надежность и другие.

Электроприводы до 30кВт обеспечивают полосу пропускания частот при отсутствии дополнительных моментов инерции и при задающем напряжении, соответствующим линейной области, не менее 20тыс. Гц. Для электроприводов мощностью более 30кВт полоса пропускания не лимитируется.

Силовая схема ПЧ состоит из двух реверсивных тиристорных преобразователей постоянного тока типа ТП1 и ТП2 с отдельным управлением комплектами вентилей. Статорные обмотки асинхронного двигателя М питаются от автономных преобразователей, гальванически развязанных друг от друга.

В систему управления электропривода входят: датчик интенсивности, предназначенный для формирования темпа разгона и торможения двигателя; ПИ регулятора скорости РС; координатный преобразователь КП, предназначенный для задания синусоидальных токов в обмотках двигателя; узел «напряжение-частота», предназначенный для преобразования аналогового реверсивного выходного сигнала регулятора скорости  $\omega_s$ .

Во многих областях применения не регулируемый привод уступает место, как более перспективному, частотно-регулируемому асинхронному приводу [1]. В качестве частотно- регулируемых асинхронных двигателей (ЧРАД) используют следующие асинхронные двигатели:

1. Серийные не регулируемые асинхронные двигатели общего или специального назначения, рассчитанные на питание от сети с постоянной частотой и напряжением. Такие двигатели не всегда удовлетворяют требованиям технологического процесса и могут иметь низкие энергетические показатели.

2. Модернизированные асинхронные двигатели, созданные на базе серийных, но с учетом специфики их работы от преобразователя частоты (ПЧ). При проектировании таких двигателей снимаются ограничения по кратностям пускового тока, имеется возможность использовать нестандартное номинальное напряжение. По возможности, в модернизированных двигателях для обмотки ротора используют материал с более высокой удельной электрической проводимостью, изменяют обмоточные данные обмотки статора и т.д.

3. Узкоспециализированные асинхронные двигатели, спроектированные с учетом законов управления частотой и напряжением ПЧ, диапазоном регулирования частоты, характером нагрузки и других факторов, специфичных для конкретной области применения частотно-регулируемого асинхронного привода. Стоимость таких двигателей существенно выше, чем серийных и модернизированных.

При выборе существующих или при проектировании модернизированных ЧРАД возникает необходимость в количественной оценке их характеристик при работе от ПЧ. Для решения такой задачи, особенно на стадии проектирования ЧРАД, целесообразно воспользоваться математическим моделированием частотно-регулируемого асинхронного привода. Рассмотрим модель для привода НКМЗ 2Ц-5\*2,3.

Математическая модель частотно-регулируемого асинхронного привода должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Простота в реализации.
2. Учет влияния насыщения железа магнитопровода на параметры асинхронного двигателя.
3. Учет законов регулирования частоты и напряжения ПЧ.
4. Учет механических характеристик нагрузочного момента и тормозного устройства.

Для математической модели ЧРАД использована математическая модель обобщенной машины в синхронной системе координат  $u, v$  [2, 3]. Система координат  $u, v$  позволяет наиболее просто изменять во времени, не зависимо друг от друга, амплитуду фазного напряжения и частоту ПЧ по любому заданному закону:

$$\left. \begin{aligned} u_{su} &= i_{su} \cdot r_s + \frac{d\psi_{su}}{dt} - \omega_x \cdot \psi_{sv}; \\ u_{sv} &= i_{sv} \cdot r_s + \frac{d\psi_{sv}}{dt} + \omega_x \cdot \psi_{su}; \\ 0 &= i_{ru} \cdot r_r + \frac{d\psi_{ru}}{dt} - (\omega_x - \omega_r) \cdot \psi_{rv}; \\ 0 &= i_{rv} \cdot r_r + \frac{d\psi_{rv}}{dt} + (\omega_x - \omega_r) \cdot \psi_{ru}; \\ M_{эм} &= M_c(t) + \frac{J_\Sigma}{p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где:  $u_{su}, u_{sv}$  – напряжения;  $i_{su}, i_{sv}, i_{ru}, i_{rv}$  – токи,  $r_s, r_r$  – сопротивления;  $\psi_{su}, \psi_{sv}, \psi_{ru}, \psi_{rv}$  – потокосцепления обмоток статора и ротора обобщенной машины;

$M_{эм}$  и  $M_c(t)$  – электромагнитный и нагрузочный моменты;  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции,  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $\omega_x$  и  $\omega_r$  – угловая частота вращения системы координат  $u, v$  и ротора.

Система координат  $u, v$  вращается синхронно с магнитным полем обмотки статора с угловой частотой

$$\omega_x = 2\pi f_x, \quad (2.2)$$



где  $f_x$  – частота на выходе ПЧ.

Систему дифференциальных уравнений (1) дополним в матричной форме уравнениями потокосцепления обмоток статора и ротора:

$$\begin{pmatrix} \psi_{su} \\ \psi_{ru} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{su} \\ i_{ru} \end{pmatrix}; \quad (2.3)$$

$$\begin{pmatrix} \psi_{sv} \\ \psi_{rv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{sv} \\ i_{rv} \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Полные индуктивные сопротивления фаз обмоток статора  $L_s$  и ротора  $L_r$ :

$$\left. \begin{aligned} L_s &= L_{\sigma 1n} + L_m, \\ L_r &= L_{\sigma 2n} + L_m, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где  $L_{\sigma 1n}$  и  $L_{\sigma 2n}$  – индуктивности рассеяния фаз обмоток статора и ротора с учетом насыщения,  $L_m$  – взаимная индуктивность. Для решения дифференциальных уравнений (1) воспользуемся численным интегрированием. С точки зрения устойчивости численного интегрирования целесообразно решение дифференциальных уравнений (1) относительно потокосцеплений обмоток статора и ротора. Введем обозначения:

$$k_{rs} = L_r / L_{ms}; \quad k_{sr} = L_s / L_{ms}; \quad k_m = L_m / L_{ms}, \quad (2.6)$$

где  $L_{ms} = L_s \cdot L_r - L_m^2$  – определитель матриц коэффициентов уравнения (2.3, 2.4).

При принятых обозначениях (2.6) из уравнения (2.3, 2.4) выразим токи обмоток статора и ротора:

$$\left. \begin{aligned} i_{su} &= \psi_{su} \cdot k_{rs} - \psi_{ru} \cdot k_m; \\ i_{sv} &= \psi_{sv} \cdot k_{rs} - \psi_{rv} \cdot k_m; \\ i_{ru} &= \psi_{ru} \cdot k_{sr} - \psi_{su} \cdot k_m; \\ i_{rv} &= \psi_{rv} \cdot k_{sr} - \psi_{sv} \cdot k_m. \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Подставим (2.7) в (2.1) и приведем математическую модель (2.1) к виду, удобному для численного интегрирования:

$$\left. \begin{aligned} d\psi_{su} &= [u_{su} + \omega_x \cdot \psi_{sv} - r_s \cdot (\psi_{su} \cdot k_{rs} - \psi_{ru} \cdot k_m)] \cdot dt; \\ d\psi_{sv} &= [u_{sv} - \omega_x \cdot \psi_{su} - r_s \cdot (\psi_{sv} \cdot k_{rs} - \psi_{rv} \cdot k_m)] \cdot dt; \\ d\psi_{ru} &= [(\omega_x - \omega_r) \cdot \psi_{rv} - r_r \cdot (\psi_{ru} \cdot k_{sr} - \psi_{su} \cdot k_m)] \cdot dt; \\ d\psi_{rv} &= [(\omega_r - \omega_x) \cdot \psi_{ru} - r_r \cdot (\psi_{rv} \cdot k_{sr} - \psi_{sv} \cdot k_m)] \cdot dt. \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Напряжения  $u_{su}$  и  $u_{sv}$  обмоток статора выразим через напряжение на выходе ПЧ:

$$\left. \begin{aligned} u_{su} &= U_x \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_k), \\ u_{sv} &= U_x \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_k). \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Амплитуда фазного напряжения  $U_x$  является модулем изображающего вектора напряжений обмотки статора. Амплитуда фазного напряжения ПЧ, фазовый угол изображающего вектора напряжений  $\varphi_u$  и угол поворота  $\varphi_k$  системы координатных осей  $u, v$  относительно оси  $a$  трехфазной обмотки статора задаются начальными условиями.

При скалярном управлении ПЧ начальными условиями целесообразно задать  $\varphi_u=0$  и  $\varphi_k=0$ . В этом случае в момент времени  $t=0$  ось  $u$  системы координат  $u, v$  и изображающий вектор напряжения  $U_x$  направлены по оси фазы  $a$  трехфазной обмотки статора, в уравнении (2.9):  $u_{su}=U_x$ ,  $u_{sv}=0$ . Начальными условиями в момент времени  $t=0$  задаются потокосцепления  $\psi_{su}$ ,  $\psi_{sv}$ ,  $\psi_{ru}$ ,  $\psi_{rv}$  обмоток, частота  $\omega_r$  вращения ротора, частота  $f_x$  ПЧ.

При заданных начальных условиях на каждом шаге численного интегрирования рассчитываются: частота вращения  $\omega_x$  (2.2); приращения потокосцеплений (2.8); потокосцепления обмоток

$$\left. \begin{aligned} \psi_{su} &= \psi_{su} + d\psi_{su}, \quad \psi_{sv} = \psi_{sv} + d\psi_{sv}, \\ \psi_{ru} &= \psi_{ru} + d\psi_{ru}, \quad \psi_{rv} = \psi_{rv} + d\psi_{rv}; \end{aligned} \right\}$$

токи в обмотках статора и ротора (2.7); электромагнитный момент

$$M_{эм} = \frac{m}{2} \cdot p \cdot (\psi_{su} \cdot i_{sv} - \psi_{sv} \cdot i_{su}),$$

где  $m=3$  – число фаз обмотки статора,  $p$  – число пар полюсов двигателя; приращение угловой частоты вращения ротора

$$d\omega_r = p \cdot \left( \frac{M_{эм} - M_c(t)}{J_\Sigma} \right) \cdot dt;$$

частота вращения ротора и текущее время

$$\omega_r = \omega_r + d\omega_r, \quad t = t + dt.$$

По токам ур. (7) на каждом шаге численного интегрирования рассчитываются: модуль  $I_{s1}$  изображающего вектора токов обмотки статора

$$I_{s1} = \sqrt{i_{su}^2 + i_{sv}^2};$$

фазовый угол  $\varphi_i$  изображающего вектора токов обмотки статора

$$\varphi_i = \varphi_u - \operatorname{arctg}(i_{sv} / i_{su});$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi_a = \cos(\varphi_i);$$

активная мощность двигателя

$$P_a = \frac{m}{2} U_x I_{s1} \cos \varphi_a.$$

При пусках ЧРАД с предельным нагрузочным моментом с уменьшением времени регулирования  $t_{reg}$  и, особенно, с увеличением напряжения компенсации  $U_{ком}$  (рисунок 2.5) токи в обмотках могут превысить номинальные в два и более раза. ЧРАД может выполняться с закрытыми пазами ротора. Для таких двигателей при токах, начиная с номинального и выше, из-за насыщения потоками рассеяния мостика закрытых пазов ротора, пазовое рассеяние обмотки ротора уменьшается. Короткозамкнутая обмотка ЧРАД может выполняться из меди [4]. Предельная верхняя частота может составлять 100 Гц и выше при номинальной частоте  $f_1=50$  Гц. В связи с этим, в математической модели целесообразно предусмотреть влияние насыщения железа магнитопровода потоками рассеяния на индуктивности рассеяния обмоток статора  $L_{\sigma 1}$  и ротора  $L_{\sigma 2}$ , а также влияние вытеснения тока в стержнях ротора на активное сопротивление  $r_r$  обмотки ротора. Это позволит

моделировать «жесткие» пуски, при которых учет влияния насыщения и вытеснения тока наиболее актуален.

