

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Факультет «Энергетический»  
Кафедра «Теоретические основы электротехники»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, заместитель генерального  
директора по техническим вопросам

ПСК «Алмаз»

Олег Викторович Таран

\_\_\_\_\_ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н.

Сергей Анатольевич Ганджа

\_\_\_\_\_ 2019 г.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАНСМИССИЯ ГРУЗОВОГО  
АВТОМОБИЛЯ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР

Руководитель проекта доц., к.т.н.  
Виктор Иванович Смолин

\_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор проекта  
студент группы П-474  
Смирнов Алексей Юрьевич

\_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер, доц., к.т.н.  
Виктор Иванович Смолин

\_\_\_\_\_ 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

Смирнов А. Ю. Электромеханическая трансмиссия грузового автомобиля. – Челябинск: ЮУрГУ, П, П-474; 2019, 55 с., 23 ил., 5 табл., библиогр. список – 27 наим.

Целью выпускной квалификационной работы является повышение энергетической эффективности многозвенной силовой цепи тягового электропривода большегрузных автомобилей типа карьерный самосвал.

В ВКР рассмотрены классификация, назначение и область применения, а так же схемы исполнительных устройств тягового электропривода. Разработана энергоэффективная система управления тяговым электроприводом электромеханической трансмиссии.

Произведён выбор функциональной схемы тягового электропривода, основных элементов силовой цепи карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн, такие как дизель – генераторная установка, тяговые асинхронные машины, тяговый электрический генератор, инвертор.

|                   |             |                 |                |             |                                     |                              |             |               |
|-------------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|------------------------------|-------------|---------------|
|                   |             |                 |                |             | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b>     |                              |             |               |
| <i>Изм.</i>       | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                     |                              |             |               |
| <i>Зав кафедр</i> |             | <i>Ганджа</i>   |                |             | <b>ЭМТ грузового<br/>автомобиля</b> | <i>Лит.</i>                  | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Нормоконтр</i> |             | <i>СМОЛИН</i>   |                |             |                                     |                              | 6           | 55            |
| <i>Руководит</i>  |             | <i>СМОЛИН</i>   |                |             |                                     | <b>ЮУрГУ Кафедра<br/>ТОЭ</b> |             |               |
| <i>Разработал</i> |             |                 |                |             |                                     |                              |             |               |
| <i>Утв.</i>       |             | <i>СМОЛИН</i>   |                |             |                                     |                              |             |               |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 4  |
| 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ: УСТРОЙСТВО<br>ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ<br>АВТОМОБИЛЕЙ .....       | 5  |
| 1.1 Устройство электромеханической трансмиссии .....  | 6  |
| 1.2 Обусловленность выбора ЭМТ для установки на карьерные самосвалы.....  | 8  |
| 1.3 Преимущества и недостатки ЭМТ .....   | 11 |
| 1.4 Звенья ЭМ трансмиссии. Дизельный двигатель.....   | 12 |
| 1.5 Электрический генератор.....  | 17 |
| 1.6 Выпрямитель .....   | 20 |
| 1.7 Конвертор .....   | 24 |
| 1.8 Инвертор .....  | 27 |
| 1.9 Электрический двигатель.....  | 30 |
| 2 ВЫБОР СИЛОВЫХ ЗВЕНЬЕВ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО<br>ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....  | 33 |
| 2.1 Выбор асинхронных тяговых машин электромеханической трансмиссии ...   | 33 |
| 2.2 Выбор редуктора.....  | 36 |
| 2.3 Выбор дизель – генераторной установки .....   | 37 |
| 2.4 Выбор инвертора.....  | 39 |
| 3 РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ<br>ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ<br>ТРАНСМИССИИ. .... | 41 |
| 3.1 Двухконтурная система управления инвертором.....  | 43 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 48 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....  | 49 |

|      |      |          |         |      |                                 |  |  |  |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|--|--|--|------|
|      |      |          |         |      |                                 |  |  |  | Лист |
|      |      |          |         |      |                                 |  |  |  | 3    |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> |  |  |  |      |

## ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий тяговый электрически привод совершил огромный прорыв и продолжает развиваться. Это связано с повышением технико – экономических требований к транспортным средствам. Механическую и гидромеханическую трансмиссию все чаще заменяют электрической трансмиссией. Особенности условий эксплуатации и режимов работы грузового автомобиля, позволяют отдавать предпочтения в пользу выбора оснащения его электромеханической трансмиссией.

Актуальность данной темы заключается в необходимости повышения энергоэффективности ЭМТ транспортных средств, в связи с ростом технических требований к изделиям автомобильной электроники с течением времени. Повышение суммарного КПД всей системы может достигаться как выбором оптимальных материалов изделий, так и созданием эффективных алгоритмов работы каждой составляющей ЭМТ и всей системы в целом. Разработка новых алгоритмов управления является наиболее экономически выгодным направлением повышения энергоэффективности, так как не требует значительных изменений в конструкции электромеханической трансмиссии. В настоящее время, недостаточная энергоэффективность управления электроприводом обуславливается несовершенством алгоритмов.

Целью выпускной квалификационной работы является повышение энергетической эффективности многозвенной силовой цепи тягового электропривода большегрузных автомобилей типа карьерный самосвал.

|             |             |                 |                |             |                                 |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---------------------------------|-------------|
|             |             |                 |                |             | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                 | 4           |

# 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ: УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Электропривод определяется как электромеханическая система, которая состоит из преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих, информационных и измерительных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса, согласно ГОСТ Р 50369-92 [1].

Тяговый электропривод нашел широкое применение в различном наземном транспорте. Городские автобусы, железнодорожные составы и конечно промышленный транспорт все чаще встречаются на ЭМТ. Многие мировые производители отдают предпочтение электромеханической трансмиссии в борьбе за высокие технико – экономические показатели. Периодически проходящие выставки в области электромеханической трансмиссий не оставляют сомнений в совершенствовании и развитии данного направления. В сегменте карьерных самосвалов на данный момент можно выделить таких зарубежных производителей как Caterpillar, Komatsu, Libher, Hitachi и БелАЗ. Все производители применяют собственные разработки и производят компоненты комплекта тягового электрооборудования. Своими КТЭО ЭМТ переменного тока они оснащают машины грузоподъемностью от 90 до 420 тонн. Но стоит заметить, что в области карьерных самосвалов имеется тенденция перехода на ЭМТ взамен гидромеханической трансмиссии и на самосвалах меньшей грузоподъемности 35 -75 тонн. В России разработки и производство машин на ТЭП несколько отстают от зарубежных производителей [2]. Можно выделить такого производителя как «РУСЭЛПРОМ», ведущий в России

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 5    |

разработчик, производитель и поставщик электрических машин для всех отраслей промышленности и сельского хозяйства. Всех производителей объединяет одна цель - повышение производительности, экономия топлива, сокращение затрат на обслуживание и ремонт.

### 1.1 Устройство электромеханической трансмиссии

Электромеханическая трансмиссия это многозвенная система преобразования энергии (см.рис.1.1). В начале, химическая энергия топлива преобразуется в механическую энергию двигателя, затем в генераторе механическая энергия преобразуется в электрическую, и после энергия снова преобразуется в механическую - в энергию тяговых двигателей. Такое многократное преобразование энергии сопровождается определенными потерями энергии и снижением КПД, однако, даже эти потери зачастую ниже чем в механической трансмиссии [3].

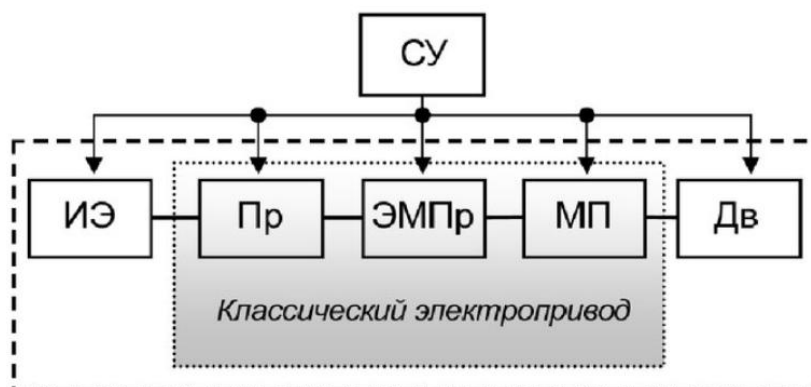


Рисунок 1.1 - Структурная схема тягового электропривода: СУ – система управления; ИЭ – источник энергии; Пр – преобразователь; ЭМПр – электромеханический преобразователь (тяговый двигатель); МП – механическая передача; Дв – движимое устройство (рабочий орган).

ЭМТ трансмиссия обладает рядом неоспоримых достоинств. В первую очередь, подводить энергию к электродвигателю значительно проще, используются провода. В механической же трансмиссии от силовой установки к ведущему колесу энергия подводится посредством различных механических

передач. Электрические двигатели в сравнении с ДВС имеют приближенную к идеальной характеристику изменения крутящего момента в зависимости от частоты вращения вала (якоря). При увеличении или уменьшении частоты вращения вала, крутящий момент изменяется обратно пропорционально. Как следствие, произведение крутящего момента на частоту вращения остается постоянным и равным мощности двигателя. Получается, что электродвигатель является автоматической трансмиссией самостоятельно подстраивающейся под величину крутящего момента на колесах. Если нагрузка возросла, скорость снизится, а крутящий момент вырастет. Но все же, для обеспечения автомобиля широким интервалом тяговых усилий необходимо либо применение дорогостоящего электрического двигателя, либо дополнительной механической трансмиссии.

Основными элементами электрической трансмиссии являются генератор, приводимый в действие двигателем внутреннего сгорания, и электрические двигатели, расположенные непосредственно в ведущих колесах автомобиля. Достоинством данного вида трансмиссии является то, что генератор и тяговые электродвигатели могут устанавливаться в любом месте, диктуемом компоновкой автомобиля, при этом связь между ними поддерживается с помощью электрических проводов, которые можно проложить как угодно и где угодно, без ущерба внутреннему объему автомобиля. Тем не менее, в таком упрощенном виде электрическая трансмиссия применяется редко. Чаще для увеличения крутящего момента в трансмиссию вводятся элементы механической трансмиссии. В таких случаях применяется один тяговый двигатель, а мощность к ведущим колесам передается посредством механических элементов – карданных передач и ведущих мостов. При установке тяговых электродвигателей непосредственно в колесах автомобиля используют планетарные зубчатые редукторы с передаточным числом от 15 до 40. Колесо с электродвигателем и колесным редуктором называется электромотор-колесо.

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 7    |

## 1.2 Обусловленность выбора ЭМТ для установки на карьерные самосвалы

С 1968 года большие карьерные самосвалы комплектуются электромеханической трансмиссией. При большой мощности ЭМТ является более надежным вариантом с КПД и ресурсом узлов выше, чем у гидромеханической трансмиссии. Если самосвал большой массы оборудовать механическими тормозами, то они будут иметь малый ресурс, с учетом необходимости частых затяжных спусков данной техники. При ЭМТ все решается просто, энергия торможения рассеивается в тормозных резисторах.

Изначально самосвалы выпускали на базе двигателей постоянного тока, такой тип трансмиссии все еще выпускается. Примером может служить дизель – электрический трактор ДЭТ – 250. Данный трактор был первым в СССР трактором с ЭМТ и выпускается до сих пор на Челябинском тракторном заводе ЧМЗ в модификации ДЭТ – 320. ЭМ трансмиссия трактора обусловила ряд особенностей: слишком большую массу (31 тонна против 42 тонн у трактора [Т-330](#) аналогичного тягового класса, но с гидромеханической трансмиссией), низкий КПД, необходимость применения сложной системы охлаждения электрических машин. В то же время, при эксплуатации трактора в холодных климатических зонах России электромеханическая трансмиссия имеет преимущества перед гидромеханической. Трансмиссия на двигателях постоянного тока не является надежной, так как щёточно - коллекторный узел двигателя постоянного тока имеет сравнительно небольшой ресурс и требует сложного обслуживания. В последние десятилетия осуществляется массовый переход на трансмиссию с двигателями переменного тока с частотными преобразователями, имеющую более высокую итоговую надежность. Для тягового электропривода можно выделить типичную структуру (см.рис.1.2).

