

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки)

Техническое и информационное обеспечение интеллектуальных систем электроснабжения  
(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Модернизация преобразовательных установок для асинхронных двигателей

Обучающийся

И.А. Смирнов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

д.т.н., профессор, П.А. Николаев

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Содержание

Введение.....	4
1 Характеристика асинхронных двигателей и преобразователей частоты.....	8
1.1 Асинхронный двигатель. Общая информация.....	8
1.2 Основные сведения о частотно-регулируемом электроприводе .....	14
1.3 Конструкция преобразователя частоты .....	17
1.4 Выбор оптимальной частоты широтно-импульсной модуляции.....	18
1.5 Применение активного выпрямителя .....	19
1.6 Моделирование преобразователя частоты .....	20
1.7 Безопасность в ПЧ .....	21
1.7.1 Защита от возгорания. ....	22
1.7.2 Электробезопасность.....	23
1.7.3 Эксплуатационная безопасность.....	23
1.8 Как работает преобразователь частоты. ....	24
1.9 Принцип работы автономного инвертора. ....	27
1.10 Тормозной режим работы асинхронного двигателя. ....	30
1.11 Общее о Фильтрах .....	33
1.11.1 Входные фильтры .....	33
1.11.2 Выходные фильтры.....	34
1.12 Поломки и ошибки преобразователя частоты .....	36
1.12.1 Загрязнения.....	36
1.12.2 Коррозия .....	37
1.12.3 Неверный монтаж.....	37
2 Техническое решение по управлению асинхронными двигателями.....	39
2.1 Векторное управление .....	39
2.2 Основные принципы векторного управления.....	39
2.3 Автоматическое регулирование .....	40
2.4 Управление скоростью и положением АД.....	41
2.5 Измерение напряжения .....	43
2.6 Измерение положения и скорости.....	43
2.7 Магнитные датчики положения .....	44
2.8 Базовые характеристики двигателя (асинхронного, с короткозамкнутым ротором) .....	45
2.9 Обзор работы выпрямительного блока.....	47

2.9.1 Характеристики формы колебаний.....	48
2.9.2 Принципы работы блока выпрямителя .....	49
2.10 Принципы работы сглаживающего контура .....	51
2.10.1 Цепь ограничения бросков пускового тока.....	51
2.10.2 Как получить переменное напряжение из постоянного .....	52
2.11 Разновидности преобразователей частоты.....	57
3 Модернизация преобразователей частоты .....	76
3.1 Принципиальная схема преобразователя частоты .....	76
3.2 Применение внешних приборов.....	82
Заключение .....	85
Список используемой литературы .....	86

## **Введение**

Рациональное использование электроэнергии - это проблема которая была, есть и будет актуальной, особенно в промышленности. Основные потребители электроэнергии на производстве являются трехфазные электродвигатели переменного тока, а именно асинхронные двигатели, разнообразные насосы, и другое промышленное оборудование. Асинхронные двигатели отличаются высокой простотой и надежностью, что делает их выгодными и более привлекательными чем двигатели постоянного тока. Кроме того, они имеют более компактный размер и легче по массе, чем двигатели постоянного тока, что позволяет снизить расходы на оборудование.

Асинхронный двигатель имеет недостаток - его скоростью сложно управлять с помощью традиционных методов, таких как изменение напряжения или добавление сопротивления в цепь обмотки. До недавних времен, использование асинхронных двигателей на производстве использовались обычно в нерегулируемых электроприводах, запуск которых происходил прямым подключением в сеть.

На деле, эффективное управление двигателями представляет не легкую задачу и требует применения специальных систем управления. Современный электропривод представляет собой единое целое электромашин, силового преобразователя и системы управления.

Применение преобразователя частоты (ПЧ) на асинхронных двигателях позволяет обеспечить плавную работу оборудования, избежать перегрузки питающей сети в момент пуска.

Анализ мирового опыта, создания нового и модернизация действующего оборудования промышленных предприятий показывает высокую динамику внедрения в электрооборудование промышленности частотных преобразователей.

«Регулирование скорости двигателей переменного тока изменением

частоты подводимого к статору напряжения по существу весьма экономично и может обеспечить плавное регулирование в широких пределах. Для обеспечения этого способа регулирования скорости необходимо преобразовательное устройство, позволяющее плавно регулировать частоту и по соответствующему закону изменять при этом напряжение переменного тока» [16].