Индуктивности рассеяния с учетом насыщения предлагается рассчитывать в функции тока обмотки статора, а активное сопротивление ротора с учетом вытеснения тока – в функции частоты тока обмотки ротора. На основании данных проектирования двигателя считаются известными: не насыщенные  $L_{\sigma 1}$ ,  $L_{\sigma 2}$  и насыщенные  $L_{1p}$ ,  $L_{2p}$  при скольжении  $s=1$  индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; пусковой ток  $I_{p1}$  обмотки статора и активное сопротивление  $r_{2p}$  обмотки ротора при скольжении  $s=1$ . Для учета влияния насыщения определяется разность между не насыщенными и насыщенными значениями индуктивностей рассеяния

$$\Delta L_1 = L_{\sigma 1} - L_{1p}, \quad \Delta L_2 = L_{\sigma 2} - L_{2p}$$

В функции тока  $I_{s1}$  рассчитываются насыщенные значения индуктивностей рассеяния обмоток статора и ротора

$$L_{\sigma 1n} = L_{\sigma 1} - \frac{\Delta L_1 \cdot \sqrt[3]{I_{p1}}}{\sqrt[3]{I_{p1}} - \sqrt[3]{I_{kp}}} \cdot \left( 1 - \frac{\sqrt[3]{1,41 I_{kp}}}{\sqrt[3]{I_{s1}}} \right),$$

$$L_{\sigma 2n} = L_{\sigma 2} - \frac{\Delta L_2 \cdot \sqrt[3]{I_{p1}}}{\sqrt[3]{I_{p1}} - \sqrt[3]{I_{kp}}} \cdot \left( 1 - \frac{\sqrt[3]{1,41 I_{kp}}}{\sqrt[3]{I_{s1}}} \right),$$

где  $I_{kp}$  – критический ток обмотки статора, ниже которого насыщение магнитной цепи не оказывает заметного влияния на индуктивности рассеяния обмоток. Величина этого тока определяется из предварительных расчетов механической характеристики двигателя. В случае закрытых пазов на роторе целесообразно принять ток  $I_{kp}$  равным номинальному току обмотки статора. Для учета насыщения достаточно на каждом шаге интегрирования выполнить 3–4 последовательных приближений.

Для учета влияния вытеснения тока в стержнях обмотки ротора на каждом шаге интегрирования рассчитываются скольжение

$$s_x = \left( 1 - \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) \cdot \frac{f_x}{f_1}$$

и коэффициент изменения активного сопротивления ротора

$$k_{rx} = 0,2 + \left( \frac{r_{2p}}{r_2} - 0,2 \right) \cdot \sqrt{\text{abs}(s_x)},$$

где  $f_1$  – базовая частота, на которую рассчитан двигатель,  $\omega_1 = 2\pi f_1$  – угловая частота,  $r_2$  – сопротивление обмотки ротора без учета вытеснения тока.

Если  $k_{rx} > 1$ , то активное сопротивление обмотки ротора с учетом вытеснения тока рассчитывается по формуле  $r_r = k_{rx} \cdot r_2$ , иначе  $r_r = r_2$ .

Исходными данными к моделированию являются номинальные данные и параметры двигателя.

Номинальные данные: номинальная мощность двигателя  $P_n$ , номинальное фазное напряжение  $U_{нф}$ , частота сети  $f_1$ , число пар полюсов  $p$ , коэффициент полезного действия  $\eta_n$ , коэффициент мощности  $\cos\phi$ , номинальное скольжение  $s_n$ , кратность пускового тока  $I_{p1}$ , кратности пускового и критического моментов  $M_{p1}$ ,  $M_{k1}$ , суммарный момент инерции ротора и приведенного к валу двигателя механизма  $J_\Sigma$ .

Параметры двигателя учитывают индуктивные и активные сопротивления, соответствующие номинальному (без учета насыщения железа и вытеснения тока) и пусковому режимам работы двигателя (с учетом насыщения железа и вытеснения тока при скольжении  $s=1$ ). Параметры номинального режима работы: индуктивное сопротивление рассеяния обмоток статора  $x_{\sigma 1}$  и ротора  $x_{\sigma 2}$ , активное сопротивление обмотки статора  $r_s$  и ротора  $r_r$ , индуктивное сопротивление взаимной индукции  $x_m$ , коэффициент насыщения магнитной цепи в режиме холостого хода  $knas$ . Параметры пускового режима: индуктивные сопротивления рассеяния  $x_{\sigma 1p}$  и  $x_{\sigma 2p}$  – обмотки статора и ротора, активные сопротивление обмотки ротора  $r_{2p}$ .

В программе математического моделирования нагрузочный момент  $M_c(t)$  считается постоянным, но может быть задан в зависимости от частоты вращения ротора  $\omega_r$  активным, рисунок 2.5, а, или реактивным, рис. 1, б.

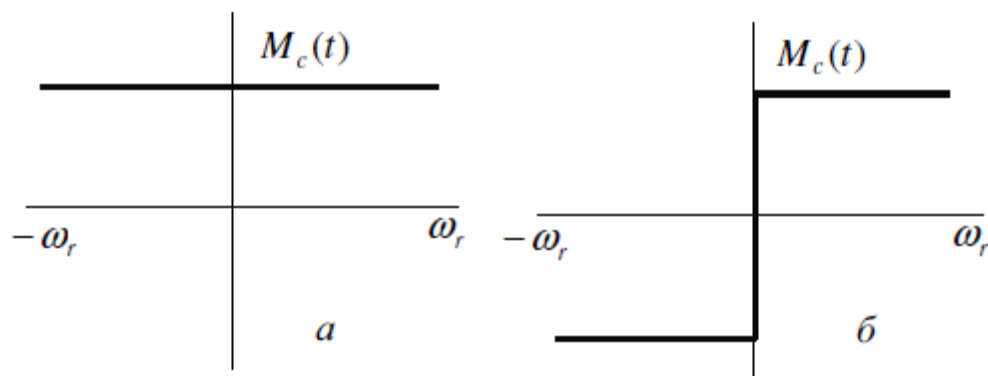


Рисунок 2.5 - Механическая характеристика нагрузочного момента

Величина нагрузочного момента задается в относительных единицах коэффициентом  $k_{mc}=M_c(t)/M_n$ , где  $M_n$  – номинальный момент двигателя. В случае реактивного момента коэффициент  $k_{mc}$  принимает знак направления частоты вращения ротора, т.е.  $k_{mc}=k_m \text{sign}(\omega r)$ .

В программе математического моделирования предусматривается возможность регулирования частоты  $f_x$  и напряжения  $U_x$  ПЧ по линейному закону, рисунок 2.6, с компенсацией напряжения.

Напряжение и частота ПЧ представлены на рисунке 2.6 в относительных единицах (о.е.). За базовые значения напряжения и частоты приняты установившиеся значения напряжения и частоты.

В исходных данных задаются времена:  $t_{reg}$  – регулирования по линейному закону частоты и напряжения ПЧ при разгоне двигателя;  $t_{rav}$  – работы двигателя при установившихся значениях частоты  $f_{yst}$  и напряжения  $U_{yst}$  ПЧ;  $t_{ost}$  – остановка двигателя, за которое частота и напряжение ПЧ изменяются по линейному закону до своих критических значений  $f_{kr}$  и  $U_{kr}$ .

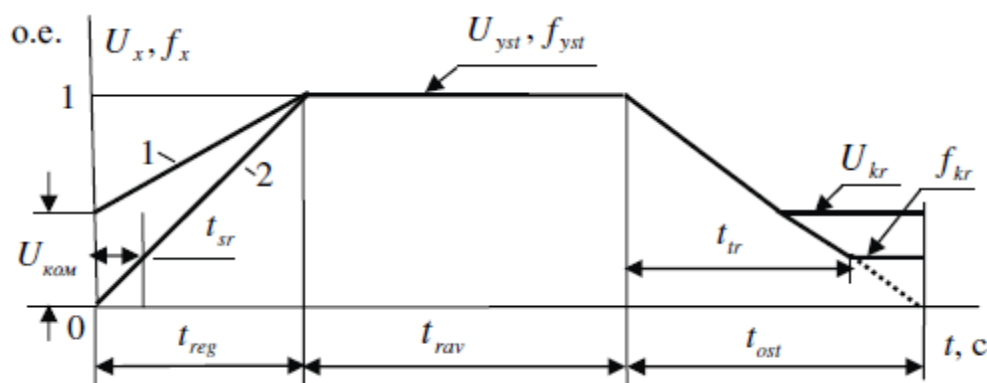


Рисунок 2.6 - Диаграммы напряжения и частоты ПЧ: 1) напряжение  $U_x$ , 2) частота  $f_x$

При активном характере нагрузочного момента задается  $t_{sr}$  – время, в течение которого двигатель находится в заторможенном состоянии и после которого происходит срабатывание тормозного устройства с последующим растормаживанием двигателя. При критических значениях частоты  $f_{kr}$  и напряжения  $U_{kr}$  происходит срабатывание тормозного устройства с последующим торможением двигателя и отключением его от ПЧ.

Программа математического моделирования предусматривает возможность задания начальных  $U_0, f_0$  (при  $t=0$ ) и установившихся  $U_{yst}, f_{yst}$  значений напряжения и частоты ПЧ. За время регулирования  $t_{reg}$  частота и напряжение ПЧ изменяются от начальных до установившихся значений по линейному закону.

Имеется возможность задания только начальной и установившейся частоты ПЧ. В этом случае за время  $t_{reg}$  частота изменяется по линейному закону

$$f_x = \frac{f_{yst} - f_0}{t_{reg}} \cdot t + f_0.$$

При выполнении условия  $(t_{reg} + t_{rav}) \geq t \geq t_{reg}$  принимается  $f_x = f_{yst}$ . За время  $t > (t_{reg} + t_{rav})$  частота изменяется также по линейному закону

$$f_x = f_{yst} - \frac{f_{yst}}{t_{ost}} \cdot (t - t_{reg} - t_{rav}).$$

Напряжение ПЧ является функцией частоты  $U_x = f(f_x)$  и с учетом напряжения  $U_{ком}$  компенсации вычисляется по формуле

$$U_x = \sqrt{2} \cdot \left( U_{ком} + \frac{U_{нф} - U_{ком}}{f_1} \cdot f_x \right),$$

где  $U_{нф}$  и  $f_1$  – номинальные значения фазного напряжения и частоты напряжения двигателя.

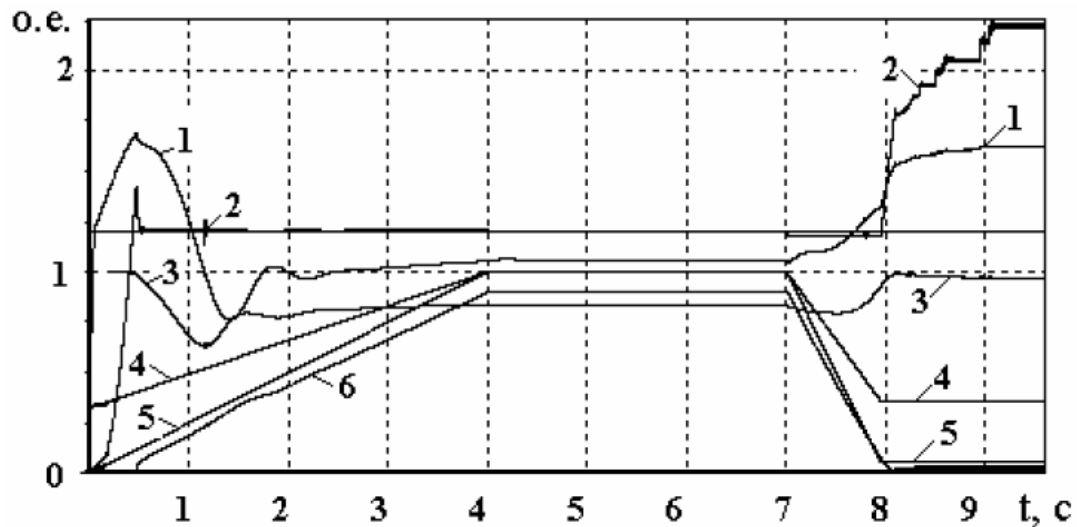
Тормозное устройство включается (рисунок 2.6) при разгоне двигателя в момент времени  $t_{sr}$ , при торможении – в момент времени  $t > t_{tr}$ . В исходных данных для математической модели тормозного устройства задаются:  $t_{sr}$  – время растормаживания и  $M_{mm}$  – максимальный тормозной момент. Тормозной момент является функцией времени и частоты вращения ротора. В функции времени тормозной момент из  $1kr$   $U1$  меняется за время  $t_{sr}$  по линейному закону – от максимального значения до нуля в режиме растормаживания и от нуля до максимального значения в режиме торможения. В функции частоты вращения ротора тормозной момент носит реактивный характер, принимая знак направления вращения ротора.

Изложенная выше модель применена для исследуемого ниже ЧРАД с короткозамкнутым ротором мощностью 800кВт. В качестве примера на рисунке 2.7 представлены результаты моделирования. Подъем груза осуществляется в двигательном режиме, спуск груза – в генераторном.