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 8    |



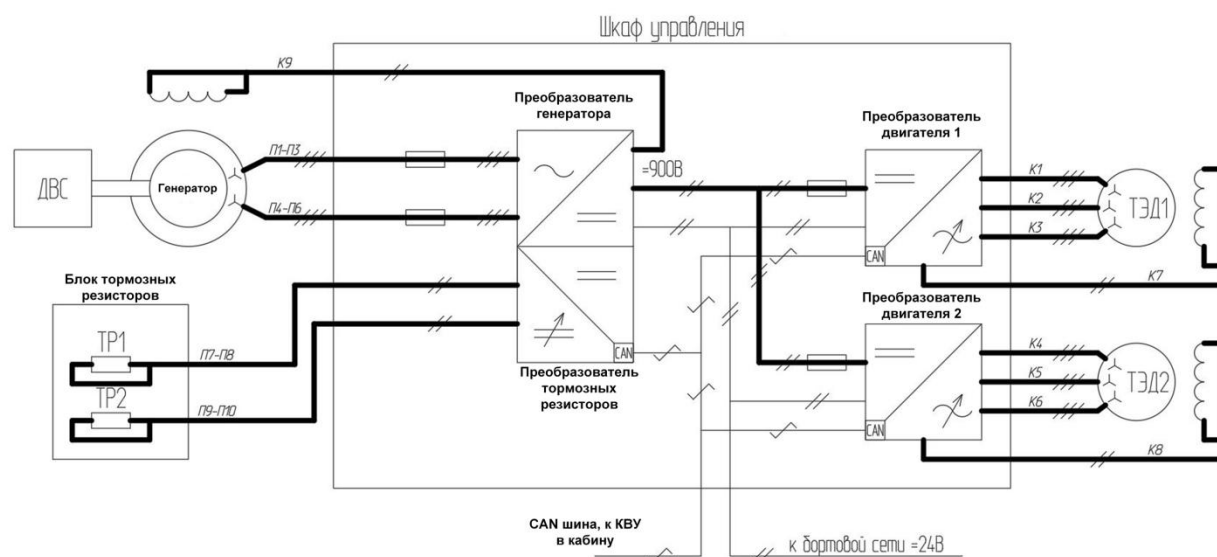


Рисунок 1.2 - Структура электротяги переменного тока.

ДВС, на основе дизельного двигателя вращает вал генератора, который вырабатывает электроэнергию. Генератор, как правило, на основе синхронной, или асинхронной машины. Вырабатываемая энергия из генератора поступает в выпрямитель, который из переменного тока преобразует ее в постоянный.

В случае синхронного генератора преобразователь представляет собой обычный выпрямитель. Так же имеется блок управления, регулирующий ток в обмотке возбуждения СГ, тем самым подстраивая генератор под разную частоту вращения ДВС и снимаемую мощность. Бывают генераторы с постоянными магнитами, в которых нет никакой обмотки возбуждения, но они как правило экономически не целесообразны для таких мощностей и размеров. Если генератор сделан на основе асинхронной машины, то преобразователь гораздо сложнее, а именно состоит из полноценного инвертора и работает в режиме векторного управления.

После преобразователя генератора энергия поступает на шину постоянного тока. Мощность ДВС самосвала весом 90 тонн составляет 700-800кВт, и для этого значения на современном уровне развития IGBT транзисторов оптимальным является напряжение порядка 650В на шине постоянного тока. При меньшем напряжении получаются слишком большие токи и как следствие необходимость в

проводах большего сечения. При большем напряжении транзисторы становятся слишком дорогими и медленными в плане частоты коммутации.

Постоянное напряжение далее поступает на преобразователи тяговых электродвигателей (ТЭД), которые представляют собой инверторы, такие же, какие используются в обычных преобразователях частоты. Особенности конструкции преобразователей напрямую зависят от используемого типа тягового двигателя. Здесь также существует много вариантов: асинхронный двигатель, синхронный, вентильно-индукторный.

В комплект тягового электрооборудования (КТЭО) входят тяговые двигатели, устанавливаемые в колеса самосвала, силовой генератор, стыкуемый с дизелем, и шкаф управления с ПЧ (см.рис.1.3).



Рисунок 1.3 - КТЭО карьерного самосвала БелАЗ

Сверху слева дизельный двигатель, снизу один из тяговых двигателей, снизу справа шкаф с преобразователями. Сверху справа тяговый генератор.

По своим условиям эксплуатации тяговый электродвигатель карьерного самосвала должен выдавать большой момент на низких частотах вращения. Таким образом, необходимо проектировать двигатель и преобразователь с учетом

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 10   |

большого фазного тока (кА), в случае использования трехфазной машины. Либо увеличивать количество фаз, к примеру, использовать 9ти фазную машину с независимыми сдвинутыми трехфазными обмотками. У обоих вариантов есть свои достоинства и недостатки. В первом случае сложность прокладки кабеля, так как он имеет большее сечение, дорогие IGBT ключи с низкой частотой коммутации. Во втором случае сильно усложняется задача управления инвертором, необходим контроллер с минимум 18ю выходами ШИМ.

### 1.3 Преимущества и недостатки ЭМТ

Электромеханическая трансмиссия имеет уникальное сочетание характеристик, таких как непрерывность и плавность изменения передаточного отношения. В обычных механических трансмиссиях вал двигателя механически связан с ведущими колёсами. Это не только нагружает двигатель и трансмиссию, но и приводит к тому, что для плавного изменения скорости приходится регулировать обороты двигателя, из-за чего он далеко не всегда работает в оптимальном режиме. Существенно изменить силу тяги и скорость можно лишь при помощи коробки передач, но это весьма грубый метод.

Электродвигатели обладают важным свойством: при увеличении сопротивления окружающей среды скорость машины снижается, как и обороты вала электродвигателя, но при этом увеличивается сила тяги. А так как наибольшая сила тяги развивается при наименьших оборотах, получаем отличные тяговые характеристики.

При использовании электромеханической трансмиссии первичные двигатели никак не связаны механически с ведущими колёсами, и могут постоянно работать в оптимальном режиме, а тяговые электродвигатели позволяют плавно менять силу тяги и скорость при неизменной скорости вращения вала первичного двигателя внутреннего сгорания. Коробка передач позволяет менять скорость и силу тяги лишь ступенчато, что нередко приводит к неэффективному использованию мощности.

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 11   |

Чем тяжелее машина и чем мощнее его двигатель, тем большие нагрузки испытывают двигатель и трансмиссия и тем менее применимой становится обычная механическая трансмиссия. Именно поэтому на современных грузовиках и тракторах все чаще используют электромеханическую трансмиссию.

Но ЭМТ имеет несколько существенных недостатков. Это большая масса генераторов и электродвигателей. Более высокая стоимость относительно механической трансмиссии.

#### 1.4 Звенья ЭМ трансмиссии. Дизельный двигатель

В 1892 году немецкий инженер Рудольф Дизель усовершенствовал двигатель с воспламенением от сжатия, который получил его имя. Дизельный двигатель использует теплоту, возникающую при сжатии воздуха, для воспламенения топлива. Это позволяет в дизельном двигателе не применять электроискровую систему зажигания. [4] Для работы дизельного двигателя требуется степень сжатия 16:1, или выше. При высокой степени сжатия поступивший в цилиндр свежий воздух сжимается до такой степени, пока его температура не превысит температуру воспламенения топлива 540°C (1000°F).

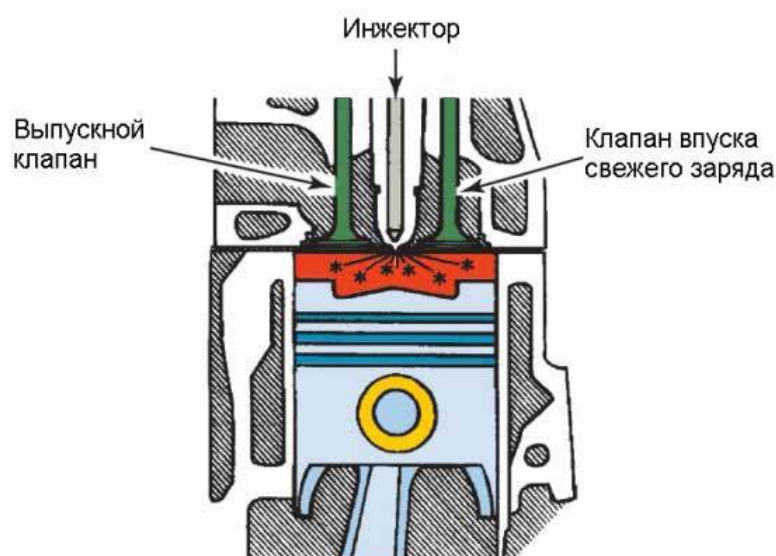


Рисунок 1.4 - Процесс воспламенения и сгорания.

|      |      |          |         |      |                                 |  |  |  |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|--|--|--|------|
|      |      |          |         |      |                                 |  |  |  | Лист |
|      |      |          |         |      |                                 |  |  |  | 12   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> |  |  |  |      |

Процесс нагрева свежего заряда при его сжатии носит название теплоты от сжатия. В тот момент, когда поршень приближается к верхней мертвой точке (ВМТ) такта сжатия, производится впрыскивание топлива в цилиндр двигателя, где топливо воспламеняется от теплоты воздуха (см.рис.1.4).

При горении топлива происходит выделение большого количества теплоты, что, в свою очередь, вызывает быстрый рост давления в камере сгорания. Возникающее давление горящих газов продуцирует механическую энергию. Высокая степень сжатия и большой крутящий момент на выходе из дизельного двигателя, делает двигатель массивнее, но и сильнее, чем бензиновый двигатель того же размера. В дизельном двигателе используется топливная система, оснащенная изготовленным с высокой точностью впрыскивающим насосом и индивидуальными топливными форсунками (инжекторами) для каждого из цилиндров двигателя.

Насос подает точно отмеренное (дозированное) количество топлива к топливным форсункам под высоким давлением и через заданные временные интервалы. Каждая из форсунок должна впрыснуть топливо в цилиндр в момент, позволяющий получить наивысшую эффективность сгорания топлива (см.рис.1.5).

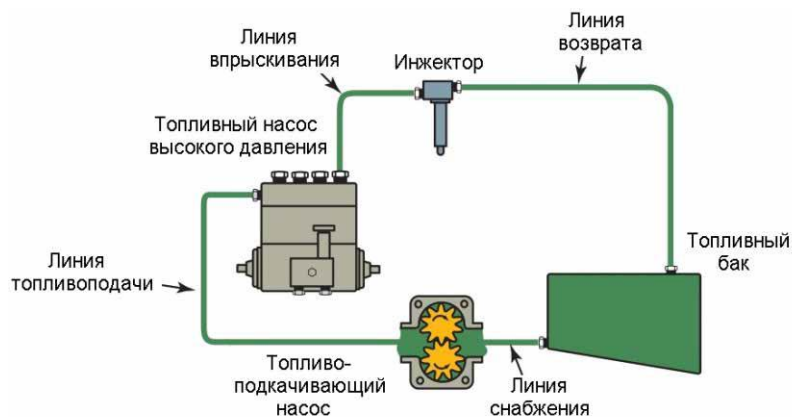


Рисунок 1.5 - Типичная система впрыскивания дизельного топлива.

Дизельный двигатель в сравнении с бензиновым двигателем того же размера обладает рядом преимуществ, в том числе:

1. Большим выходным крутящим моментом.
2. Более высокой топливной экономичностью.
3. Длительным сроком службы

В сравнении с бензиновым двигателем того же размера, дизельный двигатель обладает рядом существенных недостатков:

1. Повышенной шумностью работы, особенно при работе холодного двигателя, или на режиме холостого хода.
2. Специфическим запахом выхлопного газа.
3. Затрудненным запуском в холодное время года.
4. Увеличенным весом по сравнению с бензиновым двигателем того же рабочего объема.
5. Высокими требованиями к качеству топлива.