Развитие технологий, как и везде, нуждаются в изучении и не стоят на месте. Сфера полупроводниковых элементов и микропроцессорной техники позволяет, в настоящее время создавать частотные преобразователи, которые имеют низкую стоимость, высокую надежность и широкие возможности.

Большинство промышленных предприятий, находящихся в СНГ, уже требуют замены устаревших средств автоматизации и управления, поэтому данная проблема является актуальной.

Целью диссертации является изучение асинхронного двигателя и существующих методов управления им при помощи преобразователя частоты, а далее рассмотрение конструкции преобразователя частоты и создание для него схемы управления. Поиск ошибок и неисправностей в уже существующих преобразователях частоты.

Для достижения поставленной цели нам перед нами стоят следующие задачи:

- исследование асинхронного двигателя;
- изучение конструкции асинхронного двигателя;
- исследование преобразователя частоты;
- изучение преобразователей частоты;
- разработка схемы управления;

Существует множество вариантов современных преобразователей частоты, которые отличаются разнообразием моделей и функциональными возможностями. В зависимости от поставленной задачи - необходимо выбрать оптимальную модель преобразователя частоты, для этого придерживаясь основных критериев выбора.

Чтобы выбрать нам преобразователь частоты, нам необходимо знать для какого оборудования выбирается преобразователь частоты. Какие задачи должны быть выполнены. Для этого нам надо знать параметры оборудования и условия, в котором будет преобразователь частоты находится.

«Мощность ПЧ должна быть либо равна мощности двигателя, либо превышать ее. В случаях «тяжелого» применения, с высокими пусковыми нагрузками, допускается, чтобы мощность преобразователя была выше на одну, реже – на две ступени. Современные преобразователи частоты имеют большой диапазон мощности» [6]. Обратимся к конкретным примерам оборудования: в линейке серии CONTROL-A310 представлены модели с мощностью от 0,4 до 22 кВт в режиме HD и от 0,75 до 22 кВт в режиме ND. Преобразователи частоты CONTROL-L620 поддерживают мощность в режиме HD от 0,75 до 500 кВт, в режиме ND — от 1,5 до 560 кВт. Есть более «узкий» разбег: например, ПЧ линейки ONI-A400 работают в пределах мощности от 0,2 до 3,7 кВт.

«Если говорить о напряжении питающей сети, то самыми распространенными моделями, которые используются на производстве, в ЖКХ и прочих сферах народного хозяйства, являются преобразователи напряжения на 220 и 380 В» [3].

Актуальность исследования: улучшение качества, повышение конкурентоспособности и экономичности являются главными целями модернизации электротехнической продукции. Для достижения этих целей необходимо уделять постоянное внимание и решать соответствующие задачи. Качество выпускаемой продукции является ключевым фактором конкурентоспособности товаров, а конкуренция играет важную роль в рыночной экономике. Экономический успех предприятий зависит от высокого качества и эффективности производства. Особое значение при этом имеет модернизация асинхронных двигателей, которые являются основной составляющей современной электротехнической продукции.

Развитие асинхронных двигателей неразрывно связано с постоянным

совершенствованием систем электропривода. Безопасность, стабильность и бесперебойность технологических процессов зависят от качественной и надежной работы электроприводов. На данный момент векторное управление асинхронными двигателями не стоит на месте и успешно развивается. Возможность применения векторного управления зависит от возможности применения таких систем с асинхронными двигателями. Следовательно, разработка и исследование векторного управления является актуальной и перспективной задачей.

«На актуальность цели указывает не малое количество публикаций, в различных научных изданиях посвящённых данной тематике, как в России, так и за рубежом. Стоит отметить, что особое внимание уделено наиболее перспективным на данный момент, методам пространственно-векторной модуляции» [1].