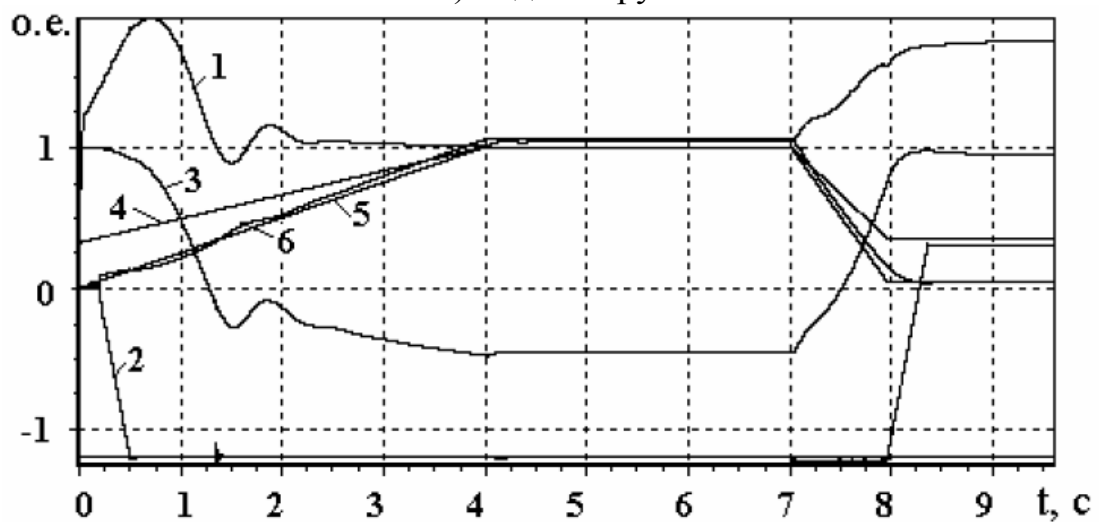
За базисные момент и ток приняты номинальные значения момента и тока двигателя. За базисные напряжение и частоту приняты установившиеся значения частоты и напряжения ПЧ. За базисную частоту вращения принята синхронная частота вращения ротора, соответствующая установившейся частоте ПЧ.

Согласно техническому заданию двигатель должен обеспечивать постоянство момента в диапазоне частот от 5 до 50 Гц и постоянство мощности на валу двигателя при частотах от 50 до 100 Гц. По ТЗ предельный момент нагрузки  $M_c = 1,2M_n$ . Результаты моделирования соответствуют предельному моменту нагрузки, установившейся частоте  $f_{yst} = 5$  Гц,

напряжению компенсации  $U_{ком}=10$  В, времени регулирования напряжения и частоты при пуске двигателя  $t_{рег}=4$  с, механической характеристике тормозного устройства –  $M_{мм}=1,7Мн$ ,  $t_{rs}=0,4$  с.



б) подъем груза



б) спуск груза

Рисунок 2.7 - Временные зависимости (в о.е.): 1) фазный ток статора, 2) электромагнитный момент, 3) коэффициент мощности, 4) частота и 5) фазное напряжение на выходе ПЧ, 6) частота вращения ротора

На основании математического моделирования установлено следующее:

а) Принятый закон регулирования частоты и напряжения ПЧ (при напряжении компенсации  $U_{ком}=10$  В) обеспечивают надежный подъем и спуск груза двигателем в соответствии ТЗ.

б) Механическая характеристика тормозного устройства способствует равномерному разгону двигателя до установившейся частоты вращения.



## 2.1 Расчет экономии электроэнергии при применении частотных преобразователей

Описание шахтной подъемной машины

1. Тип ШПМ - НКМЗ 2Ц-5\*2,3 (одноканатная);
2. Назначение ШПМ — грузовая;
3. Тип подъемного сосуда — неопрокидывающийся скуп 2120 г/п 11000 кг;
4. Высота подъема горизонта — 534 м;
5. Подъем груза
  - а) скорость подъема — 7 м/сек;
  - б) количество подъемов в час — 25;
  - в) время цикла — 144 сек;
  - г) время работы подъема в сутки — 18 часов;
  - д) число рабочих дней в году — 350.
6. Количество - два электродвигателя;
7. Номинальные данные электродвигателей:
  - а) Мощность  $P_n = 800$  кВт;
  - б) Обороты  $n_n = 293$  об/мин;
  - в) Напряжение статора  $U_{сн} = 6000$  В;
  - г) Напряжение ротора  $U_{рн} = 665$  В;
  - д) Ток ротора  $I_{рн} = 755$  А;
  - ж) Коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,8$ ;
  - е) КПД = 92%.

Электропривод действующей ШПМ содержит пусковую резисторно-контакторную станцию (ПРКС) в роторе и станцию динамического торможения (СДТ) в статоре каждого электродвигателя. Структурная схема электропривода показана на рисунке 2.8. ПРКС в роторе каждого электродвигателя содержит набор резисторов (омических сопротивлений) и контакторов. СДТ представляет собой регулируемый источник постоянного тока, который подключается к двум фазам статора электродвигателя при отключенной сети 6 кВ 50 Гц и обеспечивает создание тормозного момента электродвигателя [14].

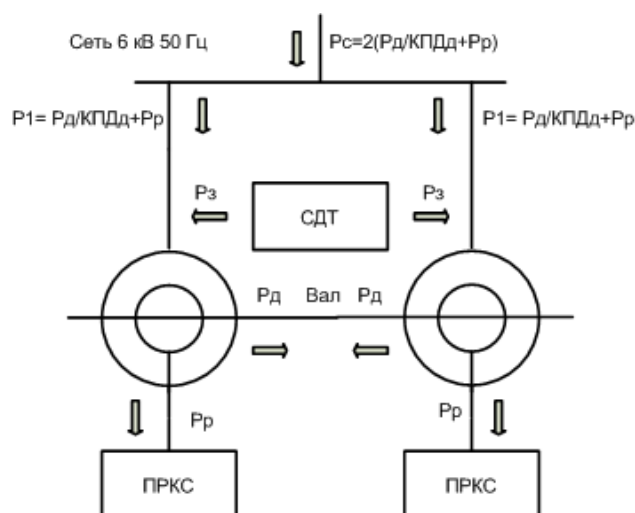


Рисунок 2.8 - Структурная схема электропривода ШПМ с ПРКС и СДТ

Один цикл подъема груженого скипа с нижнего горизонта шахты включает следующие режимы работы ШПМ: разгон скипа; движение с пониженной скоростью; разгон до максимальной скорости; движение с максимальной скоростью; замедление; дотяжка и ход в разгрузочных кривых; стопорение.

Т а б л и ц а 2.1 - Усредненные значения технических параметров, характеризующих перечисленные режимы работы ШПМ за цикл подъема скипа.

Подъем скипа	Время	Путь	Скорость (средняя)	Усилие подъема скипа			Относит. усилие
				начало	конец	среднее	
	сек	м	м/сек	кН	кН	кН	о.е.
1. Трогание	1,60	0,35	0,22	230,59	230,58	230,59	1,01
2. Движение с пониженной скоростью	8,90	3,60	0,40	178,74	178,61	178,68	0,78
3. Разгон	8,45	28,50	3,37	334,14	333,08	333,61	1,46
4. Движение с максимальной скоростью	65,95	461,65	7,00	177,55	154,05	165,80	0,73
5. Замедление	8,45	33,50	3,97	-1,48	-2,54	-2,01	-0,01
6. Дотяжка и ход в разгрузочных кривых	15,00	6,00	0,40	152,99	152,83	152,91	0,67
7. Стопорение	0,08	0,40	5,00	-54,54	-54,55	-54,54	-0,24
8. Всего	108,42	534,00					
9. Время цикла 25 подъемов в час	144,00						

Перечисленные выше режимы работы обеспечиваются следующими режимами работы электропривода ШПМ:

Для создания 1 режима на статор электродвигателей подается напряжение 6 кВ 50 Гц, а к цепям ротора подключаются омические сопротивления первой ступени ПРКС, обеспечивающие протекание в цепи ротора пускового тока, достаточного для создания пускового момента электродвигателя. Двигатели разгоняются до скорости 0,22 м/сек за время 1,6 сек.

В 2 режиме включены сопротивления первой ступени ПРКС1 в роторах электродвигателей.

В 3 режиме для разгона электродвигателей до максимальной скорости поочередно закорачивают ступени сопротивлений контакторами ПРКС, что обеспечивает поддержание пускового момента электродвигателей больше момента сопротивления в течение всего разгона электродвигателя. В рассматриваемой ШПМ таких ступеней шесть.

В 4 режиме после разгона электродвигателей до скорости, близкой к номинальной, в цепи ротора оставляют относительно небольшие сопротивления, обеспечивающие выравнивание нагрузок двух электродвигателей ШПМ.

Для замедления скипа в 5 режиме отключают статоры электродвигателей от сети 6 кВ 50 Гц и подключают их к станции динамического торможения (СДТ). Регулируя величину постоянного тока статора создают нужный тормозной момент для замедления скипа перед входом в разгрузочные кривые.

Дотяжка и ход скипа в разгрузочных кривых в режиме 6 выполняются при подключенных статорах электродвигателей к сети 6 кВ 50 Гц и подключенных роторах к сопротивлениям первой ступени ПРКС.

7 режим - стопорение обеспечивается наложением механического тормоза ШПМ.

В режимах работы электропривода в цепи ротора электродвигателей включены сопротивления ПРКС, по которым протекает ток ротора, что приводит к потере мощности, которая тратится на нагрев сопротивлений. Эти потери мощности не создают полезной работы по подъему скипа и являются непроизводительными потерями электроэнергии. В 5 режиме при замедлении скипа с помощью СДТ происходит дополнительная потеря электроэнергии, которая непроизводительно тратится на нагрев электродвигателей.

С помощью ШПМ производится ежедневный осмотр ствола шахты и осмотр канатов ШПМ.

При осмотре ствола и канатов ШПМ работает в следующих режимах:

- 1) трогание;
- 2) движение с пониженной скоростью;
- 3) стопорение.

При осмотре ствола шахты и осмотре канатов действующий электропривод ШПМ работает с пониженными оборотами вала

электродвигателей за счет подключения к цепям ротора сопротивлений первой ступени ПРКС. При этом в сопротивлениях ПРКС выделяется значительная мощность, которая непроизводительно расходуется на нагрев роторных сопротивлений.

**Т а б л и ц а 2.2 - Усредненные значения технических параметров, характеризующих перечисленные режимы работы ШПМ за цикл осмотра**

Осмотр ствола шахты	Время	Путь	Средняя скорость	Усилие подъема скипа			Относит. усилие
				начало	конец	среднее	
	сек	м	м/сек	кН	кН	кН	о.е.
1. Трогание	1,60	0,32	0,20	230,59	230,58	230,59	1,01
2. Движение с пониженной скоростью	1777,60	533,28	0,30	177,55	154,05	165,80	0,73
3. Стопорение	0,08	0,40	5,00	-54,54	-54,55	-54,54	-0,24
4. Всего	1779,28	534,00					

## **2.2 Расчет непроизводительных потерь электроэнергии действующей ШПМ**

Расчет потерь электроэнергии при подъеме груза:

Для расчета непроизводительных затрат электроэнергии действующей ШПМ определены токи и напряжения в цепи ротора электродвигателей в режимах 1 — 7 электропривода, по значениям которых вычислены потери электроэнергии, затрачиваемые на нагрев роторных сопротивлений ПРКС (таблица 3). Расчеты выполнены при допущении о непрерывном изменении сопротивлений ПРКС в режиме разгона скипа 3.

Таблица 3 показывает, что за один цикл подъема скипа на непроизводительный нагрев роторных сопротивлений ПРКС затрачивается электроэнергия 12,9 кВт·час. Кроме этого на нагрев электродвигателей в режиме замедления скипа с помощью СДТ дополнительно затрачивается электроэнергия, которую можно ориентировочно определить по следующему соотношению

$$ПЭ_3 = 0,05 \cdot 2 \cdot P_H \cdot t_3 : 3600 = 0,05 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 8,45 : 3600 = 0,19 \text{ кВт} \cdot \text{час}.$$

Т а б л и ц а 2. 3 – Результаты расчетов

Подъем скипа	Время	Путь	Скорость (средняя)	Относ. усилие	Скольж ение	Мощность ротора×2	Энергия ротора×2
	сек	м	м/сек	о.е.	о.е.	кВт	кВт×час
1. Трогание	1,60	0,35	0,22	1,01	0,97	1649	0,7
2. Движение с пониженной скоростью	8,90	3,60	0,40	0,78	0,95	1245	3,1
3. Разгон	8,45	28,50	3,37	1,46	0,55	1349	3,2
4. Движение с максимальной скоростью	65,95	461,65	7,00	0,73	0,06	78	1,4
5. Замедление	8,45	33,50	3,97	-0,01	0,47	7	0,0
6. Дотяжка и ход в разгрузочных кривых	15,00	6,00	0,40	0,67	0,95	1066	4,4
7. Стопорение	0,08	0,40	5,00	-0,24	0,33	133	0,0
8. Всего	108,42	534,00					12,9

Таким образом, суммарные непроизводительные потери электроэнергии за один цикл подъема скипа составляют:

$$ПЭ_{ц} = 12,9 + 0,19 = 13,1 \text{ кВт·час}$$

Потери электроэнергии за один час работы ШПМ составляют величину:

$$ПЭ_{час} = 13,1 * 25 = 327,5 \text{ кВт·час}$$

Потери электроэнергии за день работы ШПМ (18 часов):

$$ПЭ_{день} = 327,5 * 18 = 5895 \text{ кВт·час}$$

Потери электроэнергии на одной ШПМ за год (350 рабочих дней):

$$ПЭ_{год} = 5895 * 350 = 2063250 \text{ кВт·час}$$

Согласно данных Таблицы 4 непроизводительные потери электроэнергии на нагрев роторных сопротивлений ПРКС за один прогон сосуда при осмотре ствола шахты и осмотре канатов составляет 580 кВт·час.