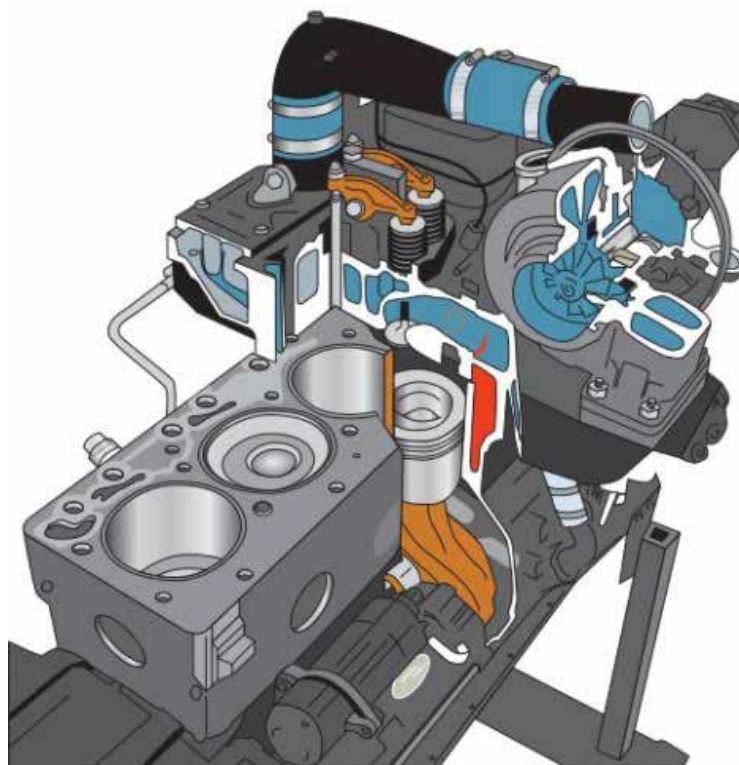


Рисунок 1.6 - Частичный разрез дизельного двигателя Cummins.

Степень сжатия дизеля от 17:1 до 25:1, для бензинового двигателя этот параметр от 8:1 до 12:1. Выходной крутящий момент, формируемый дизельным

двигателем вдвое и более крутящего момента, формируемого бензиновым двигателем того же рабочего объема [5, 6].

На практике эта разница означает, что дизельный мотор имеет лучшую тягу и потому лучше справляется с перевозкой тяжелых грузов. А вот там, где нужна высокая скорость передвижения, вперед выходит бензиновый мотор, развивающий больше мощности на высоких оборотах. Таким образом, дизельный мотор проявляет свои лучшие качества именно на низких оборотах, а потом его удельная тяга наоборот снижается. Оптимальными для дизеля являются обороты на уровне 1500-1800 об/мин. По этой причине долгое время такими двигателями комплектовались почти исключительно те виды техники, для которых высокая скорость передвижения была малозначительным параметром или не требовалась вовсе.

Однако технический прогресс не стоит на месте. Постепенно дизельные моторы сократили отставание от своих бензиновых собратьев в вопросах мощности на высоких оборотах. И тем не менее даже сегодня максимальные обороты дизелей существенно ниже, чем у бензиновых установок. Так, самые современные дизельные агрегаты имеют максимальное ограничение по числу оборотов на уровне 4,5-4,8 тыс. об/мин. В это же время бензиновые моторы самых обычных легковушек сегодня без проблем способны выдавать порядка 7 тыс. оборотов.

В плане эксплуатации одним из ключевых отличий бензинового мотора от дизельного является распределение удельной мощности на разных оборотах. У бензиновых агрегатов эта зависимость линейна, что позволяет создавать моторы с достаточно высоким пределом оборотов. Здесь принцип простой — чем выше обороты, тем выше мощность. У бензиновых моторов единственным реальным ограничением мощности, а значит и числа оборотов, является используемый для создания двигателя материал. Инженерам приходится ограничивать обороты

|             |             |                 |                |             |                                 |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---------------------------------|-------------|
|             |             |                 |                |             | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                 | 15          |

бензиновых моторов только потому, что более высокие значения не выдержит сама сталь, из которой сделан мотор.

В свою очередь распределение мощности у дизельных моторов происходит не линейно, а по параболе. Пик наступает достаточно рано — на тех значениях оборотов коленвала, которые для бензинового мотора считаются средними или даже низкими. А далее рост оборотов не только не добавляет двигателю мощности, а наоборот снижает ее. По этой причине высокооборотистые дизельные моторы никто не выпускает [7, 8].

КПД дизельного двигателя в процентах составляет порядка 35-40 процентов. А в крупных низкооборотных версиях более 50%. У бензиновых двигателей КПД не более 30% [9].

Исходя из изложенной выше информации, не остается сомнений в том, что более подходящим вариантом для энергоэффективной ЭМТ будет дизельный, а не бензиновый двигатель. Максимальный крутящий момент дизель имеет на низких оборотах, в которых потребление топлива не большое. Основные требования к дизелю в ЭМТ это как можно меньшая масса и габариты при неизменной мощности.

На данный момент существует множество производителей дизельных силовых установок для энергогенерирующего оборудования. Из ведущих зарубежных производителей, можно выделить Perkins – Великобритания, Volvo – Швеция, Cummins – США, Iveco – Италия, MAN – Германия, помимо этих существуют десятки других популярных производителей. Из отечественного рынка можно назвать Ярославский моторный завод – «ЯМЗ», Тутаевский моторный завод – «ТМЗ», КАМАЗ, ТУЛАМАШЗАВОД и другие. Большинство этих производители выпускают дизельные двигатели в больших диапазонах мощностей, так кампания «Perkins» производит двигатели от 10 л.с. до 3000 л.с. Кампания «ЯМЗ» выпускает дизели от 120 л.с. до 800 л.с. [10].

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 16   |



Хоть ДВС и можно назвать основой дизель – генераторной установки и от него зависит ресурс, качество и надежность работы энергогенерирующего узла, но большую роль так - же играет генератор.

### 1.5 Электрический генератор

Электрический генератор - электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в энергию электрического поля. Источники механической энергии могут быть разные, от пара и воды до двигателей внутреннего сгорания.

Первыми электрическими генераторами были – электростатические генераторы. Принцип их действия был основан на явлении [статического электричества](#). Но широкого применения в промышленности эти генераторы не получили, так как они развивали высокое напряжение при малом токе. Ярким примером таких генераторов стал генератор Ван де Граафа. Этот генератор был изобретен Робертом Ван де Граафом в 1929 году [11].

На данный момент, генератор в электромеханической трансмиссии применяется на основе синхронной либо асинхронной машины. В любом случае генераторы вырабатывают переменный ток после чего он преобразуется в постоянный в выпрямителе. Генераторы бывают разными с точки зрения фазности, многофазные генераторы делают так же для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения.

Синхронный генератор состоит из статора, ротора и блока управления. Статор и ротор выполнены из тонких пластин из электротехнической стали, хорошо проводящих магнитный поток и плохо — электрические вихревые токи. Витки статорной обмотки размещены в пазах статора равномерно по окружности. Для однофазного генератора — одна фазная обмотка, для трёхфазного генератора — три фазные обмотки, соединённые в звезду или треугольник и сдвинутые по окружности одна относительно другой на 120 градусов. Ротор представляет

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 17   |

собой электромагнит постоянного тока. Обмотка ротора соединена через два щётчных узла, представляющие пару «щётка — кольцо», с блоком управления. Последний осуществляет её питание постоянным током и обеспечивает необходимые электрические связи для автоматического регулирования. При вращении ротора вращающееся вместе с ним магнитное поле электромагнита возбуждает в статорной обмотке переменное синусоидальное — однофазное или трёхфазное — напряжение. При подключении к статорной обмотке нагрузки в цепи течёт переменный — однофазный или трёхфазный — электрический ток. Величина напряжения и частота на зажимах статорной обмотки зависят от скорости вращения ротора. С изменением электрической нагрузки синхронного генератора механическая нагрузка на валу ДВС также имеет тенденцию к изменению в прямо пропорциональной зависимости, которая может привести к изменению скорости вращения ротора и, как следствие, к изменению величины напряжения и частоты. Во избежание подобных изменений и для поддержания заданных величин напряжения и частоты с необходимой точностью, блоком управления синхронного генератора осуществляется автоматическое регулирование электрических параметров через обратную связь по току и напряжению, подаваемую на роторную обмотку.

Асинхронный генератор состоит из статора и ротора. Статор имеет такое же устройство, как и у синхронного генератора. Его обмотка также может быть однофазной или трёхфазной. Ротор может быть короткозамкнутый: токопроводящая часть ротора выполнена из алюминия и напоминает беличью клетку. При вращении ротора асинхронного генератора под действием остаточного магнетизма статора в беличьей клетке индуцируется электрический ток, магнитное поле которого, вращаясь вместе с ротором, наводит в неподвижной обмотке статора переменное синусоидальное — однофазное или трёхфазное — напряжение [12].

Поскольку в асинхронном генераторе нет электрической связи с ротором, то и нет возможности искусственного автоматического регулирования

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 18   |

электрических параметров напряжения и тока. Они изменяются с изменением электрической нагрузки на обмотке статора в соответствии с конструктивными особенностями асинхронной машины переменного тока. В синхронном же генераторе при помощи блока управления возбудителем, имеется возможность регулировать ток в обмотке возбуждения и тем самым подстраиваться под разную частоту вращения ДВС и снимаемую мощность. Бывают генераторы с постоянными магнитами, в которых нет никакой обмотки возбуждения, но они обычно неоправданно дороги для больших мощностей и размеров.

Синхронный генератор, будучи источником реактивной мощности (из-за конструктивных особенностей этого вида электрических машин), не боится перегрузок переходных режимов, связанных с пуском под нагрузкой из потребителей этой реактивной мощности — всех электробытовых приборов и электроинструмента, содержащих электродвигатели.

Асинхронный генератор, сам являясь потребителем реактивной мощности, перегрузок при пуске под нагрузкой с потребителями реактивной мощности боится больше — имеется вероятность протекания больших токов и перегрева статорной обмотки. Для ликвидации этого недостатка профессиональные асинхронные генераторы снабжены пусковыми конденсаторами, которые после стабилизации величины тока статора через несколько секунд после пуска отключаются [13, 14].

Выбор генератора осуществляется исходя из необходимых параметров. Один из главных параметров это выдаваемая мощность генератора. Необходимая мощность генератора напрямую определяется потребляемой мощностью нагрузки, которую он должен питать. Так, к примеру, мощность 90 тонного самосвала составляет около 800кВт. Соответственно генератор должен выдавать эту мощность.

Для соединения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания с валом генератора применяют соединительные муфты, которые компенсируют некоторое

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 19   |

смещение и перекося осей коленчатого вала дизеля и вала генератора. Таким образом, частота вращения ротора электрогенератора равна частоте вращения коленвала ДВС [15].

В настоящее время большинство производителей генераторов выпускают их уже в составе дизель – генераторных электростанций. Из отечественных производителей можно назвать «ЯМЗ», «РУСЭЛПРОМ» а так же «Минский моторный завод» и многие другие. Зарубежные представители «SDMO» - Франция, «Airman» - Япония, «Wilson» - Великобритания, и другие. Выпускаемая продукция в основном рассчитана на большой диапазон мощностей от 8 до 2500 кВА (от 6 до 2000кВт).

Важным параметром генератора является количество пар полюсов. Остро этот вопрос встает в ветрогенераторах, где частота вращения достигает 80 об/мин. В дизельном электрогенераторе частота вращения, как правило, 1500 об/мин – это номинальные обороты дизельного двигателя при которых крутящий момент и КПД близятся к максимуму. Если ротор генератора имеет одну пару полюсов, то частота ЭДС, индуцируемой в генераторе, оказывается равной частоте вращения ротора, так как один оборот ротора соответствует одному периоду индуцируемой ЭДС. Для получения ЭДС с частотой 50 Гц двигатель, приводящий в движение ротор генератора с одной парой полюсов, должен вращаться с частотой 50 об/с или 3000 об/мин. Некоторые двигатели (например, водяные турбины) не могут развивать такие скорости вращения. Поэтому, кроме генераторов с одной парой полюсов, изготавливаются многополюсные генераторы, у которых ротор имеет несколько пар полюсов. Тогда получаем, что частота индуцируемой ЭДС в генераторе равна произведению количества пар полюсов индуктора генератора на частоту вращения ротора [16].

## 1.6 Выпрямитель

После выработки генератором электрической энергии она поступает на шину постоянного тока. Для самосвала многотонника, к примеру, на 90 тонн и

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 20   |

мощностью ДВС 800кВт на современном уровне развития IGBT транзисторов оптимальным является напряжение порядка 650В на шине постоянного тока. При меньшем напряжении получаются слишком большие токи (а чем больше ток – тем толще провода, нагрев и потери), а при большем напряжении транзисторы становятся слишком дорогими и медленными в плане частоты коммутации.