# 1 Характеристика асинхронных двигателей и преобразователей частоты

## 1.1 Асинхронный двигатель. Общая информация

Асинхронный электродвигатель состоит из рамки с проводами, которые создают электрический ток при подключении к источнику питания, и статора с вращающимся магнитным полем. Рамка вращается в этом переменном магнитном поле, что вызывает появление электромагнитной силы в проводах рамки и ее вращение вокруг своей оси. Однако на практике данная модель не применяется в промышленности из-за своей низкой эффективности и других технических ограничений. На рисунке 1 можно увидеть устройство более современной и действующей модели

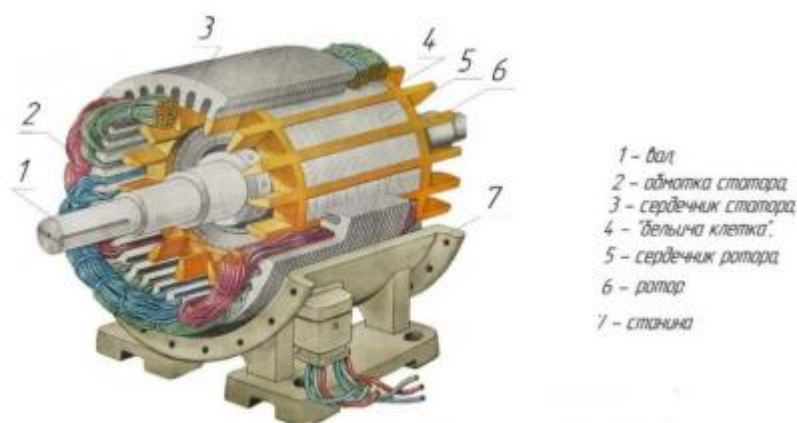


Рисунок 1 - Устройство асинхронного электродвигателя

Корпус станины 7, в котором размещается весь электродвигатель, имеет главную задачу - обеспечить достаточную механическую прочность, чтобы выдерживать необходимые усилия. «Чем выше мощность двигателя, тем больше прочности должна иметь станина и корпус» [1]. Внутри корпуса



устанавливается сердечник статора 3, который выполняет роль магнитного проводника для силовых линий рабочего поля. Для уменьшения потерь магнитопровод выполнен наборным, из шихтованных листов. Однако, в некоторых моделях используется и монолитный вариант.

«В сердечник статора электродвигателя укладывается обмотка 2, которая служит для пропуска электрического тока и формирования электродвигательной силы (ЭДС). «Число витков в этой обмотке зависит от количества пар полюсов на каждую фазу» [1]. Помимо этого, в зависимости от расположения и структуры обмоток, электродвигатели могут быть разных типов. Например, в части уложенных обмоток можно выделить два основных типа: кольцевые и продольные. В кольцевых обмотках витки расположены по кольцу вокруг сердечника, а в продольных - продольно по длине сердечника. Эти типы обмоток имеют различные характеристики и применяются в разных типах электродвигателей в зависимости от требуемых параметров работы. Также в части уложенных обмоток электродвигатели подразделяются на трехфазные, двухфазные, однофазные.

Внутри статора располагается подвижный элемент – ротор 6.

«Ротор электродвигателя может быть построен двумя способами: короткозамкнутым и фазным». На рисунке 1 показан первый вариант, где ротор состоит из сердечника 5, сделанного из шихтованной стали, и беличьей клетки 4. Обе части насажены на металлический вал 1, который передает вращение и механическую силу» [3].

При подаче электрического тока на обмотки статора создается магнитный поток. Разные фазы обмоток статора смещены друг относительно друга на 120 градусов, что заставляет поток в обмотках вращаться. Если ротор является короткозамкнутым, то в результате такого вращения в роторе возникает ток, который создает свое собственное магнитное поле. Взаимодействие этого поля с полем статора приводит к вращению ротора и, следовательно, вращению всего электродвигателя.

Существует понятие скольжение, которое применимо к асинхронному

двигателю. Оно означает, что «относительная разность скоростей вращения ротора и частоты переменного магнитного поля - это и есть скольжение асинхронного двигателя» [13].

В чем смысл и какие плюсы от перехода с синхронных электродвигателей или двигателей с фазным ротором на асинхронные?

Этот сдвиг можно объяснить разными причинами, и большинство из них связано с экономией и большим скачком развития в системах управления. «Асинхронные двигатели более компактны и требуют меньшего обслуживания, нежели двигатели с фазным ротором или синхронные электродвигатели с щетками. Да, и в целом, если сравнить цену асинхронного и синхронного двигателя одинаковой мощности и напряжения, то выбор станет очевидным» [3].

Существует несколько способов включения и поддержания работы электродвигателя. Один из наиболее распространенных способов - это «прямой пуск через электромагнитный пускатель. При таком включении, на двигатель подается полное напряжение, что позволяет ему достичь максимальной скорости в кратчайшие сроки» [20].