Потери электроэнергии за день работы ШПМ (4 прогона сосуда)

$$\text{ПЭ}_{\text{день}} = 580 * 4 = 2320 \text{ кВт·час.}$$

Потери электроэнергии на одной ШПМ за год (350 рабочих дней)

$$\text{ПЭ}_{\text{год}} = 2320 * 350 = 812000 \text{ кВт·час.}$$

Т а б л и ц а 2.4 - Результаты расчета потерь электроэнергии за один цикл осмотра

Осмотр ствола шахты	Время	Путь	Средняя скорость	Относит. усилие	Скольже ние	Мощнос ть ротора×2	Энерги я ротора ×2
	сек	м	м/сек	о.е.	о.е.	кВт	кВт×ч
1. Трогание	1,60	0,32	0,20	1,01	0,97	1654	1
2. Движение с пониженной скоростью	1777,60	533,28	0,30	0,73	0,96	1173	579
3. Стопорение	0,08	0,40	5,00	-0,24	0,33	133	0
4. Всего	1779,28	534,00					580

Суммарные годовые непроизводительные потери электроэнергии в действующем электроприводе ШПМ составляют величину

$$\text{ПЭ}_{\text{сум}} = 2063250 + 812000 = 2875250 \text{ кВт·час}$$

### 2.3 Снижение потерь электроэнергии при использовании электропривода с частотным преобразователем

Электропривод шахтной подъемной машины представляет собой частотно-регулируемый электропривод без датчика положения ротора с транзисторным преобразователем частоты (ПЧ), который устанавливается между ротором каждого электродвигателя и питающей сетью 6 кВ 50 Гц в дополнение к ПРКС и СДТ. Структурная схема электропривода ШПМ с преобразователями частоты в роторе электродвигателей показана на рисунке 2.9.

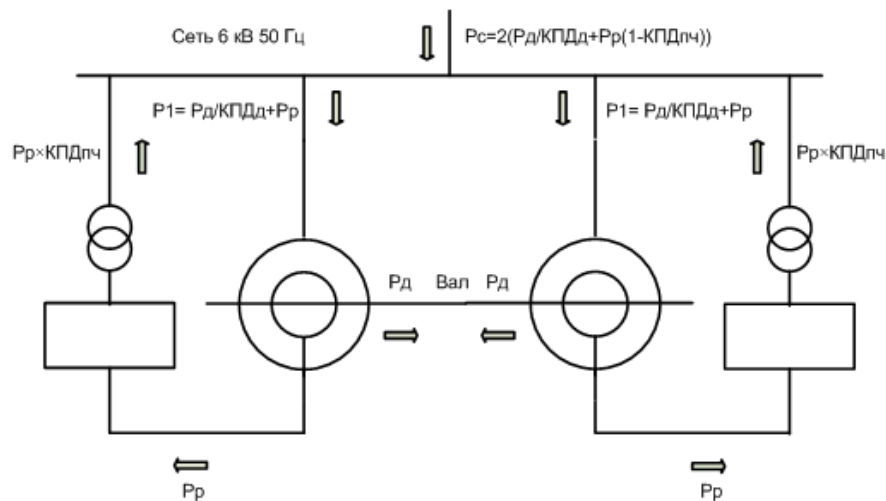


Рисунок 2.9 - Структурная схема электропривода ШПМ с преобразователями

При работе шахтной подъемной машины с электроприводом вся мощность скольжения ротора электродвигателей через преобразователь частоты возвращается в питающую сеть 6 кВ 50 Гц, а не затрачивается на нагрев роторных сопротивлений ПРКС и нагрев электродвигателя при работе СДТ.

Величину экономии электроэнергии при замене ПРКС и СДТ на электропривод можно определить вычтя из суммарных годовых непроизводительных потерь электроэнергии в действующем электроприводе ШПМ потери электроэнергии в самом преобразователе частоты при передаче мощности скольжения ротора электродвигателей в сеть. При КПД преобразователя частоты 97% экономия электроэнергии составит величину

$$\mathcal{E}_{пч} = \Pi \mathcal{E}_{сум} * 0,97 = 2875250 * 0,97 = 2788990 \text{ кВт} \cdot \text{час}$$

Кроме того, дополнительный экономический эффект будет достигнут за счет сокращения аварий и поломок оборудования ШПУ за счет использования высокоточного электропривода, который позволит производить плавный разгон и торможение с точным позиционированием скипа, что исключит удары скипа при ошибках оператора.

Рациональное электропотребление, а следовательно и энергосбережение, обеспечивается не только экономичностью использования электроэнергии потребителями (в частности, электроприводами), но и зависит от качества электроэнергии питающей сети.

Для трехпроводных сетей трехфазного тока нормируются допустимые значения отклонений напряжения и частоты, а также характеристики несимметрии напряжений промышленной частоты и несинусоидальности формы кривой напряжения.

Допустимое отклонение частоты, т.е. разность между ее текущим и номинальным значениями при медленном изменении, ограничивается значениями  $\pm 0,1$  Гц.

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

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

Степень влияния вентильных электроприводов на питающую сеть зависит от мощности источника питания, типа регулируемого электропривода и вентильного преобразователя, способа управления преобразователем и другими. Влияние различных типов асинхронных регулируемых вентильных электроприводов на питающую сеть и их энергетические показатели будут рассмотрены далее.

Приведенное выше сопоставление разных способов и систем управления асинхронными электроприводами позволяет наметить следующие направления снижения потребления энергии АД.

Первое направление связано со снижением потерь в электроприводе при выполнении им заданных технологических операций по заданным тахограммам и с определенным режимом погружения. Это электроприводы, работающие в пуско-тормозных режимах (краны, лифты, главные приводы слябингов и блюмингов, вспомогательные позиционные механизмы прокатных станов и т.д.) или длительных режимах с медленно изменяющейся нагрузкой (насосы, вентиляторы, компрессоры, транспортеры и т.д.). В таких электроприводах за счет снижения потерь электропривода в установившихся и переходных режимах возможна значительная экономия электроэнергии. В кинематически связанных электроприводах (рольганги, многодвигательные приводы тележек и т.д.) равномерное деление нагрузок между двигателями позволяет также минимизировать потери в них.



Второе направление связано с изменением технологического процесса на основе перехода к более совершенным способам регулирования электропривода и параметров этого технологического процесса. При этом происходит снижение потребления энергии электроприводом. В качестве примера можно привести электроприводы турбомеханизмов (насосов, вентиляторов, турбокомпрессоров), поршневых насосов и компрессоров, транспортеров, систем регулирования соотношения топливо — воздух и др. При этом, как правило, эффект не ограничивается экономией электроэнергии в электроприводе, во многих случаях возможна экономия ресурсов (воды, твердого и жидкого топлива и т.д.). Для обоих названных направлений характерным является то, что в них снижается потребление энергии именно в электроприводе: в первом случае за счет снижения потерь энергии, во втором за счет использования менее энергозатратного со стороны электропривода управления технологическим процессом.

Можно назвать и третье направление, обеспечивающее реализацию энергосберегающих технологий. Известно, что имеется ряд технологических процессов, где электропривод сравнительно небольшой мощности управляет потоком энергии, мощность которого в десятки и сотни раз превышает мощность электропривода. К таким объектам можно отнести дуговые сталеплавильные печи постоянного и переменного тока, вакуумные дуговые печи, рудо-восстановительные печи, установки индукционного нагрева и т.д. На них электроприводы мощностью в несколько киловатт могут управлять процессом, потребляющим десятки и даже сотни мегаватт. Очевидно, что от совершенства электропривода, его быстродействия и точности, степени автоматизации процесса во многом зависит эффективное использование таких значительных объемов энергии. Это направление не связано с уменьшением потока энергии через электропривод, чаще потребление энергии электроприводом даже увеличивается. Тем не менее, так как это направление связано со значительной экономией электроэнергии, рассмотрим его на примере дуговой сталеплавильной печи.

Сформулируем пути энергосбережения в асинхронном электроприводе.

В рамках первого направления для снижения потерь энергии в асинхронном электроприводе можно использовать следующие пути.

1. Обоснованный выбор установленной мощности двигателя, соответствующей реальным потребностям управляемого механизма. Эта задача связана с тем, что коэффициент загрузки многих двигателей составляет 50% и менее, что говорит либо о низкой квалификации разработчиков, либо о несовершенстве использованной методики расчета мощности электропривода. Очевидно, что двигатель заниженной мощности быстро выходит из строя из-за перегрева, а двигатель с большим запасом мощности преобразует энергию неэффективно, т.е. с высокими удельными потерями в самом двигателе из-за низкого КПД и в питающей сети из-за низкого коэффициента мощности. Поэтому первый путь заключается в совершенствовании методик выбора мощности

двигателя и проверки его по нагреванию, а также в повышении квалификации разработчиков, проектировщиков и обслуживающего персонала. На практике встречаются случаи, когда вышедший из строя двигатель заменяется подходящим по высоте вала или его диаметру, а не по мощности.

Существующие методики выбора мощности двигателя и проверки его по нагреванию могут рассматриваться лишь как первое приближение. Необходима разработка более совершенных методик, основанных на точном учете режимов работы электропривода, изменении его энергетических показателей, тепловых процессов в двигателе, состояния изоляции и т.д. Разумеется, это предполагает широкое использование вычислительной техники и специального программного обеспечения.

2. Переход на более экономичные двигатели, в которых за счет увеличения массы активных материалов (железа и меди), применения более совершенных материалов и технологий повышены номинальные значения КПД и коэффициента мощности. Этот путь, несмотря на высокую стоимость таких двигателей, становится очевидным, если учесть, что по данным западноевропейских экспертов, стоимость электроэнергии, потребляемой ежегодно средним двигателем, в 5 раз превосходит его стоимость. За время службы двигателя, а это десятки лет, экономия энергии значительно превысит капитальные затраты на такую модернизацию. Как уже отмечалось ранее, этот путь пока не получил должного признания в отечественной практике.

3. Переход к более совершенной с энергетической точки зрения системе электропривода. Потери энергии в переходных режимах заметно изменяются при использовании реостатного регулирования, систем ТПН—АД и ППЧ—АД с минимальными потерями при применении частотно-регулируемых электроприводов. Поэтому в рамках каждой из перечисленных систем имеются более или менее удачные в энергетическом и технологическом плане варианты. Задачей проектировщика является грамотный и всесторонне обоснованный выбор конкретного технического решения.

4. Использование специальных технических средств, обеспечивающих минимизацию потерь энергии в электроприводе. Так как значительная часть асинхронных электроприводов работает в условиях медленно изменяющейся нагрузки (электроприводы турбомеханизмов, конвейеров и т.д.), отклонение нагрузки электропривода от номинальной ухудшает энергетические показатели электропривода. В настоящее время к таким средствам можно отнести устройства регулирования напряжения на двигателе в соответствии с уровнем его нагрузки. Как правило, это либо специальные регуляторы напряжения на основе ТПН, включаемые между сетью и статором двигателя, либо преобразователи частоты, в которых предусмотрен так называемый режим энергосбережения. В первом случае ТПН выполняет кроме функции энергосбережения не менее важные функции

управления режимами пуска и торможения иногда регулирует скорость или момент, осуществляет защиту, диагностику, т. е. повышает технический уровень привода в целом. Во втором случае режим энергосбережения рассматривается как дополнительная опция преобразователя частоты и имеется лишь в некоторых выпускаемых типах преобразователей. С учетом многофункциональности применения такие устройства оказываются экономически целесообразными для приводов с изменяющейся нагрузкой даже при их относительно высокой стоимости.

5. Совершенствование алгоритмов управления электроприводом в системах ТПН—АД и ППЧ—АД на основе энергетических критериев оценки его качества, т.е. совершенствование известных решений, разработка эффективных технических средств для их осуществления и поиск новых решений, оптимальных в энергетическом смысле.