Что бы преобразовать выработанный генератором переменный ток в постоянный необходим преобразователь. В случае с синхронным двигателем в роли преобразователя выступает простой выпрямитель. Чаще делают многофазный выпрямитель и генератор, чтобы уменьшить пульсации выпрямленного напряжения, качество выпрямленного напряжения оказывается лучше, чем в однофазных схемах. Блок управления возбудителем регулирует ток в обмотке возбуждения, и подстраивается под частоту вращения ДВС и снимаемую мощность. Если генератор сделан на основе асинхронной машины, то преобразователь гораздо сложнее, а именно состоит из полноценного инвертора и работает в режиме векторного управления.

Трехфазные схемы выпрямления находят широкое применение в выпрямителях средней и большой мощности. В большинстве случаев применяется трехфазная мостовая схема. Трехфазная нулевая схема может оказаться целесообразной только при низких напряжениях. В каждый момент времени в схеме проводит вентиль той фазы, которая наиболее положительна. Выпрямленное напряжение формируется из вершущек полувольт.

Наиболее распространенной является трехфазная мостовая схема выпрямления, схема Ларионова (см.рис.1.7), ниже приведены ее временные диаграммы токов и напряжений при  $L_d = \infty$  (см.рис.1.8). Вентили V2, V6, V4, у которых соединены аноды, называют анодной тройкой вентиляей. V1, V3, V5, у которых соединены катоды - катодной тройкой вентиляей. В катодной тройке вентиляей проводит вентиль, у которого анод самый положительный. В анодной тройке вентиляей проводит вентиль, у которого катод самый отрицательный. Если в данный момент фаза *a* самая положительная, а *c* – самая отрицательная, то ток проходит от фазы *a*

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 21   |

через  $V1$  в нагрузку, через  $V2$  на фазу  $c$ . Нумерация вентиляей соответствует порядку их работы. Выпрямленное напряжение  $u_d$  формируется из верхушек линейных напряжений. Ток нагрузки  $i_d$  из-за наличия в схеме индуктивности сглажен. На рисунке он представлен прямой линией. Токи через вентили  $i_{a1} \dots i_{a6}$  изображаются прямоугольниками, соответствующими участкам проводимости. Вторичный ток  $i_{2a}$  переменный, а первичный  $i_{1A}$  имеет такую же форму.

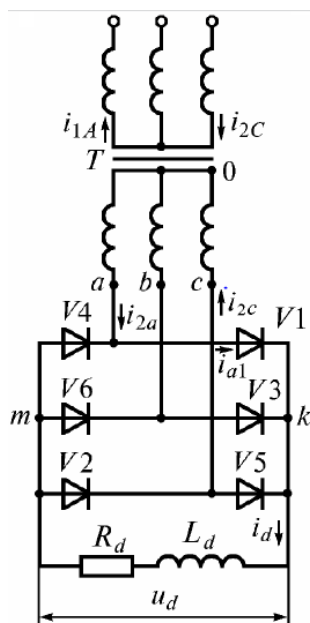


Рисунок 1.7 - Трехфазная мостовая схема выпрямления (схема Ларионова)

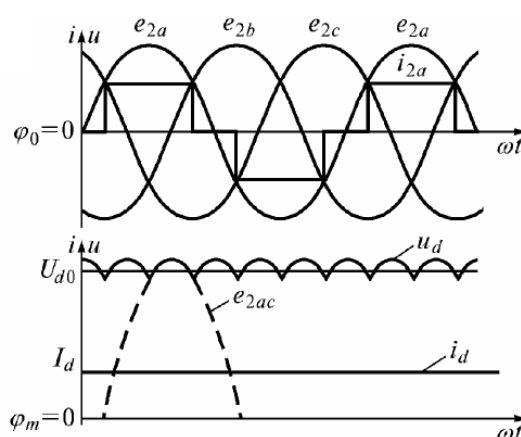


Рисунок 1.8 - Диаграммы токов и напряжений при  $L_d = \infty$

Энергетические показатели выпрямителей – это коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности  $\chi$  и  $\cos\phi$ . Качество выпрямленного напряжения характеризует коэффициент пульсаций.

КПД выпрямителя определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_d}{P}$$

где  $P$  – мощность потерь в выпрямителе;  $P_d$  – мощность на выходе выпрямителя.

КПД выпрямителя равен произведению КПД вентиляционной части и КПД трансформатора.

КПД вентиляционной части:

$$\eta_v = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

где  $P_v$  - потери в вентиляционной части.

где  $U_a$  – падение напряжения на проводящем вентиле;  $a$  – количество вентиляей, через которые последовательно проходит ток.

Получаем:

$$\eta = \eta_v \cdot \eta_{tr}$$

При напряжениях в сотни вольт КПД вентиляционной части составляет 0,98...0,99, а, учитывая, что КПД трансформатора средней мощности имеет примерно ту же величину, можно сделать вывод, что КПД выпрямителя больше 0,96. Следовательно, уже при напряжениях в сотни вольт полупроводниковый выпрямитель по КПД близок к идеалу [17].

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 23   |

## 1.7 Конвертор

Напряжение на шине постоянного тока поддерживается за счет вырабатываемой энергии генератора. В случае если генератор не может обеспечить необходимый уровень напряжения, на шине постоянного тока, применяется конвертор. При слишком малом напряжении по шине будет протекать большой ток. Следовательно, увеличится нагрев проводов и потери, согласно закону Джоуля – Ленца. Возникнет необходимость прокладки проводов большего сечения. При слишком большом напряжении уменьшится частота коммутации транзисторов и вырастит их стоимость.

Для преобразования постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня необходим преобразователь постоянного напряжения, или по другому конвертор. Он служит для питания нагрузки постоянным напряжением, отличающимся по величине от напряжения источника питания [18].

На рис.1.9 показана схема непосредственного ППН, повышающего напряжение, а на рис.1.10 – диаграммы напряжений на нагрузке  $U_n$  и на коллекторе  $U_k$  и токов: потребляемого от источника питания  $i_d$ , коллектора  $i_k$ , диода  $i_d$  и нагрузки  $i_n$ .

Рассмотрим работу схемы. В момент  $t_1$  включается транзистор  $VT$ , ток через дроссель  $L$  нарастает. В момент  $t_2$  выключается транзистор и за счет энергии, запасенной в индуктивности, под действием суммы напряжения источника питания  $U_d$  и ЭДС самоиндукции через вентиль  $VD$  заряжается конденсатор  $C_n$ , а ток, потребляемый от источника питания, спадает.

В момент  $t_3$  процессы повторяются. В такой схеме можно только поднять напряжение.

Таким образом, в течение времени  $t_u$  ток  $i_d$  идет через транзистор, и запасается энергия в индуктивности. Затем, в течение интервала времени  $T - t_u$  ток  $i_d$  идет через диод на зарядку конденсатора и на нагрузку. Постоянная составляющая тока  $i_d$  не проходит через конденсатор, поэтому среднее значение тока, протекающего через нагрузку,

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 24   |



Или

Здесь  $\gamma$  – относительное время включенного состояния транзистора.

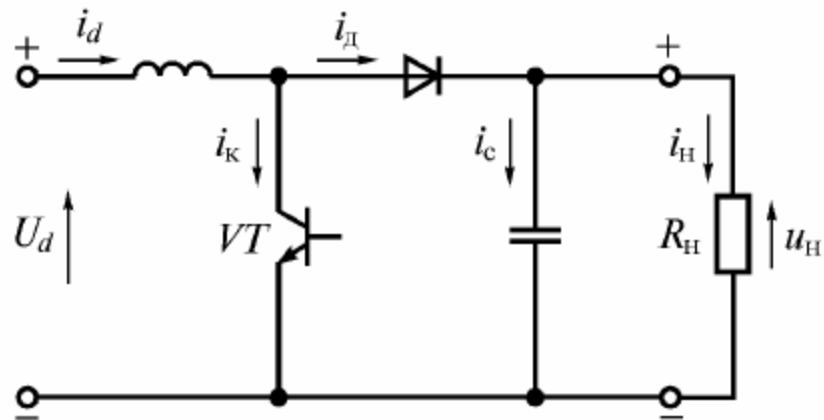


Рисунок 1.9 - Схема повышающего ППН.

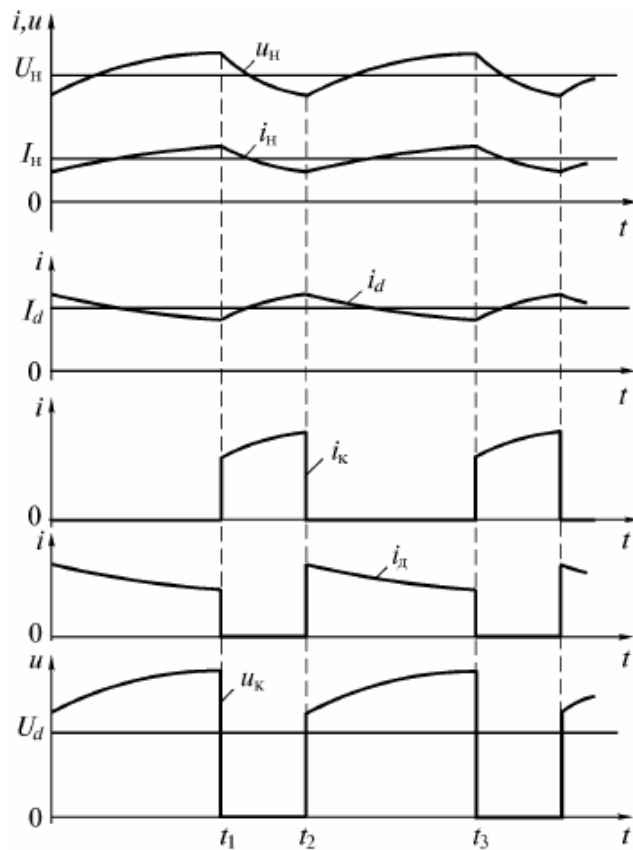


Рисунок 1.10 - Диаграммы напряжений и токов иллюстрирующие работу повышающего ППН.

Мощность на входе и выходе должна быть равной:

С учетом справедливости равенства мощностей на входе и выходе:

—

Тогда уравнение регулировочной характеристики в относительных единицах:

— —

Из этого следует возможность бесконечного увеличения напряжения на нагрузке. Однако, из-за роста потерь в дросселе (он не может быть выполнен без потерь) при увеличении  $\gamma$  получить очень большое напряжение невозможно. Целесообразно увеличение напряжения максимум в 3...4 раза. Регулировочная характеристика показана на рис.1.11. Внешняя характеристика этого ППН очень мягкая. Нужно также отметить, что КПД этой схемы резко падает с ростом коэффициента преобразования напряжения и  $K_u$  [19].

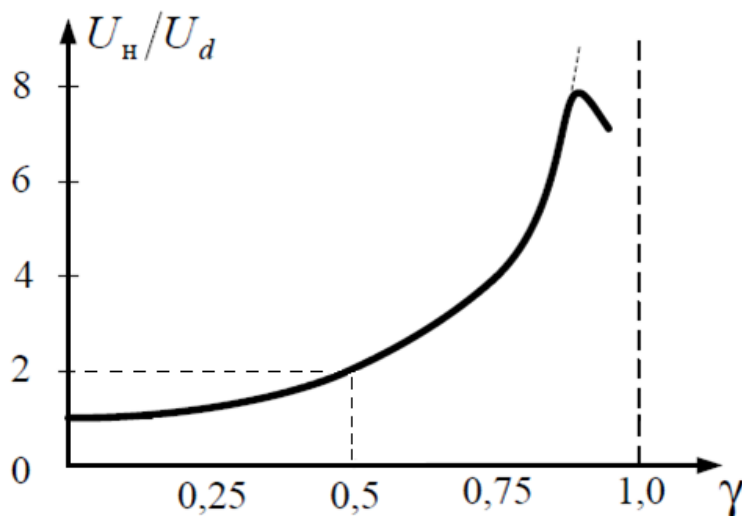


Рисунок 1.11 - Регулировочная характеристика повышающего ППН.

Основным энергетическим показателем ППН является КПД  $\eta$ :

—

В данной формуле не учтены коммутационные потери. При их учете общие потери в правильно спроектированных преобразователях увеличиваются не более чем на 15...30 %.