«Существует проблема с которой сталкиваются операторы, и она довольно серьезная: при прямом пуске импульс пускового тока может в 7 раз превышать ток полной нагрузки двигателя. В короткий промежуток времени на двигатель и его агрегаты подается очень сильный импульс тока» [1]. Если так будет происходить на регулярной основе, то в один из прекрасных дней, при запуске или остановке электродвигателя он просто сломается, вследствие чего также может выйти из строя присоединенный механизм работающий от него.

Применяя устройство ПЧ, которое сокращает пусковые токи в несколько раз, уменьшая скорость вращения вала и нагрузку. Применив ПЧ, мы можем задать скорость разгона двигателя, задавая параметры на устройстве плавного пуска. Это служит для того, чтобы человек мог установить определенное время, в течение которого двигатель будет плавно

разгоняться или тормозить. Это помогает снизить пусковой ток, что в свою очередь позволяет снизить риск выхода из строя оборудования и экономить электроэнергию.

Как мы уже знаем преобразователь частоты или частотный преобразователь - это устройство, служащее для изменения и поддержания скорости или момента электрической машины (двигателя, насоса и тд.).

«Современный частотный инвертор состоит из двух принципиальных блоков (рисунок 2). Первый блок полностью сглаживает напряжение и на выходе выдаёт постоянное. Постоянное напряжение подаётся на силовой блок генерации частоты. После преобразования, на выходе из второго блока частота напряжения уже будет такая, какая задана настройкой. За возможность изменять частоту напряжения отвечает микропроцессор, который встроен» [11] в преобразователь частоты. Используя свою программу, он следит за параметрами, приходящими к нему от различных датчиков.

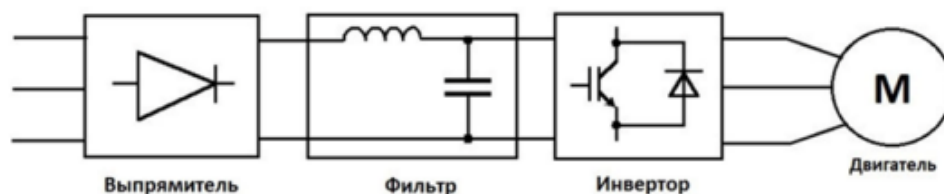


Рисунок 2 - Схема работы частотного преобразователя

В определенные моменты времени на производстве может возникнуть необходимость запускать оборудование с максимальной производительностью, а затем работать на нагрузке, меньше номинальной. Использование частотных преобразователей становится популярным в таких случаях. Поскольку на пониженных оборотах можно значительно сократить расходы на электроэнергию и эксплуатацию оборудования. Таким образом,

частотные преобразователи представляют собой эффективное решение для обеспечения более эффективного и экономического использования оборудования в различных условиях работы. «Помимо функции энергосбережения большинство ЧРП позволяют оператору устанавливать различные параметры для ограничения крутящего момента. Это делается путем ограничения выходного тока на двигателе» [3].

Частотный преобразователь (ЧРП) - это новая «концепция, которая позволяет оператору контролировать пусковой ток и скорость вращения электродвигателя. ЧРП может управлять двигателем как во время запуска/остановки, так и в течение всего периода его работы. Это особенно полезно, когда необходим полный контроль скорости, а главной проблемой является высокое потребление энергии» [3].

Помимо этого, «аналоговые выходы ЧРП могут иметь обратную связь с системой управления предприятия. При изменении технологического процесса, например, при необходимости изменить скорость, система управления установкой сама может передать сигнал в соответствии с назначенной уставкой» [21].

На сегодняшний день частотные преобразователи достигли высокой степени развития, что позволяет использовать их для управления моментом вращения вместе с двигателем без дополнительных настроек. Оператор может установить нужную скорость удаленно, и частотный преобразователь будет ее поддерживать, используя внутренний цикл ПИД. Некоторые приводы имеют возможность настройки графика работы по часам и могут также подключать другие электромашины в онлайн-режиме при необходимости.

«Встроенный вход/выход ЧРП – не единственный способ управления приводом. Многие из них позволяют использовать различные протоколы связи, которые могут управлять ЧРП с контроллеров большинства производителей. Все стандартные протоколы доступны для большинства ЧРП, что позволяет оператору иметь двунаправленную связь одним кабелем.