В рамках второго направления снижения потребления энергии решающее значение имеет переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому и повышение уровня автоматизации за счет включения в контур регулирования ряда технологических параметров (давления, расхода, температуры и т.д.). Так как это направление связано со снижением потребления энергии электроприводом за счет изменения технологического процесса, появляется возможность регулировать ранее не регулировавшиеся технологические параметры или изменять способ их регулирования.

Для третьего направления снижения потребления энергии характерны совершенствование системы электропривода в сочетании с автоматизацией технологического процесса и правильный выбор соответствующего по качеству регулирования электропривода из уже имеющихся или разработка новых, более качественных систем.

Заметим, что при реализации конкретных проектов выявляется, как правило, не один, а несколько возможных путей энергосбережения, поэтому для получения максимального эффекта необходим комплексный подход к решению задачи энергосбережения в электроприводе.

**Вывод:** Модернизация действующего электропривода ШПУ с использованием роторного частотного электропривода в рассматриваемом примере ШПУ позволит снизить потребление электроэнергии подъемной установкой до 30% и повысить производительность ШПУ на 10-12%. Для частотного управления каждым электродвигателем дополнительно введены роторные преобразователи частоты, которые подключаются к питающей сети 6 кВ 50 Гц через согласующие трансформаторы (Tr1, Tr2) и высоковольтные разъединители (BR2, BR3). Сделаны расчеты экономии электроэнергии после модернизации схемы, в результате показаны снижения потерь электроэнергии на 9,8%.

### 3 Электропривод с высоковольтным АД с фазным ротором

Высоковольтные электродвигатели с фазным ротором (АД ФР) обладают рядом превосходных качеств для применения в горно-добывающей отрасли, в частности, для управления шахтными подъемными машинами. Особое значение имеет высокий пусковой момент, почти достигающий опрокидывающего момента, а также возможность управления моментом электродвигателя при неподвижном вале и при малых скоростях вращения без датчика скорости (энкодера). Это свойство наиболее важно при модернизации электроприводов подъемных машин без замены работающих электродвигателей с фазным ротором, которые не имеют встроенного энкодера [14].

Для успешной конкуренции среди электроприводов шахтных подъемных машин частотно-регулируемый электропривод с высоковольтными АД ФР должен обладать рядом тактико-технических показателей, основными из которых являются [14]:

- а) Высокая управляемость моментом электродвигателя при нулевой скорости вала;
- б) Высокая управляемость моментом электродвигателя на малых скоростях вращения вала;
- в) Высокий пусковой момент электродвигателя для быстрого разгона сосуда ШПМ;
- г) Стабилизация скорости электродвигателя близкой с синхронной при меняющейся нагрузке;
- д) Замедление скорости электродвигателя с рекуперацией энергии с вала в питающую сеть;
- ж) Реверс направления вращения вала электродвигателя с минимальными задержками;
- з) Минимальные потери электроэнергии в элементах электропривода при работе ШПМ;
- к) Минимальное потребление реактивной мощности электроприводом или ее генерирование;
- л) Участие в предохранительном торможении ШПМ совместно с механическим тормозом;
- м) Минимальная стоимость и быстрая окупаемость затрат на электропривод.

Современные технологические установки и машины предъявляют самые разнообразные требования к качеству переходных процессов в электроприводе. Как правило, это требования к точности и быстродействию в позиционных электроприводах, формирование желаемой диаграммы скорости в системах регулирования скорости, формирование требуемой диаграммы крутящего момента двигателя в тяговых силовых установках и т.д. Кроме того, для всех этих устройств характерным является требование ограничения скорости и ее производных, момента двигателя и его производных,

максимальной мощности и т.д. Следовательно, из множества возможных траекторий движения электропривода необходимо выбирать такие, которые обеспечивают максимальное быстродействие, минимум потерь энергии и динамических нагрузок, максимум полезной работы с учетом существующих ограничений.

Очевидно, что использование неуправляемых переходных процессов пуска торможения электропривода дает ограниченный набор возможных траекторий движения, чаще всего не удовлетворяющих требованиям технологического процесса. Поэтому переход к регулируемому электроприводу с возможностью формирования управляемых переходных процессов является объективной необходимостью. Этот процесс перехода, обусловленный непрерывным повышением технического уровня средств управления электроприводом, позволяет не только удовлетворить все требования современных технологических установок, но и дает возможность оптимизировать потребление энергии электроприводом.

Самая общая постановка задачи оптимального управления электроприводом с учетом технологических требований хорошо известна и заключается в поиске экстремума некоторого обобщенного функционала, в который может входить большое число зачастую противоречивых показателей, в том числе энергетических. Решение этой задачи связано со значительными трудностями, прежде всего из-за того, что априори неизвестны весовые коэффициенты показателей, входящих в этот функционал. Кроме того, само решение этой задачи чрезвычайно громоздко и неоднозначно, так как связано с использованием методов классического вариационного исчисления, принципа максимума, метода динамического программирования и других методов оптимального управления, поэтому более известны частные решения задачи, например задача позиционирования с минимумом потерь в двигателе. Очень важно учитывать при переходе к регулируемому электроприводу следующие обстоятельства.

Во-первых, при переходе к регулируемому электроприводу экономия электроэнергии часто достигается не только и не столько за счет снижения потерь в самом электроприводе, но и за счет того технологического процесса, в котором участвует этот привод. При этом экономия энергии может многократно превосходить потребление электроэнергии собственно электроприводом. Так, повысив качество регулирования в электроприводах перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи мощностью в несколько киловатт, можно повысить эффективность использования энергии дуги мощностью в несколько мегаватт. Другой пример оптимизация нагрева заготовок в термических установках за счет регулирования скорости транспортера, подающего эти заготовки.

Во-вторых, для получения энергетического и технологического эффектов часто нужны изменения координат электропривода в очень небольших пределах при невысоких требованиях к качеству регулирования, что можно осуществить с помощью относительно простых технических

средств. Например, даже небольшое изменение скорости насоса водоснабжения дает ощутимую экономию электроэнергии и воды.

В-третьих, особенностью таких задач является отсутствие каких-либо универсальных решений, применимых для всех электроприводов и технологических процессов, поэтому для каждого конкретного объекта из множества возможных вариантов необходимо выбрать один — лучший в определенном смысле. Многое в принятии правильного решения зависит как от квалификации и опыта инженера, так и от умения комплексно подойти к решению этой задачи.

Рассмотрим варианты электропривода с АД ФР и транзисторными инверторами напряжения для управления ШПМ, а также проведем оценку их соответствия перечисленным выше требованиям.

### **3.1 Электропривод с подключением статора АД ФР к сети 6 кВ 50 Гц через контакторный реверсор и рекуперативным инвертором в роторе**

На первом этапе создания электропривода для ШПМ с высоковольтными АД ФР были разработаны электропривод с роторным рекуперативным преобразователем частоты, который устанавливается между обмоткой ротора электродвигателя и высоковольтной питающей сетью 6 кВ 50 Гц, а статор электродвигателя подключается к сети 6 кВ 50 Гц через контакторный реверсор, изменяющий порядок чередования фаз для реверса направления вращения вала АД ФР. Упрощенная однолинейная структурная схема силовых цепей такого электропривода показана на рисунке 3. 1.

Роторный преобразователь частоты содержит два транзисторных инвертора напряжения - сетевой и роторный, которые соединены последовательно. Трехфазный ввод сетевого инвертора подключен к низковольтным обмоткам согласующего трансформатора, а трехфазный ввод роторного инвертора - через контактные кольца к обмоткам ротора АД ФР. Вводы постоянного тока инверторов объединены и подключены к накопительному конденсатору С. В результате такого соединения образуется рекуперативный транзисторный инвертор напряжения, обеспечивающий двухсторонний обмен активной мощностью между ротором АД ФР и сетью с минимальными потерями передаваемой мощности скольжения. За счет регулирования амплитуды и частоты активного тока ротора регулируется момент и скорость вала АД ФР. Изменение направления потока активной мощности ротора АД ФР обеспечивает изменение знака момента, развиваемого электродвигателем, и перевод двигателя в генераторный режим и обратно в двигательный режим.

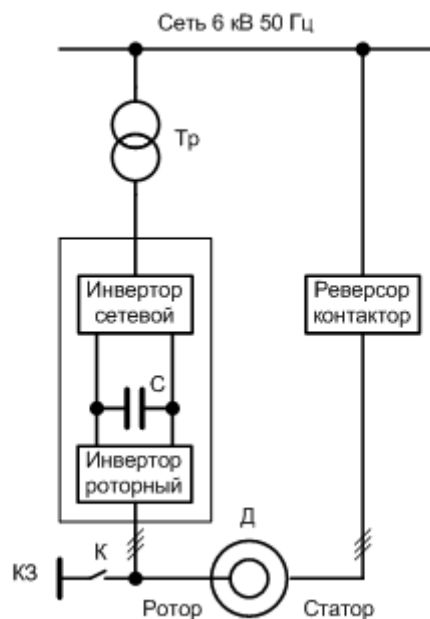


Рисунок 3.1 - Схема электропривода с подключением статора АД ФР к сети 6 кВ и низковольтным рекуперативным инвертором напряжения в роторе

Рассматриваемая структура электропривода (рисунок 3.1) позволяет полностью обеспечить тактико-технические показатели, перечисленные в пунктах 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9 и обеспечить достаточно высокие показатели, перечисленные в п.п. 4, 6 и 10. Причем высокие тактико-технические показатели электропривод обеспечивает без датчика положения вала электродвигателя, что важно при модернизации действующих электроприводов ШПМ без замены работающих электродвигателей АД ФР, не имеющих встроенных энкодеров.

Электропривод с преобразователем имеет несомненные достоинства перед традиционным электроприводом ШПМ с пусковой резисторно-контакторной станцией, но ему присущи и определенные недостатки. Так для выполнения требования п.п. 4 о достижении близкой к синхронной скорости вала необходима установка датчика положения вала (энкодера), что трудно реализуемо при модернизации действующих приводов с электродвигателями, не имеющими встроенных энкодеров. Без энкодера рассматриваемый электропривод с преобразователем частоты позволяет плавно регулировать скорость вала от нуля до 96% синхронной скорости и, при необходимости, «перескакивать» за синхронную скорость до 104% с возможностью последующего плавного повышения скорости. В диапазоне от 96% до 104% синхронной скорости регулирование скорости без энкодера невозможно. Для высоковольтных электродвигателей АД ФР с типовым значением номинального скольжения 1 - 2% невозможность регулировать скорость выше 96% приводит к снижению номинальной скорости подъемного сосуда на 2 - 3%, что является определенным недостатком, снижающим

производительность ШПМ. Частично этот недостаток устраняется при использовании замыкания роторной обмотки АД ФР накоротко контактором К после достижения скорости вала 96% синхронной скорости. Этот прием позволяет увеличить максимальную скорость вала электродвигателя до значения, близкого к номинальной скорости. Для плавного снижения скорости снимается закоротка ротора и производится «подхват» электродвигателя преобразователем без колебаний скорости и потери управляемости.

Выполнение требования пункта 6 о реверсе может быть выполнено роторным преобразователем без изменения порядка чередования фаз статора только в ограниченном диапазоне скоростей вала вблизи нулевой скорости АД ФР, например, для посадки клетки на кулаки. Полностью требование к реверсу направления вращения вала АД ФР с регулированием скорости до номинальной (п.п. 6 требований) в данном варианте выполняется изменением порядка чередования фаз высоковольтным контакторным реверсором в статоре с отключением двигателя от сети 6 кВ 50 Гц. Это приводит к задержке начала реверса после поступления команды минимум на 2 -3 секунды, что увеличивает время цикла ШПМ и является определенным недостатком электропривода.

Выполнение требования пункта 9 о участии электропривода в предохранительном торможении возможно при использовании специальных алгоритмов управления, обеспечивающих работу преобразователя при отключенной сети 6 кВ 50 Гц за счет энергии, возвращаемой с вала АД ФР, и питании системы управления роторным преобразователем частоты от «бесперебойника».

Требования пункта 10 о минимальной стоимости и быстрой окупаемости затрат на электропривод достаточно хорошо выполняются при применении преобразователя. Стоимость относительно низковольтных (традиционно до 1000 - 1200 В) роторных преобразователей ниже стоимости высоковольтных (6 кВ) преобразователей частоты для регулирования скорости высоковольтных электродвигателей по цепи статора с рекуперацией энергии в сеть. Относительно высокая стоимость преобразователя частоты типа по сравнению с обычными нерекуперативными низковольтными преобразователями частоты определяется наличием двух инверторов в роторе АД ФР (сетевого и роторного) на полную пусковую мощность электродвигателя АД ФР, что практически удваивает стоимость нерекуперативного низковольтного преобразователя частоты такой же мощности. Несмотря на это обеспечивается достаточно быстрая окупаемость частотно-регулируемого электропривода за счет снижения потребления электроэнергии и повышения производительности ШПМ в сравнении с традиционным электроприводом АД ФР с пусковой резисторно-контакторной станцией управления (ПРКС) и станцией динамического торможения (СДТ).