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 26   |

С точки зрения уменьшения пульсаций напряжения и тока на выходе ППН, а, следовательно, и потерь в двигателе, целесообразно повышение несущей частоты. Однако при этом растут коммутационные потери в транзисторах. Поэтому несущая частота выбирается из компромиссных соображений.

### 1.8 Инвертор

С шины постоянного тока напряжение поступает на преобразователь тягового электродвигателя. Такие преобразователи представляют собой инверторы, как и в обычных преобразователях частоты. Принцип частотного регулирования представлен на рис.1.12. Трехфазное напряжение с генератора выпрямляется и поступает на шину постоянного тока, инвертор берет это напряжение и снова преобразует в трехфазное, но уже нужной для тяговой машины частоты и амплитуды.

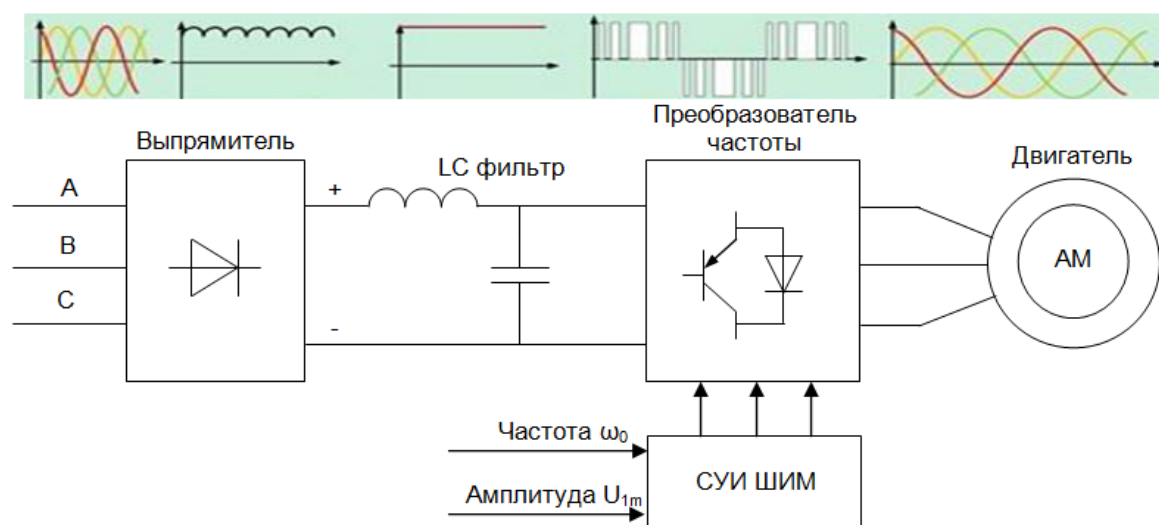


Рисунок 1.12 - Принцип частотного регулирования.

Преобразователи постоянного тока в переменный, которые работают на сеть, в которой нет других источников электроэнергии, называют автономными инверторами. Коммутации вентилях в них осуществляются благодаря применению полностью управляемых вентилях или устройств искусственной коммутации. При этом частота напряжения на выходе АИ определяется частотой

управления, а величина напряжения параметрами нагрузки и системой регулирования. В настоящее время в электроприводе наибольшее применение получили автономные инверторы напряжения (АИН) на IGBT транзисторах [20].

Автономный инвертор напряжения преобразовывает постоянное напряжение, подаваемое на его вход, в пропорциональное по величине переменное напряжение. Существует много схем АИН. Однако, наибольшее применение в электроприводе переменного тока получила трехфазная мостовая схема на полностью управляемых вентилях (транзисторах или запираемых тиристорах), приведенная на рис.1.13 и рис.1.14 [21].

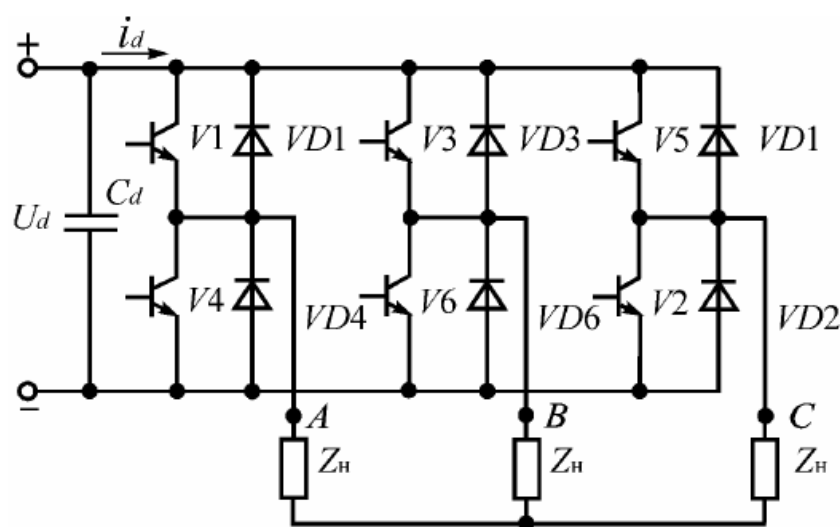


Рисунок 1.13 - Транзисторный трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения при соединении нагрузки звездой.

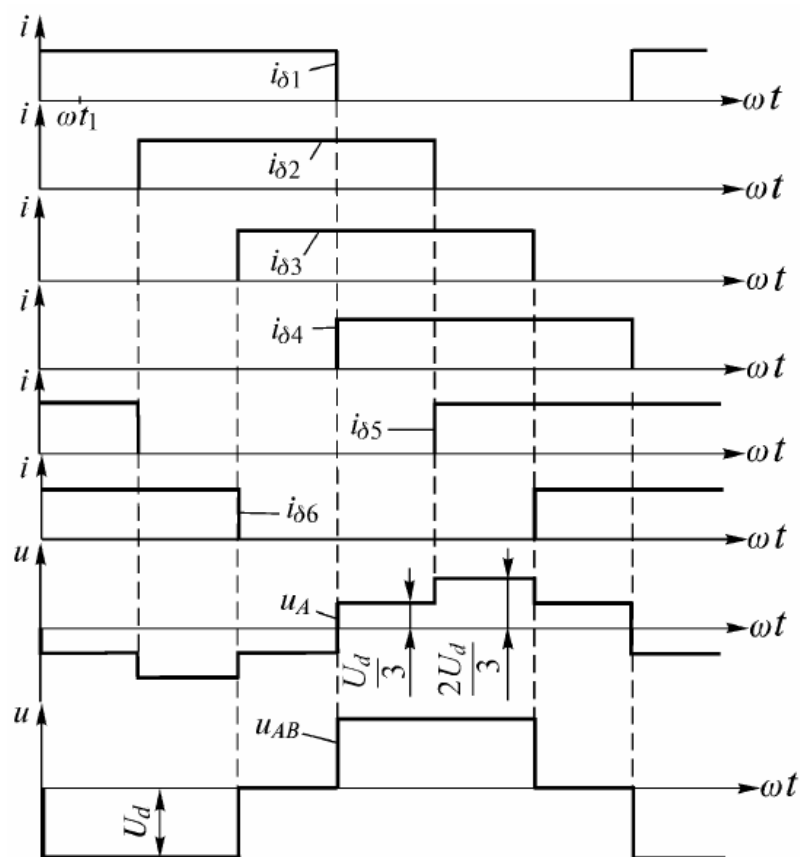


Рисунок 1.14 - Диаграммы токов и напряжений в трёхфазном мостовом АИН

В этой схеме управляемые вентили могут работать с длительностью открытого состояния  $\lambda = 120^\circ$  и  $\lambda = 180^\circ$ . При угле проводимости вентилей  $\lambda = 180^\circ$  обеспечивается непрерывная связь фаз нагрузки с источником питания и лучшая форма напряжений на выходе, независимая от параметров нагрузки. Это обусловило более широкое применение такого управления.

Для регулирования напряжения в трехфазных АИН наибольшее распространение получил метод ШИМ (широтно – импульсная модуляция).

Применение ШИМ в АИН позволяет формировать на выходах достаточно синусоидальные токи и напряжения. При широтно-импульсной модуляции одновременно обеспечивается регулирование напряжения на выходе АИН и изменение его по квазисинусоидальному закону. При ШИМ кривая выходного напряжения формируется в виде импульсов переменной длительности, модулированных чаще всего по синусоидальному закону. Регулирование

напряжения осуществляется изменением длительности импульсов при сохранении закона модуляции [18].

Потери в АИН, если пренебречь потерями в конденсаторе определяются потерями в ключах. На рис.1.15 представлены зависимости КПД от тока и глубины регулирования. КПД слабо зависит от тока и резко падает с уменьшением частоты, т.е. увеличением глубины регулирования.

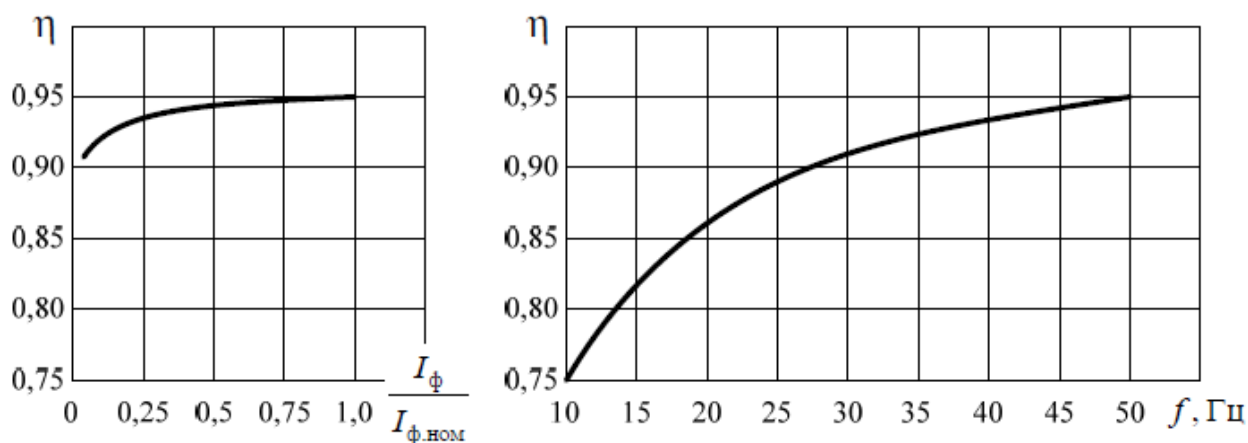


Рисунок 1.15 - Зависимости КПД от тока и частоты при выполнении закона  $U/f = const$

Инвертор должен удовлетворять условиям высокой энергоэффективности. В случае высокой частоты коммутации силовых транзисторов инвертора могут возникать негативные последствия в виде резонансных явления в коммутационных цепях, связанные с большим перенапряжением и выходом из строя коммутирующих транзисторов. Чем больше потери связанные с нагревом БТИЗ (IGBT) транзисторов, тем ниже КПД. Классический инвертор, формирующий шести импульсное напряжение, удовлетворяет требованиям минимума коммутационных потерь.

### 1.9 Электрический двигатель

Одним из основных элементов ЭМТ является электродвигатель, который служит для создания необходимого для движения крутящего момента. КПД электрического двигателя в несколько раз больше чем у ДВС, 25% против 90 – 95%. Не смотря на то, что долгое время ЭМТ трансмиссия базировалась на

двигателях постоянного тока, от такого вида трансмиссия отказались в пользу машин переменного тока. Это связано с низкой надежностью щеточно – коллекторного узла и необходимостью его сложно обслуживания у машин постоянного тока.

На данный момент существует несколько вариантов конструкции тягового электродвигателя, на основе асинхронной или синхронной машины. Синхронный двигатель способен работать одновременно в качестве генератора и двигателя. Его устройство схоже с синхронным генератором. Характерной особенностью двигателя является неизменяемая частота роторного вращения от нагрузки. Эти виды двигателей широко применяются во многих сферах, например, для электрических приводов, которым необходима постоянная скорость. В основу его функционирования положено взаимодействие вращающегося магнитного поля якоря и магнитных полей индукторных полюсов. Якорь находится в статоре, а индуктор в роторе. Для более мощных двигателей чаще используют электрические полюсные магниты, а для маломощных постоянные магниты. Для запуска синхронного двигателя и его разгона до номинальной частоты вращения кратковременно используют асинхронный режим. В это время индукторные обмотки замыкаются накоротко или посредством реостата. После достижения необходимой скорости индуктор начинают питать постоянным током. Основными минусами синхронного двигателя являются: сложность запуска, необходимость питать обмотку постоянным током, скользящий контакт.