Почему это важно? Благодаря использованию одного кабеля, в отличие от прокладывания нескольких проводов, затраты на установку ЧРП сводятся к минимуму, и по этому кабелю может передаваться гораздо больший объем данных. Эти данные относятся не только к расширенному управлению, но и к мониторингу. Обычно операторы следят за скоростью, крутящим моментом, током и температурой привода» [4].

Благодаря этому, расходы на техническое обслуживание могут быть значительно снижены из-за уменьшения износа оборудования благодаря контролируемому пуску и многим другим изменениям описанных ниже.

В заключение можно сказать, что «в последние два десятилетия регулируемый асинхронный электропривод претерпел столь существенные изменения в своем развитии, что полностью вытеснил из многих областей синхронный привод и привод постоянного тока. Это связано прежде всего с достижениями в области силовой электроники и микропроцессорной техники, на основе которых были разработаны преобразователи частоты, обеспечивающие управление асинхронными короткозамкнутыми двигателями с энергетическими и динамическими показателями, соизмеримыми или превосходящими показатели других приводов. Высокая скорость обработки информации современными процессорами дала толчок развитию старых и разработке новых алгоритмов управления системой преобразователь-двигатель.

Сегодня частотное управление является для асинхронного привода своего рода техническим стандартом. В то же время практически вышли из употребления и не используются в современных разработках такие способы управления и устройства как симметричное и несимметричное управление напряжением, управление введением добавочных сопротивлений в цепи статора и ротора, управление изменением числа пар полюсов и др» [12].

## 1.2 Основные сведения о частотно-регулируемом электроприводе

Согласно ГОСТ 23414-84 «полупроводниковый преобразователь частоты - полупроводниковый преобразователь переменного тока, осуществляющий преобразование переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты» [4].

Раньше управление асинхронным двигателем в частотном режиме было сложной задачей, которую начали изучать в 30-х годах. Однако, разработка преобразователей частоты была дорогостоящей процедурой, так как их стоимость была высока. Только с появлением схем питания на IGBT-транзисторах и созданием эффективных микропроцессорных схем управления могут появиться доступные и действительно эффективные преобразователи частоты. Это позволило компаниям в Европе, США и Японии разработать доступные и экономичные преобразователи частоты.

Как мы знаем, «регулировка частоты в механизмах происходит при применении различных устройств, механических вариаторов, гидравлических муфт, дополнительно вводимыми в статор или ротор резисторами, электромеханическими преобразователями частоты, статическими преобразователями частоты. Применение первых 4-х устройств не является высококачественным, неэкономичным, требует много финансов и больших затрат при монтаже и эксплуатации» [11].

Статические преобразователи частоты являются наиболее совершенными устройствами управления асинхронным приводом в настоящее время.

Принцип частотного метода регулирования скорости асинхронного двигателя заключается в том, что, изменяя частоту  $f_1$  питающего напряжения, можно в соответствии с выражением 1, при неизменном числе пар полюсов  $p$  изменять угловую скорость магнитного поля статора.

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} \quad (1)$$

«Этот метод позволяет регулировать скорость работы двигателя в широком диапазоне без увеличения скольжения, что минимизирует потери мощности. Однако, для достижения высоких показателей эффективности асинхронного двигателя, таких как коэффициент мощности, полезное действие и перегрузочная способность, необходимо одновременно изменять и частоту подачи напряжения. Это позволяет достичь более высоких значений КПД и других характеристик работы двигателя» [13].

Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки  $M_c$ . При постоянном моменте нагрузки ( $M_c$  равно  $const$ ) напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте:

$$\frac{U_1}{f_1} = const \quad (2)$$

Это состояние имеет вид: вентиляторного характера момента нагрузки

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const \quad (3)$$

При моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости:

$$\frac{U_1}{f_1} = const \quad (4)$$

Таким образом, для плавного регулирования частоты вращения вала асинхронного электродвигателя, преобразователь частоты должен обеспечивать одновременное регулирование частоты и напряжения на статоре асинхронного двигателя.

«Особый экономический эффект от использования преобразователей

частоты дает применение частотного регулирования на объектах, обеспечивающих транспортировку жидкостей. До сих пор самым распространённым способом регулирования производительности таких объектов является использование задвижек или регулирующих клапанов, но сегодня доступным становится частотное регулирование асинхронного двигателя, приводящего в движение, например, рабочее колесо насосного агрегата или вентилятора.