### 3.2 Электропривод с короткозамкнутым статором АД ФР и рекуперативным инвертором в роторе

Разработан второй вариант электропривода с высоковольтным АД ФР, который основан на использовании обращенного режима короткозамкнутого асинхронного электродвигателя, получающего питание со стороны относительно низковольтного фазного ротора при закороченном высоковольтном статоре. Упрощенная однолинейная структурная схема силовых цепей электропривода для АД ФР с короткозамкнутым статором показана на рисунке 3. 2.

В рассматриваемом варианте электропривода статор электродвигателя отключается от высоковольтной сети и закорачивается, а между относительно низковольтной обмоткой ротора АД ФР и низковольтной обмоткой согласующего трансформатора, подключенного к питающей сети 6 кВ 50 Гц, устанавливается низковольтный преобразователь частоты, условно названный (вторая модификация). Преобразователь содержит выпрямитель (В), роторный транзисторный инвертор и сетевой транзисторный инвертор напряжения (рекуператор). Выпрямитель и роторный инвертор напряжения выбираются на полную мощность электродвигателя (с учетом перегрузки при разгоне), а сетевой инвертор рассчитывается на рекуперацию в сеть активной мощности с вала электродвигателя в режиме рекуперативного торможения.

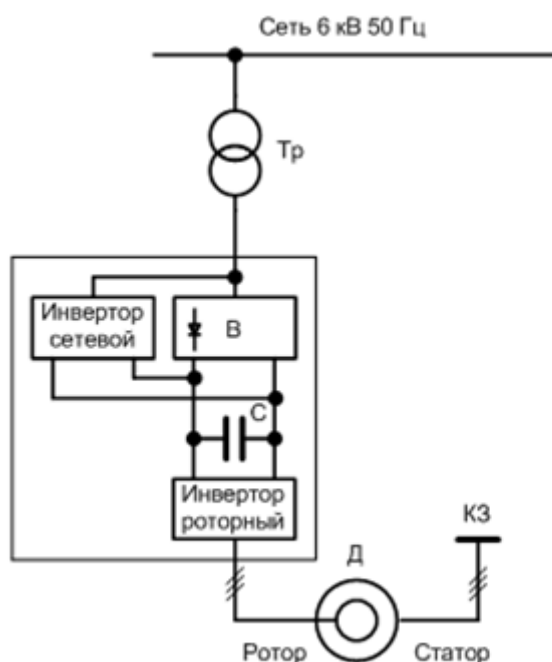


Рисунок 3.2 - Схема реверсивного электропривода с короткозамкнутым статором АД ФР и рекуперативным низковольтным инвертором в роторе

Электропривод с короткозамкнутым статором работает как классический частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением моментом короткозамкнутого асинхронного электродвигателя

со всеми его достоинствами и недостатками. Определенным ограничением в использовании такого режима питания АД ФР может явиться необходимость относительно небольшого снижения номинального момента и номинальной мощности электродвигателя из-за загрузки ротора реактивным током, на который обмотка ротора не рассчитана при питании статора АД ФР от сети 6 кВ 50 Гц. Однако это ограничение не существенно и может вообще не проявляться, поскольку мощность электродвигателя выбирается, как правило, с запасом и в обратном режиме ток статорной обмотки снижается на величину реактивного тока, что в целом сохраняет общий тепловой режим электродвигателя.

Рассмотрим соответствие тактико-технических показателей электропривода с короткозамкнутым статором АД ФР (рисунок 3.2) требованиям к тактико-техническим показателям электропривода ШПМ и сопоставим показатели данного варианта с показателями первого варианта электропривода:

1) требования п.п. 1 и 2 к электроприводу ШПМ о высокой управляемости моментом электродвигателя на нулевой и низкой скорости вала во втором варианте электропривода можно выполнить только при наличии высокоточного датчика положения вала электродвигателя (энкодера), что трудно реализуемо при модернизации электропривода с сохранением работающих электродвигателей АД ФР;

2) требования п.п. 3 и 4 о высоком пусковом моменте и достижении синхронной скорости АД ФР выполняются соответствующим выбором параметров силовых цепей и системы управления преобразователя частоты без ограничений;

3) требования п.п. 5 о рекуперации мощности с вала АД ФР в сеть в режимах торможения выполняются соответствующим выбором мощности сетевого инвертора в преобразователе 2;

4) реверс направления вращения вала (п.п. 6) выполняется преобразователем 2 без контакторного реверсора и без задержки времени;

5) требования п.п. 7, 8 о минимальном потреблении и потерях активной и реактивной мощности выполняются преобразователем частоты 2 без ограничений, поскольку через преобразователь передается с малыми потерями только мощность, поступающая на вал АД ФР, а реактивная мощность генерируется инверторами;

6) участие электропривода в предохранительном торможении (п.п. 9) возможно при использовании соответствующих алгоритмов управления, обеспечивающих работу электропривода за счет энергии, возвращаемой с вала АД ФР при торможении, и питании системы управления от «бесперебойника»;

7) стоимость преобразователя частоты 2, как правило, ниже стоимости преобразователя частоты 1 за счет возможности использования рекуператора меньшей мощности. Меньше и срок окупаемости затрат на электропривод,

поскольку эффект от использования частотно-регулируемого электропривода совпадает с первым вариантом. Остановимся на этом вопросе более подробно.

На скиповых подъемных установках рекуперированная с вала АД ФР в сеть мощность в режиме торможения при снижении скорости практически во всех режимах подъема существенно меньше мощности, передаваемой на вал в режимах повышения скорости электродвигателя. Поэтому мощность и стоимость сетевого инвертора (рекуператора) во втором варианте (рисунок 3.2) значительно меньше стоимости роторного инвертора и меньше стоимости рекуператора в первом варианте электропривода (рисунок 3.1). За счет этого общая стоимость преобразователя 2 для скипового подъема получается меньше стоимости преобразователя 1.

Для клетового подъема разница в мощности сетевых инверторов (рекуператоров) в первом и втором варианте электропривода (рис. 3.1 и рис.3.2) минимизируется из-за рекуперации большой мощности с вала АД ФР в сеть в режимах спуска грузов большой массы на максимальной скорости. При таких условиях работы клетового подъема стоимость преобразователей 1 и 2 практически совпадает. Однако анализ реальных режимов работы клетового подъема многих шахт показывает, что спуск грузов большой массы производится на малых скоростях, существенно меньших максимальной скорости подъема. Это позволяет существенно снизить мощность сетевого инвертора (рекуператора) во втором варианте электропривода (рис. 2) по сравнению с первым вариантом, что снижает стоимость преобразователя 1 в сравнении с преобразователем 2.

### **3.3 Электропривод с рекуперативным низковольтным инвертором в статоре АД ФР и рекуперативным низковольтным инвертором в роторе**

В этом варианте предложена к использованию на шахтных подъемных машинах третий вариант электропривода с высоковольтными АД ФР, основанный на установке низковольтных рекуперативных транзисторных инверторов напряжения в статор и ротор, которые переводят АД ФР в режим полностью управляемой машины двойного питания (МДП). Третий вариант электропривода с АД ФР совмещает в себе достоинства и устраняет недостатки первого и второго вариантов и позволяет обеспечить практически все требования к тактико-техническим показателям электропривода ШПМ без датчиков положения вала электродвигателей и без высоковольтных контакторных реверсоров в статоре АД ФР при минимальной стоимости преобразователя частоты. Упрощенная структурная схема силовых цепей третьего варианта электропривода с низковольтными инверторами в статоре и роторе АД ФР показана на рисунке 3.3.

Предлагаемый электропривод содержит низковольтный рекуперативный роторный инвертор напряжения, условно названный (третий вариант), и низковольтный рекуперативный статорный инвертор напряжения типа . Оба

преобразователя подключаются к общей низковольтной обмотке согласующего трансформатора или к различным низковольтным обмоткам. Такой вариант подключения АД ФР обеспечивает двойное питание электродвигателя от двух относительно низковольтных источников электроэнергии, регулирующих амплитуду и частоту напряжения и тока статора и ротора.

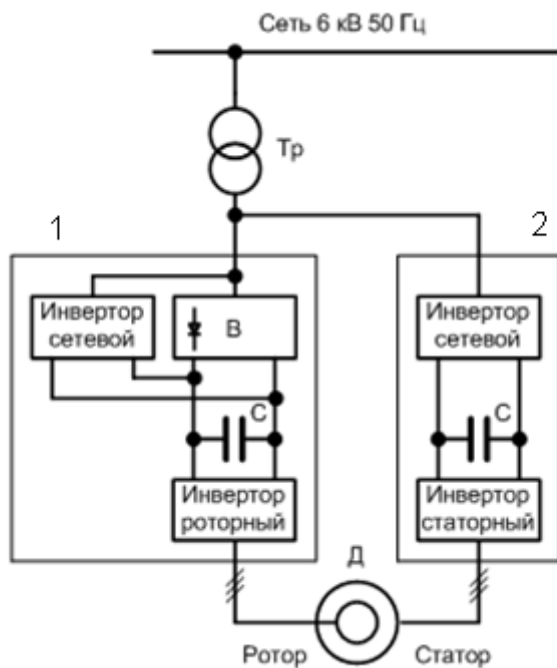


Рисунок 3.3 - Схема реверсивного электропривода с рекуперативным низковольтным инвертором в статоре АД ФР и рекуперативным низковольтным инвертором в роторе

Для управления АД ФР в режиме двойного питания от регулируемых низковольтных источников (рисунок 3.3) может быть использован следующий способ (рассматривается один из возможных вариантов):

1. При неподвижном вале АД ФР на обмотку статора от преобразователя подается низковольтное трехфазное напряжение, например, 600 В с частотой 5 Гц (10% номинального напряжения статора 6000 В 50 Гц). На обмотку ротора от преобразователя 1 подается также трехфазное низковольтное напряжение с действующим значением 10% напряжения холостого хода ротора также с частотой 5 Гц (10% напряжения ХХ ротора). Векторы напряжений статора и ротора вращаются в одном направлении.

2. Для начала вращения вала АД ФР система регулирования начинает снижать напряжение и частоту статорного преобразователя и повышать напряжение и частоту роторного преобразователя в режиме векторного управления. Момент двигателя и скорость вала за счет этого начинают увеличиваться.

3. При переходе статорного напряжения через нулевое значение в определенный момент времени статорный преобразователь изменяет порядок чередования фаз и начинает повышать амплитуду и частоту напряжения статора АД ФР. Роторный преобразователь продолжает повышать амплитуду и частоту напряжения ротора. Векторы потокосцеплений ротора и статора после реверса фаз статора начинают вращаться в противоположных направлениях, при этом скорость вращения вала равна сумме скоростей вращения векторов потокосцеплений статора и ротора.

4. При повышении напряжения статора до 600 В и его частоты до 5 Гц преобразователь 2 прекращает повышение амплитуды и частоты напряжения, подаваемого на обмотку статора. Роторный преобразователь 1 продолжает повышать амплитуду и частоту напряжения, подаваемого на обмотку ротора и доводит их значения до величин, обеспечивающих требуемую скорость вала. Например, при частоте поля ротора 45 Гц и частоте поля статора 5 Гц скорость вала будет соответствовать синхронной скорости электродвигателя, как при 50 Гц. При скорости поля ротора 50 Гц и статора 5 Гц скорость вала будет выше синхронной (соответствует 55 Гц).

5. Для снижения скорости до нуля процессы регулирования производятся в обратном порядке.

6. Для реверса направления вращения вала АД ФР нужно при нулевой скорости вала одновременно реверсировать порядок чередования фаз статора и ротора преобразователями 1 и 2 и повторить операции управления с п.п. 1 по п.п. 4. При этом вал электродвигателя будет вращаться в обратном направлении.

Рассмотрим вопросы передачи активной мощности в силовых цепях электропривода (рисунок 3.3) при регулировании скорости вала АД ФР по алгоритму, описанному выше:

1. При нулевой скорости и нулевом моменте двигателя (наложен механический тормоз на барабан ШПМ) преобразователи частоты создают только реактивный ток возбуждения АД ФР, который может быть распределен между обмоткой ротора и статора.

При отпуске тормоза к валу АД ФР приложится момент нагрузки, который может иметь как положительный знак, способствующий движению вала в направлении вращения поля двигателя, так и отрицательный знак, препятствующий движению вала в направлении вращения поля. Для сохранения нулевой скорости система регулирования должна обеспечить формирование момента АД ФР, совпадающего по величине и противоположного знака с моментом нагрузки. Для создания момента АД ФР определенного знака необходима передача активной мощности через воздушный зазор в определенном направлении.