Асинхронный двигатель представляет собой механизм, направленный на трансформацию электрической энергии переменного тока в механическую. Частота вращения магнитного поля статора в нем выше частоты вращения ротора. Двигатель состоит из статора цилиндрической формы и ротора, в зависимости от которого асинхронные двигатели могут быть с короткозамкнутым или фазным ротором. Работа двигателя осуществляется на основе взаимодействия магнитного статорного поля и наводящихся этим же полем токов в роторе. Вращающий момент появляется тогда, когда имеется разность частоты вращения полей.

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 31   |

Отличие работы двигателей - в роторе. У синхронного типа он заключается в постоянном или электрическом магните. Благодаря притягиванию разноименных полюсов вращающееся поле статора влечет и магнитный ротор. Их скорость получается одинаковой. Асинхронные двигатели, в свою очередь, просты и надежны, но их недостатком является трудность регулировки частоты вращения. Для реверсирования трехфазного асинхронного меняют расположение двух фаз или двух линейных проводов, приближающихся к обмотке статора. Синхронный тип двигателя использую там, где необходима постоянная скорость и полная управляемость, например, в насосах, вентиляторах и компрессорах.

Для тяговых электродвигателей грузовой техники, главной особенностью должно являться выдаваемый большой момент на низких и нулевых частотах вращения. Существует так же вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением, который главным образом используется потому, что этот тип двигателей хорошо переносит перегрузку по моменту, что важно для карьерной техники. Но в ЭМ трансмиссии наибольшее распространение получил асинхронный частотно – регулируемый привод.

Использование нескольких электродвигателей приводящих в движение каждое колесо по отдельности позволяет существенно поднять тяговую мощность транспортного средства. При размещении тяговых электродвигателей непосредственно в колесо сокращается до минимума элементы трансмиссии, но увеличивается неподрессоренная масса и ухудшается управляемость на больших скоростях. Карьерные самосвалы эксплуатируются на малых скоростях и существенного ухудшения управляемости не наблюдается. Конструктивно, как правило, используют два двигателя на каждое колесо задней оси. Устанавливают их непосредственно в задних колесах самосвала, где к ним также стыкуется колесный, чаще зубчатый редуктор.

|             |             |                 |                |             |                                 |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---------------------------------|-------------|
|             |             |                 |                |             | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                 | 32          |



## 2 ВЫБОР СИЛОВЫХ ЗВЕНЬЕВ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Следует отметить, что на данном этапе развития ЭМ трансмиссии переход от теоретически желаемых параметров для ЭМТ к ее производству основывается на опыте других разработок и является скорее искусством проектирования. Отсутствуют общепринятые обоснованные алгоритмы и критерии выбора основных параметров и элементов трансмиссии, таких как коэффициент редукции, число передач, частота вращения, частота питания электрических машин, число пар полюсов, выбор типа электродвигателя и.т.д. [22].

### 2.1 Выбор асинхронных тяговых машин электромеханической трансмиссии

Тяговый электрический двигатель должен отвечать всем необходимым параметрам грузового транспортного средства. Конструктивное расположение – в задней оси два мотор – колеса. В качестве тяговых двигателей используем асинхронные машины с короткозамкнутым ротором. Для выбора конкретной мощности тягового двигателя необходимо оценить требуемую мощность на колесах транспортного средства в пиковых и в длительных режимах. Для расчета мощности тяговых электродвигателей, зададимся исходными данными карьерного самосвала грузоподъемность 90 тон (см.табл.1).

Таблица 1 - Технические характеристики БЕЛАЗ – 7558.

|  |        |
|--|--------|
| Масса полная (в груженом состоянии), т         | 164000 |
| Максимальная скорость, км/ч                    | 60     |
| Колесная формула                               | 4x2    |
| Высота по кузову, см                           | 5340   |
| Ширина по кузову, см                           | 5400   |
| Площадь лобового сопротивления, м <sup>2</sup> | 10,74  |
| Коэффициент обтекаемости кузова                | 0,92   |

Требуемая мощность электродвигателей транспортного средства при движении с постоянной скоростью в длительном режиме:

где, коэффициент трения качения по грунтовой поверхности: 0,022

Коэффициент обтекаемости кузова

Площадь лобового сопротивления

Применив указанную формулу, имеем:

Так же, для нахождения мощности требуемой для электрического двигателя, следует учесть коэффициент полезного действия двигателя и редуктора, получаем:

\_\_\_\_\_

где

-

Для движения карьерного самосвала требуемой массы, с заданной скоростью по грунтовой поверхности, требуемая мощность в длительном режиме на колёсах транспортного средства составляет 640 кВт. Так как используются два

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 34   |

тяговых электродвигателя, то требуемая мощность делиться между ними и для одного электрического двигателя составляет 320 кВт.

Найдем мощность требуемую самосвалу в пиковом режиме, при разгоне с места до 40 км/ч за 40 секунд в подъем равный 15%.

где

Узнаем требуемую мощность тяговых электрических в пиковом режиме:

В пиковом режиме для разгона до скорости 40 км/час и допустимых подъёмов транспортного полотна до 15%, требуемая мощность одного тягового электрического двигателя транспортного средства составляет 364,6 кВт.

Согласно расчетам, выбираем двигатель ТАД – 9, производства ОАО «Силовые машины», параметры указаны в табл.2.

Таблица 2 - Характеристики двигателя ТАД - 9

| Параметр             | Величина | Единица измерения |
|----------------------|----------|-------------------|
| Номинальная скорость | 1500     | Об/мин            |
| Номинальная мощность | 320      | кВт               |

Продолжение таблицы 2

|                             |           |           |        |
|-----------------------------|-----------|-----------|--------|
| Максимальная мощность       |           | 510       | кВт    |
| Максимальная скорость       |           | 4140      | Об/мин |
| Рекомендуемое<br>напряжение | входное   | 350 – 650 | В      |
| Коэффициент<br>действия     | полезного | 0,96      | %      |
| Количество пар полюсов      |           | 4         | –      |
| Степень защиты              |           | IP67      | –      |

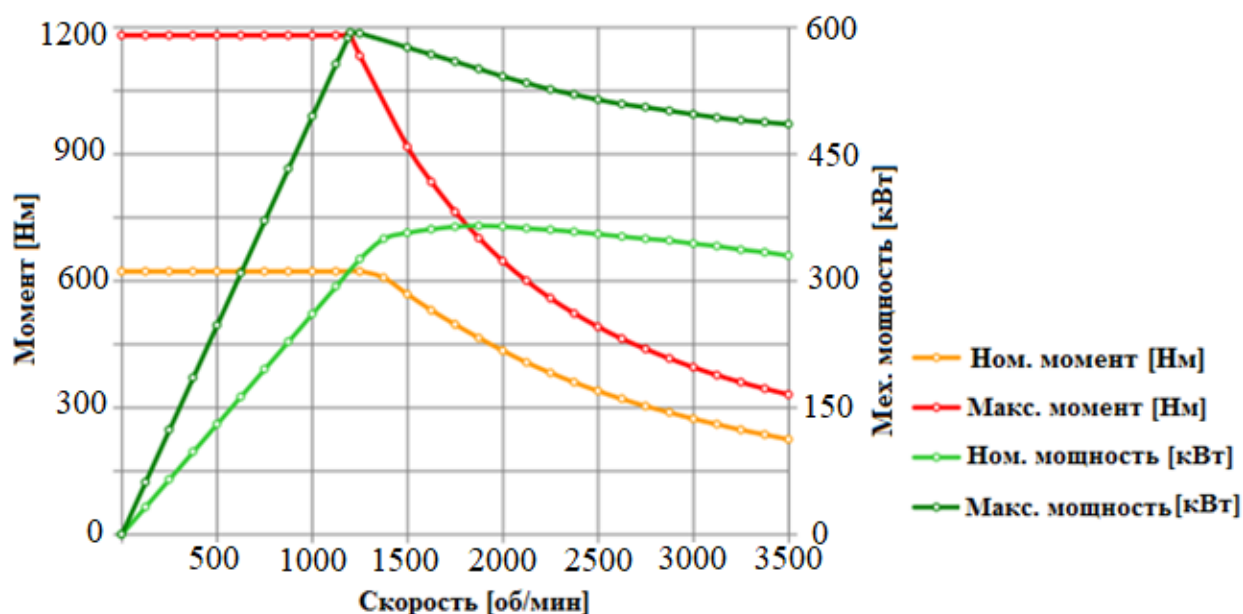


Рисунок 2.1 – Характеристики двигателя ТАД – 9.

## 2.2 Выбор редуктора

Так как номинальная скорость вращения вала асинхронного двигателя недопустима большая для колеса карьерного самосвала, а максимальный КПД достигается при номинальной скорости, необходим редуктор между колесом и тяговой машиной. Редуктор требуется для обеспечения понижения передачи и повышения силы крутящего момента.

Требуется выбрать передаточное число редуктора, применим следующую формулу:

\_\_\_\_\_

где

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Получаем редуктор с передаточным числом 31.

### 2.3 Выбор дизель – генераторной установки

Основные параметры дизель - генераторной установки должны соответствовать тяговым электрическим двигателям и обеспечивать их питание. Выбор дизель-генераторной установки так же осуществляется исходя из технических требований предъявляемых к грузовому транспортному средству. Важное значение имеют вопросы совместимости генераторной установки по уровню напряжения с напряжением  $U_d$  шины постоянного тока электропривода.

Наиболее энергоэффективным вариантом будет трехфазный управляемый синхронный генератор с электромагнитным возбуждением и встроенным неуправляемым мостовым выпрямителем на диодах [24]. Учитывая относительно малую частоту вращения дизельных двигателей  $n = 1400...2400$  об/мин [25], синхронный генератор автомобилей выполняют многополюсным с числом пар полюсов  $p = 4$ . Многополюсность позволяет существенно уменьшить габариты

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 37   |

магнитопровода статора. Многофазность требуется для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения. Управляемый выпрямитель или по другому – тиристорный преобразователь, имеет несколько меньший КПД по сравнению с неуправляемым за счет потерь на переключение тиристоров, а так же вносит в сеть большие импульсные помехи и нелинейные искажения, по этому отдаем предпочтение неуправляемому выпрямителю. К тому же, управляемый преобразователь является источником потребления реактивной мощности даже при чисто активной нагрузке.

Согласно имеющейся мощности тяговых электродвигателей и заданным параметрам карьерного самосвала, выбираем дизельный двигатель «QST30 – С» производства фирмы Cummins, который будет вращать генератор «ГСТ 700-8 УХЛ2», производства ОАО «Силовые машины». Их характеристики представлены в табл.3 и табл.4.

Таблица 3 - Технические характеристики тягового генератора.

| Тип                                  | Синхронный |
|--------------------------------------|------------|
| Номинальная мощность, кВт            | 700        |
| Выпрямленное напряжение, В           | 650        |
| Номинальная частота вращения, об/мин | 1500       |
| Количество пар полюсов               | 4          |
| Масса, кг                            | 2900       |
| КПД, %                               | 95         |
| Номинальный фазный ток статора, А    | 450        |
| Номинальная частота, Гц              | 127        |
| Наибольший ток возбуждения, А        | 180        |

Таблица 4 - Технические характеристики дизельного двигателя.

|                      |    |
|----------------------|----|
| Количество цилиндров | 12 |
|----------------------|----|

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 38   |

Продолжение таблицы 4

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| Рабочий объем, л                     | 30,5     |
| Мощность, л.с/кВт                    | 1050/780 |
| Пиковый крутящий момент, Н·м         | 4630     |
| Масса, кг                            | 3328     |
| Номинальная частота вращения, об/мин | 1500     |

2.4 Выбор инвертора

В качестве инвертора целесообразней выбирать классический мостовой инвертор на IGBT транзисторах, управляющийся широтно - импульсной модуляцией (ШИМ), формирующий шести импульсное напряжение. Такой тип инвертора удовлетворяет требованиям минимума коммутационных потерь и как следствие имеет более высокий КПД. Его характеристики приведены в табл.5.