Перспективность частотного регулирования» [20] видна из рисунка 3.

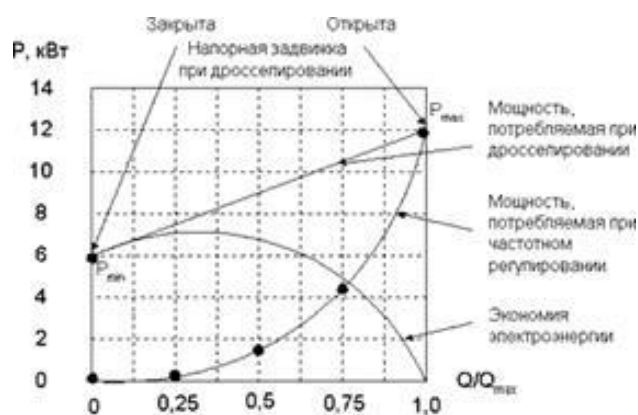


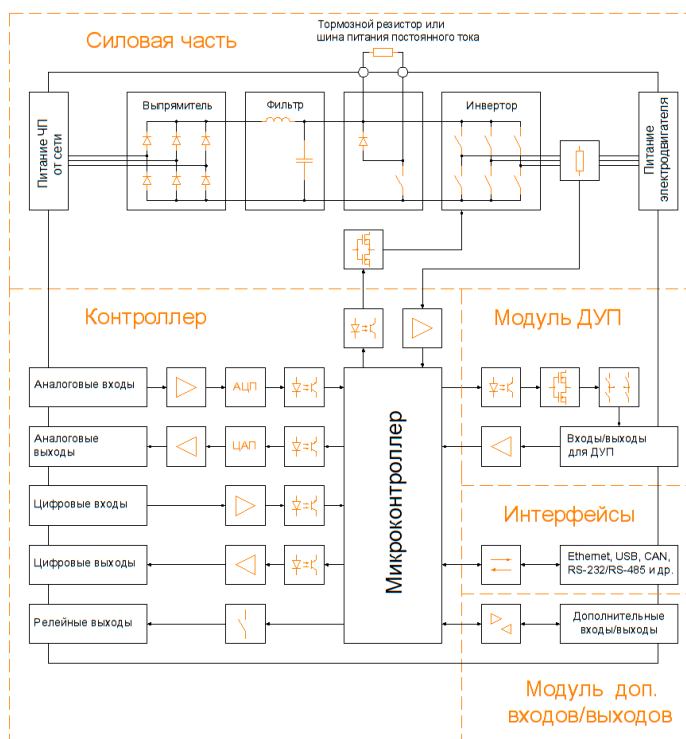
Рисунок 3 – Зависимость экономии электроэнергии от потребляемой мощности.

Таким образом, при дросселировании поток вещества, сдерживаемый задвижкой или клапаном, не совершает полезной работы. Применение регулируемого электропривода насоса или вентилятора позволяет задать необходимое давление или расход, что обеспечит не только экономию электроэнергии, но и снизит потери транспортируемого вещества.

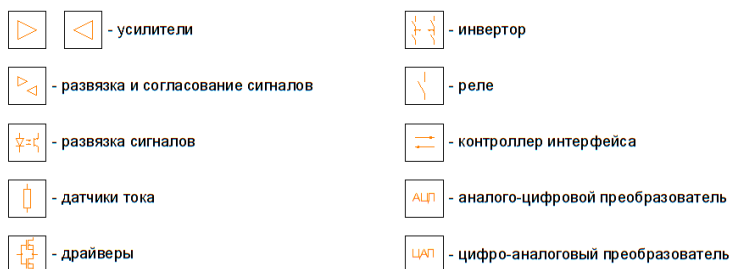


### 1.3 Конструкция преобразователя частоты

«Основными элементами частотного преобразователя являются силовая часть (преобразователь электрической энергии) и управляющее устройство (контроллер) видно на рисунке 4.



Обозначения:



ЧП - частотный преобразователь

ДУП - датчик угла поворота

Рисунок 4 - Строение частотного преобразователя

Современные частотные преобразователи обычно имеют модульную архитектуру, что позволяет расширять возможности устройства. Также зачастую имеется возможность установки дополнительных интерфейсных модулей и модулей расширения каналов ввода/вывода» [10].