При отрицательном моменте нагрузки активная мощность для создания положительного момента АД ФР будет передаваться по контуру от роторного преобразователя, через ротор, зазор, статор и рекуперативный статорный преобразователь к роторному. Из сети при этом потребляется только

мощность потерь в преобразователях и двигателе. В обмотках ротора и статора протекают токи, отличающиеся по величине пропорционально коэффициенту трансформации АД ФР, т.е. ток нагрузки статорного преобразователя в несколько раз меньше тока нагрузки роторного преобразователя.

При положительном моменте нагрузки для поддержания нулевой скорости вала система регулирования изменит направление потока активной мощности в контуре преобразователи - двигатель на противоположный.

2. Для повышения скорости вала АД ФР система регулирования увеличивает активный ток ротора и статора за счет увеличения напряжения ротора и снижения напряжения статора, что приводит к возрастанию момента АД ФР, и пропорционально повышает частоту напряжения обмотки ротора преобразователем и снижает частоту напряжения обмотки статора преобразователем. После возрастания момента двигателя выше момента нагрузки вал АД ФР начинает вращаться. При этом активная мощность ротора возрастает, а статора уменьшается. На вал электродвигателя поступает разность мощностей ротора и статора.

3. Одновременно с переходом частоты статорного преобразователя через нулевое значение и реверсом фаз статора изменяется направление потока мощности через преобразователь на противоположное, после чего активная мощность на вал АД ФР начинает поступать через обмотку ротора и обмотку статора, т.е. активные мощности статора и ротора суммируются и передаются на вал. Поскольку амплитуда и частота напряжений ротора и статора увеличиваются системой регулирования, активная мощность вала возрастает.

4. При достижении частоты напряжения статора 5 Гц поток активной мощности через статорный преобразователь 2 прекращает увеличиваться. Скорость вала продолжает увеличиваться за счет роста частоты и амплитуды напряжения ротора. При этом растет активная мощность, передаваемая на вал через роторный преобразователь.

5. При достижении частоты преобразователя 45 Гц вал АД ФР вращается с синхронной скоростью, соответствующей 50 Гц, поскольку частоты поля ротора и статора складываются. При этом активная мощность, передаваемая на вал АД ФР, делится между двумя преобразователями частоты - роторным и статорным. Через роторный ПЧ проходит 90% мощности, через статорный - 10% (при выбранных параметрах статорного ПЧ). Суммарная мощность, проходящая через два ПЧ не превышает мощность, передаваемую на вал АД ФР.

6. После достижения синхронной или номинальной скорости двигателя начинается подъем груза в режиме стабилизации скорости. При этом момент и мощность на валу АД ФР уменьшаются до величин, соответствующих нагрузке двигателя. Если момент нагрузки в течение всего подъема не меняет знак и препятствует подъему, то направления потоков мощности через преобразователи не меняется - мощность передается на вал. Если момент

нагрузки при подъеме на синхронной скорости изменит знак (например, в режиме перегона пустых скипов), то изменится направление потока активной мощности через двигатель и преобразователи 1 и 2 будут передавать активную мощность с вала в сеть. Сумарная мощность двух рекуператоров в третьем варианте привода (рисунок 3.3) равна рекуперированной с вала активной мощности.

7. При подходе поднимаемого сосуда к поверхности производится замедление. Замедление может производиться без изменения знака момента электродвигателя и с изменением знака момента. Если знак момента двигателя при замедлении положителен, поток мощности направлен из сети на вал АД ФР. При отрицательном замедляющем моменте АД ФР направления потоков мощности через преобразователи меняется на противоположный и работают рекуператоры обоих преобразователей - роторного и статорного. Например, при перегоне двух пустых скипов в режиме замедления через рекуператоры возвращается в сеть максимальная мощность. Но эта мощность в несколько раз меньше пусковой мощности рекуператора в первом варианте электропривода. Значит стоимость рекуператоров третьего варианта (рис. 3.3) в несколько раз меньше стоимости рекуператора в первом варианте привода (рис. 3.1) и не больше стоимости рекуператора во втором варианте электропривода (п.п. 2, рис. 2).

8. После замедления скорость вала АД ФР относительно небольшая, мощность вала также небольшая, поэтому через преобразователи передается относительно небольшая мощность, которая существенно меньше установленной мощности преобразователей в роторе и статоре. Направление передачи активной мощности в статоре и роторе зависит от знака момента на валу АД ФР.

9. После замедления скорости вала АД ФР до нуля одновременно производится реверс фаз напряжений ротора и статора преобразователями 1 и 2 с переходом частоты через нулевое значение с одинаковым темпом. После реверса фаз в роторе и статоре можно выполнять пуск двигателя с вращением вала в обратном направлении.

### **3.4 Машина двойного питания в частотно – регулируемом электроприводе шахтных подъемных установок**

Предложена также к использованию в шахтных подъемных машинах электропривод с низковольтными рекуперативными транзисторными инверторами напряжения в статоре и роторе электродвигателя, которые переводят АДФР режим полностью управляемой машины двойного питания (МДП). Такой электропривод обеспечивает управление ШПМ без датчиков положения вала электродвигателей, что важно при модернизации ШПМ без замены электродвигателей с фазным ротором, и без высоковольтных контакторных реверсоров в статоре АДФР.

На рисунке 3.4 показана упрощенная структурная схема силовых цепей электропривода МДП с транзисторными низковольтными рекуперативными инверторами напряжения (РИН) в статоре и роторе АДФР. Транзисторные преобразователи подключаются к различным низковольтным обмоткам согласующего трансформатора, или к общей низковольтной обмотке. Установка рекуперативных инверторов напряжения в статор и ротор АД ФР обеспечивает двойное питание электродвигателя от двух относительно низковольтных источников электроэнергии, регулирующих скорость электродвигателя путем изменения амплитуды и частоты напряжения и тока статора и ротора.

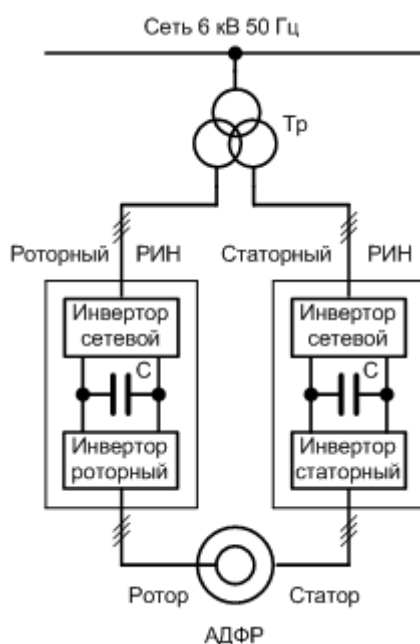


Рисунок 3.4 - Схема реверсивного электропривода с низковольтными транзисторными РИН в статоре и роторе АДФР

Для управления АДФР в режиме двойного питания от регулируемых низковольтных транзисторных инверторов напряжения было предложено использовать следующий алгоритм :

1. При неподвижном вале АДФР на обмотку статора от статорного преобразователя подается низковольтное трехфазное напряжение, например, 600 В с частотой 5 Гц (10% номинального напряжения статора 6000 В 50 Гц). На обмотку ротора от роторного преобразователя подается также трехфазное низковольтное напряжение с действующим значением 10% напряжения холостого хода ротора также с частотой 5 Гц (10% напряжения ХХ ротора). Векторы напряжений статора и ротора вращаются в одном направлении с одинаковой скоростью.

2. Для начала вращения вала АДФР система регулирования начинает снижать напряжение и частоту статорного преобразователя и повышать напряжение и частоту роторного преобразователя в режиме векторного



управления. Момент двигателя и скорость вала за счет этого начинают увеличиваться.

3. При переходе статорного напряжения через нулевое значение статорный преобразователь изменяет порядок чередования фаз и начинает повышать амплитуду и частоту напряжения статора АДФР. Роторный преобразователь продолжает повышать амплитуду и частоту напряжения ротора. Векторы потокосцеплений ротора и статора после реверса фаз статора начинают вращаться в противоположных направлениях, при этом скорость вращения вала равна сумме скоростей вращения векторов потокосцеплений статора и ротора.

4. При повышении напряжения статора до 600 В и его частоты до 5 Гц статорный преобразователь прекращает повышать амплитуду и частоту напряжения. Роторный преобразователь продолжает повышать амплитуду и частоту напряжения и доводит их до величин, обеспечивающих требуемую скорость вала. Например, при частоте поля ротора 45 Гц и частоте поля статора 5 Гц вал электродвигателя будет вращаться с номинальной скоростью. При скорости поля ротора 50 Гц и статора 5 Гц скорость вала будет выше синхронной (соответствует 55 Гц).

5. Для снижения скорости до нуля процессы регулирования производятся в обратном порядке.

6. Для реверса направления вращения вала АД ФР нужно при нулевой скорости вала одновременно реверсировать порядок чередования фаз статора и ротора двумя преобразователями и повторить операции управления с п.п. 1 по п.п. 4. При этом вал электродвигателя будет вращаться в обратном направлении.

Рассмотренные электропривод (рис. 3.4) и алгоритм позволяют:

- управлять моментом электродвигателя без датчика положения вала АДФР как при нулевой скорости, так и при регулировании скорости;
- увеличивать скорость вала как до номинальной скорости АДФР, так и до синхронной скорости, которая соответствует частоте сети 50 Гц, а также выше синхронной скорости;
- выполнять торможение электродвигателя с рекуперацией энергии движения в питающую сеть;
- изменять направление вращения вала АДФР (направление движения сосуда ШПМ) без контакторного реверсора в статоре электродвигателя и без задержки на его переключение.

Все перечисленное выше достигается за счет использования низковольтных преобразователей частоты в статоре и роторе АДФР, которые имеют меньшую стоимость по сравнению с высоковольтными (6 кВ) статорными преобразователями частоты. При этом суммарная мощность (и стоимость) двух преобразователей остается постоянной и перераспределяется между статорным и роторным преобразователями.

К недостаткам бездатчикового электропривода по схеме МДП с низковольтными РИН можно отнести сложность повышения максимального

напряжения статорного РИН выше 600В и соответствующей этому напряжению максимальной частоты выше 5 Гц. В предыдущей публикации о электроприводе ШПМ с приводными АДФР отмечалось, что цифровой бездатчиковый электропривод с АДФР не обеспечивает регулирование скорости в диапазоне частот  $\pm 2$  Гц вблизи синхронной скорости, что не позволяет достигнуть номинальной скорости АДФР. Поскольку в электроприводе МДП с транзисторными РИН (рис. 3.4) синхронная частота напряжения статора изменяется с 50 Гц до 5 Гц, то зона невозможного регулирования скорости АДФР в диапазоне  $\pm 2$  Гц также переносится в область низких частот относительно 5 Гц. Это приводит к трудностям регулирования малой скорости движения сосудов ШПМ при малых оборотах вала АДФР на втором и шестом участках тахограммы движения, а также при осмотрах ствола шахты. Для устранения этого недостатка необходимо применять электропривод с датчиком положения вала электродвигателя, что трудно выполнить при модернизации электропривода ШПМ с сохранением старых электродвигателей, либо необходимо повысить максимальную частоту статорного РИН до уровня 8 - 10 Гц, а его максимальное напряжение увеличить до уровня 960 — 1200В. Повышение частоты статорного РИН позволит разнести синхронную частоту (статора) и частоту ротора, соответствующую малой скорости движения сосудов ШПМ, на величину, превышающую 2 Гц, что позволит управлять малой скоростью АДФР без датчика положения вала. Однако, повышение напряжения статорного РИН до 1200В приведет к усложнению его структуры и существенному удорожанию.

Избежать перечисленных выше недостатков электропривода по схеме МДП с низковольтными преобразователями частоты в статоре и роторе АДФР без ухудшения качественных и стоимостных показателей можно путем замены статорного транзисторного инвертора напряжения на незаслуженно забытый в последние годы тиристорный непосредственный преобразователь частоты (с сохранением в роторе АДФР транзисторного рекуперативного инвертора напряжения). Структурная схема силовых цепей такого гибридного электропривода показана на рисунке 3.5.

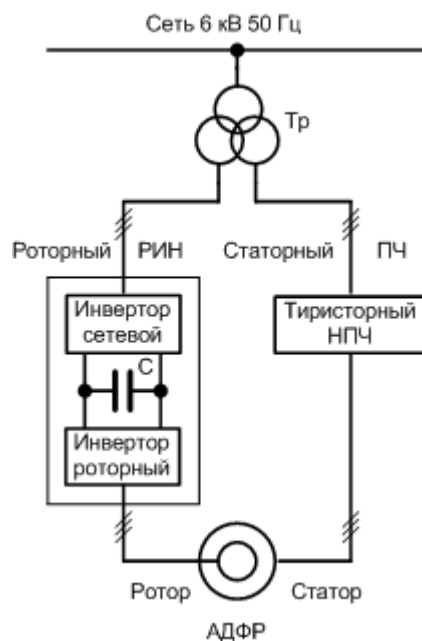


Рисунок 3.5 - Схема реверсивного электропривода с низковольтным тиристорным НПЧ в статоре и низковольтным транзисторным РИН в роторе АДФР

В электроприводе по схеме МДП (рис. 3.5) с низковольтным роторным транзисторным РИН и низковольтным статорным тиристорным НПЧ сохраняются все перечисленные выше достоинства реверсивного электропривода, которые обеспечивают высокие энергетические и динамические показатели электропривода ШПМ.