Таблица 5 - Характеристики инвертора.

|  |           |
|--|-----------|
| Минимальное входное напряжение (включения), В                  | 6         |
| Минимальное напряжение отключения, В                           | 2         |
| Диапазон рабочего напряжения, В                                | 250 - 750 |
| Непрерывный среднеквадратичный ток, А                          | 520       |
| Предельный кратковременный ток. 30с. При 100%, 90с. При 50%, А | 750       |
| Мощность в длительном режиме, кВт                              | 330       |
| КПД, %   | 95        |
| Пиковая мощность, кВт  | 460       |
| Коэффициент полезного действия                                 | 0.96      |

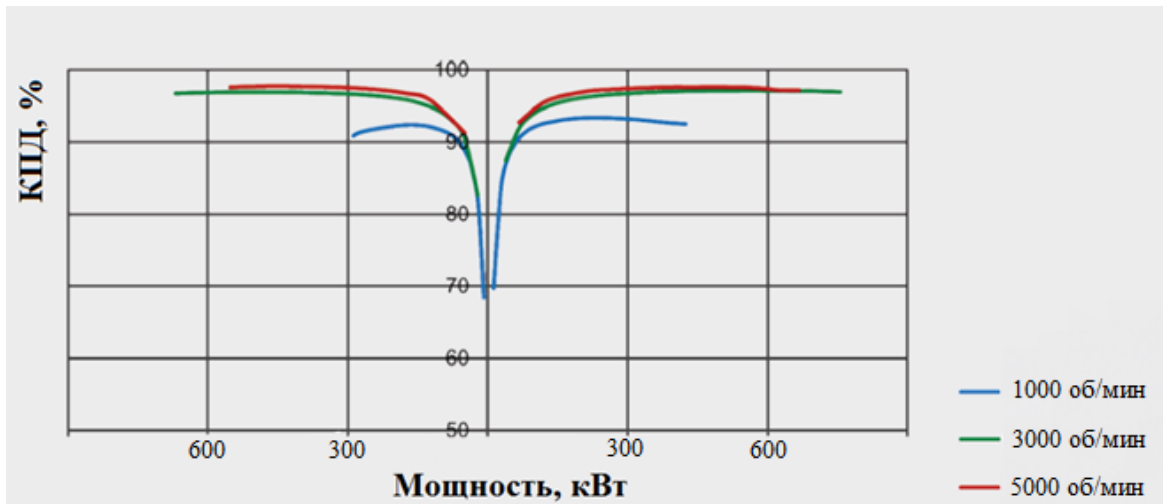


Рисунок 2.2 - КПД инвертора в зависимости от потребляемой мощности и скорости вращения ТЭД.



### 3 РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРВЛЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ.

Тяговый электропривод является одним из основных узлов электротранспортных средств. Его характеристики во многом определяют характеристики транспортного средства в целом. Электромеханическая трансмиссия это многозвенная система преобразования энергии. В начале, химическая энергия топлива преобразуется в механическую энергию двигателя, затем в генераторе механическая энергия преобразуется в электрическую, и после энергия снова преобразуется в механическую - в энергию тяговых двигателей (см.рис.3.1). Соответственно, каждое звено трансмиссии имеет свой КПД. Коэффициент полезного действия (КПД) является величиной, которая в процентном отношении выражает эффективность того или иного механизма (двигателя, системы) касательно преобразования полученной энергии в полезную работу.

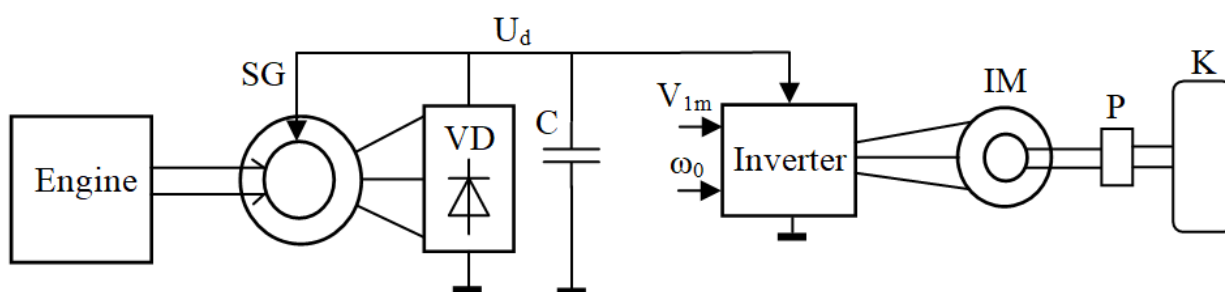


Рисунок 3.1 - Силовая цепь электромеханической трансмиссии.

Общий КПД всей системы складывается из произведения КПД каждой ее составляющей:

Формирование амплитуд низкого уровня из напряжения  $U_d$  звена постоянного тока,  $U_d = 650V = \text{const}$ , сопряжено с большими потерями мощности в инверторе. При формировании амплитуд низкого уровня частота импульсов

ШИМ возрастает, соответственно и увеличивается частота коммутаций силовых транзисторов (рис.3.2). Это в свою очередь приводит к возрастанию потерь на коммутацию, а так же увеличивается вероятность перенапряжений и выхода из строя коммутирующих транзисторов.

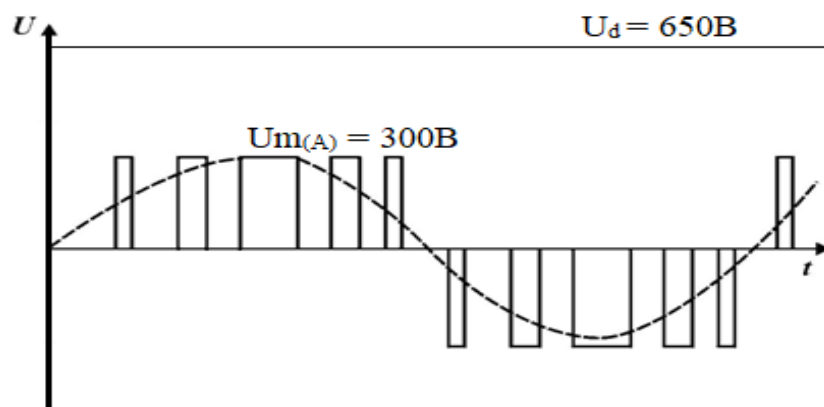


Рисунок 3.2 - Широтно – импульсная модуляция.

С целью уменьшения потерь на инверторе, был рассмотрен вариант введения многоуровневого инвертора с емкостным делителем напряжения с целью синхронизации амплитуды напряжения  $U_d$  с требуемой амплитудой  $U_m$  тяговой машины (рис.3.3).

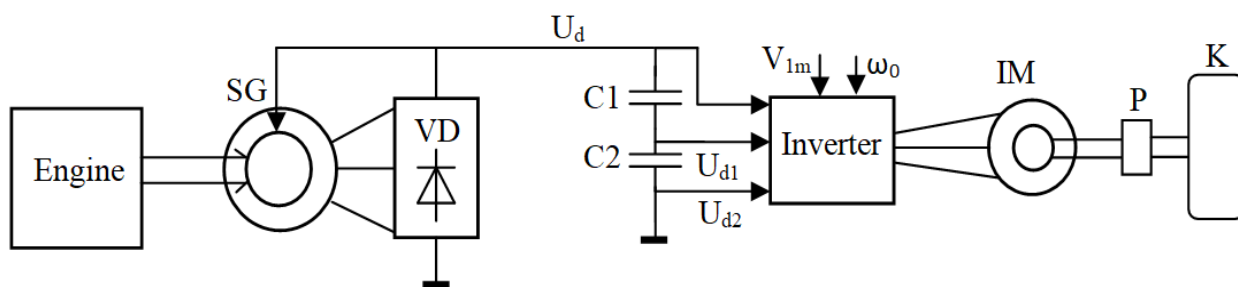


Рисунок 3.3 - Силовая цепь ЭМТ с многоуровневым инвертором. Engine – дизельный двигатель; SG – синхронный генератор; VD – неуправляемый выпрямитель;  $U_d$  – напряжение на шине постоянного тока; C1, C2 – емкостный делитель напряжения; Inverter – классический инвертор;  $U_{1m}$  и  $\omega_0$  каналы управления инвертором по частоте и амплитуде; IM – асинхронный тяговый электродвигатель; P – редуктор мотор – колеса; K – колесо задней оси самосвала.

В результате анализа данной схемы, были выявлены следующие недостатки:

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 42   |

1. Усложнение силовой части функциональной схемы за счет увеличения диодно-тиристорных ключей.
2. Емкостной делитель не обеспечивает точность и стабильность напряжения  $U_d$
3. Для обеспечения плавности регулирования  $U_d$  необходима высокочастотная ШИМ у которой большие коммутационные потери.

КПД мощных инверторов с высокочастотной ШИМ находится на уровне 90%, в то время как обычный инвертор выдает КПД на уровне 96%.

Вариантом повышения энергоэффективности системы электромеханической трансмиссии является оптимизация алгоритмов управления преобразователем частоты, путем введения двухконтурного управления. Функциональная схема электромеханической трансмиссии изображена на рис.3.4.

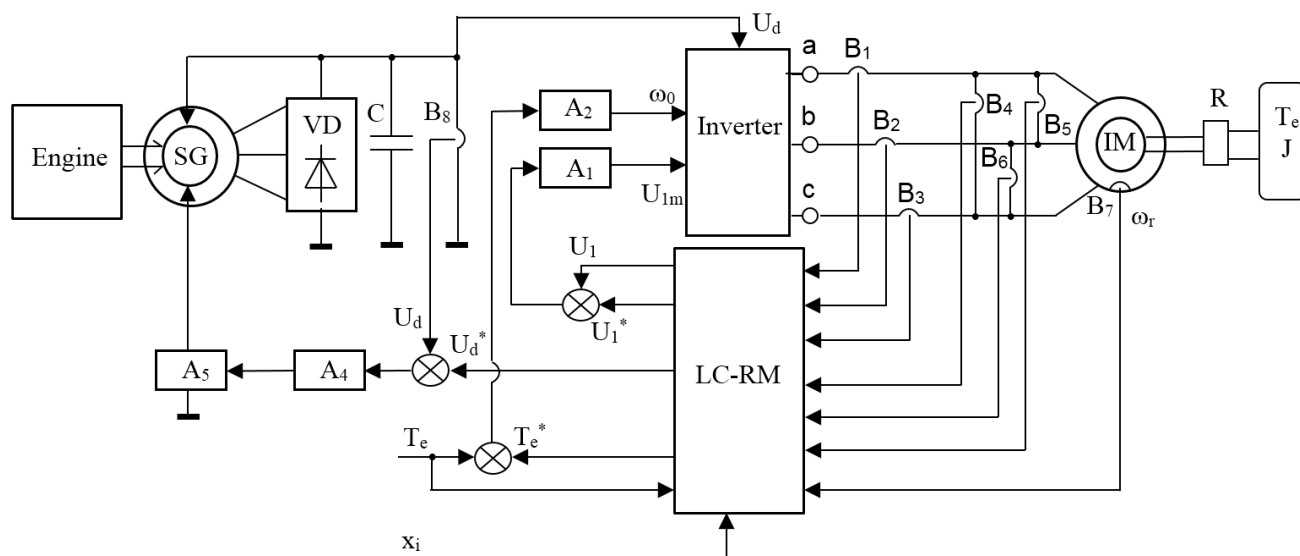


Рисунок 3.4 - Функциональная схема электромеханической трансмиссии

### 3.1 Двухконтурная система управления инвертором

Асинхронные двигатели промышленного применения, работающие на стандартной промышленной частоте не могут обеспечить необходимый для автомобиля диапазон скоростей [23]. Поэтому одним из основных каналов

управления тяговой индукционной машины является управление частотой питающего напряжения.