## 1.4 Выбор оптимальной частоты широтно-импульсной модуляции

В современном электроприводе, для управления асинхронным двигателем применяется схема преобразователь частоты – асинхронный двигатель, в которой регулирование скорости и момента двигателя осуществляется изменением частоты питающего напряжения. Преобразователи частоты ведущих производителей, таких как Vacon, ABB, Schneiderelectric, создаются со средним звеном постоянного тока.

Для преобразования постоянного тока в переменный, чаще всего применяется неуправляемый выпрямитель, что обусловлено, в первую очередь простотой реализации и дешевизной в производстве. Преобразование из постоянного в переменный осуществляется автономным инвертором напряжения, в качестве вентилях чаще всего применяются IGBT-транзисторы, позволяющие использовать широтно-импульсную модуляцию, для улучшения динамических характеристик двигателя.

При применении схемы преобразователь частоты - асинхронный двигатель (рисунок 5) возникает две возможности для увеличения энергоэффективности схемы:

- выбор оптимальной частоты широтно-импульсной модуляции;
- применение активного выпрямителя в преобразователе частоты;

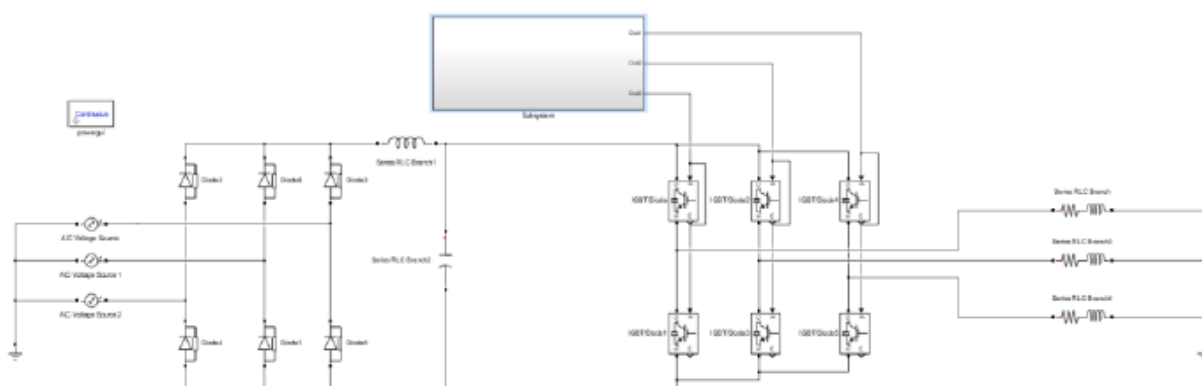


Рисунок 5 - Модель преобразователя частоты с неуправляемым выпрямителем

При преобразовании постоянного тока в переменный происходящем в преобразователе частоты, питающее напряжение приобретает высшие гармоники, негативно сказывающиеся на синусоидальности напряжения, а, следовательно, и на коэффициенте полезного действия двигателя.

Для формирования кривой выходного тока используют ШИМ, что позволяет уменьшить не синусоидальность питающего тока, за счет отсутствия влияния высших гармоник в моменты нулевых пропусков. Чем выше несущая частота ШИМ, тем меньшее влияние на выходное напряжение оказывают высшие гармоники, однако, несущая частота ШИМ на прямую зависит от коммутации в преобразователе. При высокой частоте коммутации, увеличивается динамические потери в инверторе, в следствии чего, выбор максимальной или минимальной частоты не является оптимальным.

Таким образом, необходимо найти частоту, при которой суммарные потери минимальны.

### **1.5 Применение активного выпрямителя**

Так же, для увеличения энергоэффективности системы возможно построение преобразователя частоты с применением управляемого выпрямителя. Выпрямитель строится на IGBT-транзисторах, работающих в релейных или импульсно-модуляционных режимах широтно-импульсной модуляции.

Применение активного выпрямителя позволяет использовать высокодинамичное управление по DTC-алгоритмам, способное быстро реагировать на изменение нагрузки и напряжение питания.

Таким образом, можно избежать оптимизации механической части привода, установок редукторов или передач не требуется, так же можно отказаться от установки разрядных сопротивлений.

Наибольшим возможным напряжением для работы по алгоритмам DTC является 6кВ (преобразователь ACS 1000 фирмы ABB).