Тиристорный НПЧ в статоре АДФР по схеме МДП (рис. 3.5) должен регулировать частоту напряжения статора в диапазоне не более  $\pm 10\text{Гц}$  с реверсом порядка чередования фаз при переходе через нулевую частоту, что обеспечивает даже маловентильная 18-ти тиристорная схема трехфазного НПЧ.

Тиристорный НПЧ автоматически изменяет направления потока активной мощности в цепи статора АДФР, что обеспечивает тормозной режим электропривода с рекуперацией энергии движения в сеть.

Тиристорный НПЧ имеет меньшую стоимость, чем транзисторный РИН такой же мощности.

Даже маловентильная 18-ти тиристорная схема НПЧ может быть выполнена на выходное линейное напряжение до 1200В и выходную частоту до 10Гц. В электроприводе МДП с таким статорным НПЧ мощность и максимальное напряжение роторного транзисторного РИН будут снижены на 20% (по сравнению с подключением статора АДФР к сети 6 Кв), что может привести к упрощению силовой схемы роторного РИН и снизит его стоимость.

На рисунке 3.6 изображена упрощенная принципиальная схема силовых цепей МДП с 18-ти тиристорным НПЧ в статоре и транзисторным РИН в

роторе АДФР. Приведенная на рис. 3 схема позволяет управлять скоростью АДФР с напряжением ротора до 820В. Для управления АДФР с напряжением ротора более 820В необходимо применять более сложные силовые схемы роторного РИН.

Рассмотрим вопросы передачи активной мощности в силовых цепях электропривода ШПМ по схеме МДП (рис. 3.5, рис. 3.6) при регулировании скорости вала АД ФР:

1. При нулевой скорости и нулевом моменте двигателя (наложен механический тормоз на барабан ШПМ) преобразователи частоты создают только реактивный ток возбуждения АД ФР, который может быть распределен между обмоткой ротора и статора.

При отпуске тормоза к валу АД ФР приложится момент нагрузки, который может иметь как положительный знак, способствующий движению вала в направлении вращения поля двигателя, так и отрицательный знак, препятствующий движению вала в направлении вращения поля. Для сохранения нулевой скорости система регулирования должна обеспечить формирование момента АД ФР, совпадающего по величине и противоположного знака с моментом нагрузки. Для создания момента АД ФР определенного знака необходима передача активной мощности через воздушный зазор в определенном направлении.

При отрицательном моменте нагрузки активная мощность для создания положительного момента АД ФР будет передаваться по контуру от роторного РИН, через ротор, зазор, статор, статорный НПЧ и трансформатор к роторному РИН. Из сети при этом потребляется только мощность потерь в преобразователях и двигателе. В обмотках ротора и статора протекают токи, отличающиеся по величине пропорционально коэффициенту трансформации АД ФР, т.е. ток нагрузки статорного преобразователя в несколько раз меньше тока нагрузки роторного преобразователя.

При положительном моменте нагрузки для поддержания нулевой скорости вала система регулирования изменит направление потока активной мощности в контуре преобразователя - двигатель на противоположный.

2. Для повышения скорости вала АД ФР система регулирования увеличивает активный ток ротора и статора за счет увеличения напряжения ротора и снижения напряжения статора и пропорционально повышает частоту напряжения обмотки ротора роторным РИН и снижает частоту напряжения обмотки статора с помощью НПЧ, что приводит к возрастанию момента АДФР. После возрастания момента двигателя выше момента нагрузки вал АДФР начинает вращаться. При этом активная мощность ротора возрастает, а статора уменьшается. На вал электродвигателя поступает разность мощностей ротора и статора.

3. Одновременно с переходом частоты статорного НПЧ через нулевое значение и реверсом фаз статора изменяется направление потока мощности через НПЧ на противоположное, после чего активная мощность на вал АД ФР начинает поступать через обмотку ротора и обмотку статора, т.е. активные

мощности статора и ротора суммируются и передаются на вал. Поскольку амплитуда и частота напряжений ротора и статора увеличиваются системой регулирования, скорость вала и активная мощность вала возрастает.

4. При достижении частоты напряжения статора, например, 10 Гц, а его действующего значения 1200В, дальнейшее их увеличение прекращается и поток активной мощности через статорный ПЧ прекращает увеличиваться. Скорость вала продолжает увеличиваться за счет роста частоты и амплитуды напряжения ротора с помощью роторного РИН. При этом растет активная мощность, передаваемая на вал через роторный преобразователь.

5. При достижении частоты роторного преобразователя 40 Гц вал АДФР вращается с номинальной скоростью электродвигателя, соответствующей 50 Гц, поскольку частоты поля ротора (40 Гц) и статора (10 Гц) складываются. При этом активная мощность, передаваемая на вал АДФР, делится между двумя преобразователями частоты - роторным и статорным. Через роторный ПЧ проходит 80% мощности, через статорный - 20% (при выбранных параметрах статорного ПЧ). Суммарная мощность, проходящая через два ПЧ не превышает мощность, передаваемую на вал АДФР (без учета потерь).

6. После достижения номинальной скорости двигателя начинается подъем груза ШПМ в режиме стабилизации скорости (четвертый участок тахограммы подъема). При этом момент и мощность на валу АДФР уменьшаются до величин, соответствующих статической нагрузке двигателя. Если момент нагрузки в течение всего подъема не меняет знак и препятствует подъему, то направления потоков мощности через преобразователи не меняется - мощность передается на вал. Если момент нагрузки при подъеме изменит знак (например, в режиме перегона пустых скипов), то изменится направление потока активной мощности через двигатель и преобразователи будут передавать активную мощность с вала АДФР в сеть.

7. При подходе поднимаемого сосуда к поверхности производится замедление. Замедление может производиться без изменения знака момента электродвигателя и с изменением знака момента. Если знак момента двигателя при замедлении положителен, поток мощности направлен из сети на вал АДФР. При отрицательном замедляющем моменте АДФР направления потоков мощности через преобразователи меняется на противоположный.

8. После замедления скорость вала АДФР на шестом участке тахограммы подъема относительно небольшая, мощность вала также небольшая, поэтому через преобразователи передается относительно небольшая мощность, которая существенно меньше установленной мощности преобразователей в роторе и статоре. Направление передачи активной мощности в статоре и роторе зависит от знака момента на валу АДФР.

9. После снижения скорости вала АДФР до нуля производится реверс фаз напряжений ротора и статора преобразователями с переходом частоты через нулевое значение. После реверса фаз в роторе и статоре можно выполнять пуск двигателя с вращением вала в обратном направлении без

контакторного реверсора в статоре АДФР. Реверс направления движения ШПМ без контакторного реверсора в статоре уменьшает время цикла ШПМ.

Таким образом, применение машины двойного питания с приводным АДФР и низковольтными тиристорным НПЧ в статоре и транзисторным рекуперативным инвертором напряжения в роторе позволяет создать электропривод шахтной подъемной машины с высокими энергетическими и динамическими показателями при минимальных стоимостных показателях оборудования.

**Вывод:** Предложены варианты электропривода с АД ФР и транзисторными инверторами напряжения для управления ШПМ и проведена оценка соответствия с необходимыми требованиями.

Рассматриваемый в этом варианте электропривода с подключением статора АД ФР к сети 6кВ 50 Гц через контакторный реверсор и рекуперативным инвертором в роторе является несомненно прогрессивным шагом в разработке частотно-регулируемых электроприводов для шахтных подъемных машин.

Единственным существенным ограничением для применения этого варианта электропривода с короткозамкнутым статорм АД ФР и рекуперативным инвертором в роторе является необходимость установки высокоточного датчика положения вала электродвигателя, что вызывает наибольшие трудности при модернизации электроприводов ШПМ с сохранением работающих высоковольтных АД ФР, не имеющих встроенных энкодеров.

Описание третьего варианта - электропривода с рекуперативным низковольтным инвертором в статоре АД ФР и рекуперативным низковольтным инвертором в роторе позволяет сделать вывод о его соответствии всем тактико-техническим требованиям, предъявляемым к электроприводу шахтных подъемных машин, без датчика положения вала (энкодера) и без высоковольтных контакторных реверсоров в статоре при минимальной стоимости преобразователя частоты, которая определяется только активной мощностью, передаваемой на вал и с вала электродвигателя, т.е. используется только на выполнение полезной работы по перемещению грузов.

В последнем рассмотрен вариант применения машины двойного питания (МДП) в электроприводе шахтной подъемной машины (ШПМ) с низковольтным тиристорным преобразователем частоты с непосредственной связью (НПЧ) в статоре и транзисторным рекуперативным инвертором напряжения (РИН) в роторе асинхронного электродвигателя с фазным ротором.

## Заключение

Итак, в ходе исследования системы электропривода шахтной подъемной установки было рассмотрено решение проблемы энергосбережения, обусловленная ростом потребления электроэнергии в промышленности и в быту и связанной с ним необходимостью строительства и ввода в эксплуатацию большей мощности.

Среди потребителей электроэнергии преобладают электромеханические преобразователи, то есть главным путем решения проблемы энергосбережения является внедрение во все отрасли промышленности систем регулируемого электропривода, так как они наиболее эффективные технологии. По статистике внедрение регулируемого ЭП в промышленность, энергетику, в бытовую и другие отрасли может обеспечить экономию до 40 млрд. кВтчас электроэнергии каждый год [8].

В данной диссертационной работе на примере электропривода ШПМ типа НКМЗ 2Ц-5\*2,3 рассмотрена модернизация схемы с применением роторных преобразователей частоты, что привело к снижению потерь на 9,8% и повышению энергоэффективности. Также построена математическая модель ЧРАД, где использована модель обобщенной машины в синхронной системе координат  $u, v$ . По системе координат  $u, v$  можно изменять во времени, независимо друг от друга, амплитуду фазного напряжения и частоту преобразователя.

В заключительной главе предложены варианты применения электроприводов:

- а) с АД ФР и транзисторными инверторами напряжения;
- б) с подключением статора АД ФР к сети 6кВ 50 Гц через контакторный реверсор и рекуперативным инвертором в роторе;
- в) с короткозамкнутым статором АД ФР и рекуперативным инвертором в роторе;
- г) с рекуперативным низковольтным инвертором в статоре АД ФР и рекуперативным низковольтным инвертором в роторе;
- д) машины двойного питания (МДП) в электроприводе шахтной подъемной машины.

## Список литературы

- 1) И.Я.Браславский, З.Ш.Ишматов, В.Н.Поляков. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – Москва: Asadema, 2004г.
- 2) Народицкий А.Г. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – Москва, 2004г.
- 3) Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов. М.И.Аксенов, А.И.Нитиевская, Г.Б.Онищенко. – М.:Наука, 2001г.
- 4) Копылов И.П. Электрические машины, часть 1. – Москва, 1986г.
- 5) Афонин В. И. Современные системы регулируемого лифтового привода // Тр. двенадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». — Екатеринбург, 2001. — С. 165—168.
- 6) Афонин В. И., Смерженков Г. В., Фу мм Г. Я. Асинхронные двигатели регулируемых приводов лифтов // Тр. двенадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». — Екатеринбург, 2001.-С. 31-34.
- 7) Браславский И. Я. О снижении энергопотребления асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения// Электричество. - 1988. - № 11. - С. 58-60.
- 8) Браславский И. Я. О возможностях энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов.- Электротехника. - 1998. -№ 8. - С. 2-5.
- 9) Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. — М.: Энергия, 1977. — 128 с.
- 10) Жемеров Г. Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. — М.: Энергия, 1977. — 280 с.
- 11) Ильинский Н. Ф. Основы электропривода: Учеб. пособие для вузов. — М.: МЭИ, 2000. - 164 с.
- 12) Шрейнер Р. Т., Поляков В. Н. К расчету оптимального по минимуму потерь закона частотного управления асинхронным электродвигателем // Асинхронный тиристорный электропривод. — Свердловск: УПИ, 1971. С. 96-98.
- 13) <http://sibac.info>
- 14) <http://erasib.ru>
- 15) Баклин В.С., Гимпельс А.С. Математическая модель частотно-регулируемого АД Известия ТПУ, 20005г.