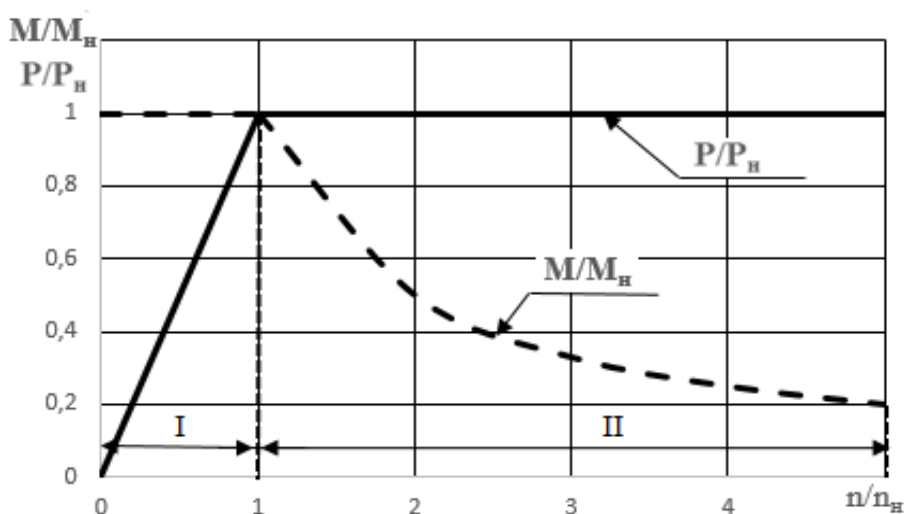


Рисунок 3.5 - Типовые режимы и характеристики тяговых электрических машин: I и II – первая и вторая зоны регулирования

Нагрузочный режим тягового электропривода характеризуется наличием двух зон регулирования, причем скоростной диапазон второй зоны в 4...5 раз превышает диапазон первой зоны (рис.3.5) [24, 25, 26].

Инвертор трансмиссии выполняет функцию преобразования постоянного напряжения  $U_d$  в трехфазное напряжение на клеммах a,b,c, регулирование этого напряжения осуществляется по частоте  $\omega_0$  и амплитуде  $U_{1m}$ . Амплитуда трехфазного напряжения тяговой СМ изменяется в скоростном диапазоне от 0 до 4000 оборотов в минуту в широких пределах от 0 до 650В. Формирование амплитуд низкого уровня из напряжения  $U_d$  звена постоянного тока  $U_d = 500...650В = const$  сопряжено с большими потерями мощности в инверторе. Высокая частота коммутации силовых транзисторов инвертора приводит к ряду нежелательных последствий, отмечается, что могут возникать резонансные явления в цепях коммутации при таких частотах, связанные с большим перенапряжением и выходом из строя коммутирующих транзисторов. Ниже кпд, больше потери связанные с нагревом БТИЗ (IGBT) транзисторов. Классический

мостовой инвертор, формирующий шести импульсное напряжение, удовлетворяет требованиям минимума коммутационных потерь.

Максимальная частота  $\omega_{0max}$  инвертора имеют непосредственную связь с числом пар полюсов индукционной машины (IM), передаточным числом редуктора (R), диаметром колеса и максимальной скоростью автомобиля. Редуктор R и число пар полюсов  $P_{IM}$  увеличивают  $\omega_0$  и электрическая частота  $f_0$  может достигать для грузовых автомобилей 300...400 Гц. Такие частоты являются предельно допустимыми для промышленных преобразователей частоты необходимой мощности [27].

Частота коммутации транзисторных ключей увеличивается в 6 раз при шести импульсной синусоиде напряжения. При этом возрастают коммутационные потери мощности пропорционально  $f^{1,5...2}$ . Электрические и коммутационные потери соответствуют в сумме требуемому КПД инвертора на уровне 96%. Но остается нерешенным вопрос амплитудного управления трехфазным напряжением. Управление амплитудой напряжения путем внутренней широтно-импульсной модуляции ступенчатой синусоиды требует увеличения частоты коммутации, которая может достигать 24 кГц, что приведёт к недопустимо большим потерям мощности в инверторе.

В функциональной схеме (см.рис.3.6) рассматривается другой путь решения амплитудного управления. Напряжение  $U_d$  шины постоянного тока автоматически регулируется под требуемую амплитуду  $U_{1m}$  по уравнению шести импульсной синусоиды

—

Управление осуществляется внешним замкнутым контуром с помощью регулятора  $A_5$  тока возбуждения. Цепь возбуждения генератора трансмиссии работает аналогично автомобильной генераторной установке малой мощности 1...3 кВт, обеспечивая широкий диапазон регулирования напряжения  $U_d$  и амплитуды  $U_{1m}$ . При этом имеет место и серьезный недостаток. Регулирование

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 45   |

выходного напряжения  $SG$  по обмотке возбуждения отличается малым быстродействием из-за большой постоянной времени цепи возбуждения. Такого быстродействия недостаточно для выполнения инвертором защитных функций от коротких замыканий в силовых звеньях и ударных нагрузок в механических узлах трансмиссии. Этот недостаток устраняется быстродействующим контуром прямого управления амплитудой  $U_{1m}$  с регулятором  $A_1$  (рис. 3.6). Кроме функций защиты (элементы токовой защиты не показаны), контур выполняет высокоточное регулирование амплитуды  $U_{1m}$  в малом диапазоне, обеспечивая повышенное качество управления координатами тягового электропривода.

Таким образом, оптимальное решение синхронизации, с целью повышения эффективности, заключается в том, что напряжение  $U_d$  звена постоянного тока, должно изменяться и оптимально соответствовать требуемой амплитуде напряжения  $SM$ . Генератор за счет изменения тока в обмотке возбуждения должен подстраиваться под частоту вращения ДВС и снимаемую мощность. В этом случае мы получаем минимальные потери мощности в инверторе и индукционной машине. Оптимальный вариант требует плавного регулирования напряжения  $U_d$  синхронизировано с требуемой амплитудой  $U_m$  машины. Так же возможно ступенчатое регулирование  $U_d$ , но этот вариант является менее энергоэффективным.

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 46   |

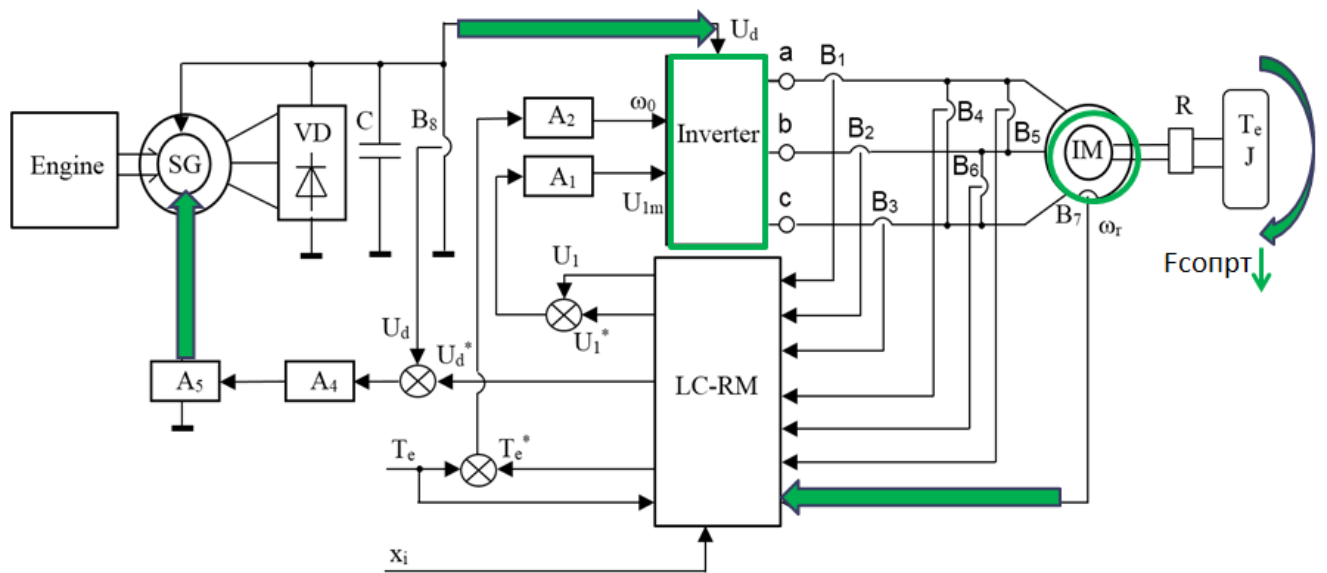


Рисунок 3.6 - Функциональная схема электромеханической трансмиссии

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе рассмотрены основные элементы силовой цепи электромеханической трансмиссии грузового автомобиля. Произведен выбор силовых звеньев тягового асинхронного электропривода, согласно требуемым параметрам карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн. Выбрана функциональная схема электромеханической трансмиссии по критериям наибольшей энергоэффективности. Разработана двухконтурная система управления тяговым электроприводом электромеханической трансмиссии. Она позволяет уменьшить потери в инверторе благодаря синхронизации напряжения шины постоянного тока  $U_d$  с требуемой амплитудой  $U_m$  тяговой машины.

В результате проделанной работы получена система управления тяговым электроприводом с повышенной энергетической эффективностью, и ее функциональная схема.

При выполнении выпускной квалификационной работы использовались такие программы как MathCAD и AutoCAD. С помощью данных программ производился расчет необходимых параметров для выбора основных элементов системы, а так же разработка функциональных схем тягового электропривода.

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 48   |



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 50369-92 Электроприводы. Термины и определения.
2. И.П. Ксенович, А.А. Ипатов, Д.Б. Изосимов. Технологии гибридных автомобилей: состояние и пути развития отечественной автомобильной техники с комбинированными энергоустановками//Мобильная техника, № 2—3, 2003 г.
3. Тяговый электрический привод: учеб. пособие для вузов / В. В. Бирюков, Е. Г. Порсев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 315 с.
4. История создания дизельного двигателя. Часть первая «Рудольф Дизель: великий изобретатель» 2017г.
5. Двигатель внутреннего сгорания. Учебное пособие. Глава 19 «Работа дизельного двигателя и диагностика неисправностей» Титаренко Д.И., 2014 г. – 327с.
6. Учебное пособие. James D. Halderman Automotive Technology; Principles, Diagnosis, and Service, 2012, Pearson Education, Inc
7. Гроэ Х., Русс Г. Бензиновые и дизельные двигатели/Х. Гроэ, Г. Русс - М.: За рулем, 2008г. – 272с
8. Луканин В. Н., Шатров М. Г, Двигатели внутреннего сгорания/В. Н. Луканин, М. Г. Шатров - М: Высш. школа, 2007г. – 400с
9. Интернет журнал. КПД ДВС. URL: <https://jrepair.ru/interesnoe-na-jrepair.ru/agregats/kpd-dvigatelya-benzinovyj-dizelnyj>, accessed Dec. 2019.
10. Инжиниринговая компания «AllGen». Рейтинг производителей промышленных двигателей. URL: <http://www.allgen.ru/analytics/rating-engines/>, accessed Dec. 2019.
11. Популярная электроника. «История электрического генератора» Становой С., 2012г.
12. Электротехника. Учебное пособие в трех книгах. Книга 2. Электрические машины. Промышленная электроника. Теория автоматического управления. Под ред. П.А. Бутырина. Челябинск – Москва. Издательство ЮУрГУ, 2004. – 711с.

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 49   |

13. И.И. Алиев. Электрические машины. – М.: РадиоСофт, 2011. – 448 с.
14. И.П. Копылов. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2009. – 608 с.
15. Жданович, Ч. И. Выбор мощности генератора электромеханической трансмиссии / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Автомобиле- и тракторостроение : материалы Международной научно-практической конференции / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 53-57.
16. Шевченко А.Ф. Многополюсные магнитоэлектрические генераторы. Электротехника – 1997. - №9.
17. Гельман М.В. Преобразовательная техника. Издательство ЮУрГУ 2004г.
18. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
19. Глазенко, Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока / Т.А. Глазенко. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с.
20. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
21. Терехов, В.М. Элементы автоматизированного электропривода / В.М. Терехов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
22. А.С. Анучин, Состояние и перспективы развития городского гибридного электрического тягового электропривода в России, АЭП – 2014, Том 2, стр 24.
23. Bosch generator catalogue. URL: <https://ru.bosch-automotive.com/ru> accessed Apr. 2019.
24. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболевская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник». М.: Энергоатомиздат, 1982. - 504 с.
25. Borg Warner Inc. URL: <https://www.borgwarner.com/en/home>, accessed Oct. 2019.
26. Remy Power Products. URL: <https://www.remyinc.com>, accessed Oct. 2019.

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 50   |

27. Kobelev A.S., Makarov L.N., “Two design concepts for a traction asynchronous motor for an electric vehicle”. Proceedings of the IX International (XX All-Russian) conference on the automated electric drive AEP-2016 Perm, October 3–7, 2016

|      |      |          |         |      |                                 |      |
|------|------|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|      |      |          |         |      | <b>13.03.02.2019.213 ПЗ ВКР</b> | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                                 | 51   |