Для обеспечения работы DTC – алгоритмов необходимо построение электронной модели двигателя для вычисления координат вектора потокосцепления статора, электромагнитного момента, а также частоты вращения ротора для бездатчиковых систем.

Согласно координатам вектора потокосцепления, определяется алгоритм включения в работу вентиля преобразователя, для его перемещения в заданном направлении.

## **1.6 Моделирование преобразователя частоты**

Для исследования эффективности данных алгоритмов управления целесообразно провести исследование модели преобразователя частоты в пакете Simulink.

Для моделирования питающей сети используются три источника переменного напряжения соединенные в звезду с заземленной нейтралью.

Модель преобразователя частоты копирует его типовые элементы и способ их соединения. Неуправляемый или активный трехфазный мостовой выпрямитель, далее звено постоянного тока с LC фильтром и трехфазный автономный инвертор напряжения на IGBT-транзисторах. Их использование обусловлено наибольшей возможной частотой коммутации среди полупроводниковых элементов с подходящим, для задач силовой электроники, номинальным режимом работы. Параллельно с ними в противоположном направлении включены диоды, для осуществления вывода тока статора на разрядные сопротивления.

Асинхронный двигатель заменен на трехфазную активно-индуктивную нагрузку, соединенную в звезду, что является достаточным уровнем моделирования нагрузки для данного исследования. Путем изменения сопротивления и индуктивности системы, возможна имитация нагрузки на вал двигателя.

Используя данную модель (рисунок 6), возможно получить вывод об

эффективности подбора частоты широтно-импульсной модуляции и сведения об энергоэффективности преобразователя частоты с неуправляемым выпрямителем.

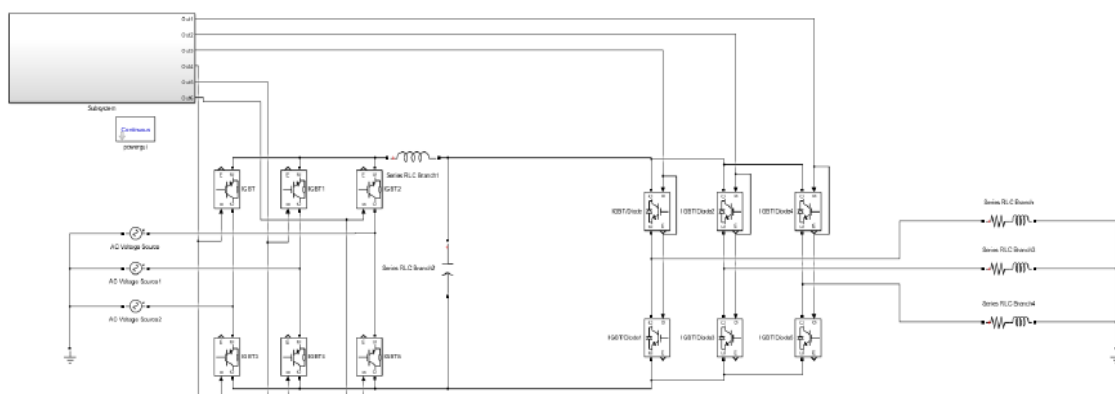


Рисунок 6 - Модель преобразователя частоты с активным выпрямителем

Сравнив результаты моделирования схем с рисунка 5 и рисунка 6 возможно определить целесообразность применения активного выпрямителя в преобразователе частоты. В данном случае важнейшим параметром для исследования является гармонический состав тока питающей сети. «Изменение качества напряжения асинхронного двигателя, может быть обусловлено, как возможностью рекуперации энергии в сеть, так и улучшением качества напряжения в звене постоянного тока» [13].

### 1.7 Безопасность в ПЧ

Сначала о сохранности самого преобразователя. Всегда надо помнить о такой вещи как реформинг. Может случиться так, что высоковольтные электролитические конденсаторы, установленные в ЧП, где-то долго хранились, или сам ЧП не был подключен в сеть более года. В таком случае у конденсаторов истончается диэлектрический слой, и они могут не выдержать

быстрой подачи на них полного номинального напряжения и рабочего тока. Тогда требуется реформинг или, иными словами, осторожное постепенное включение.

### 1.7.1 Защита от возгорания.

Защита от возгорания организуется несколькими способами. Сами печатные платы должны быть изготовлены по соответствующей технологии и иметь UL маркировку. Далее необходимо обеспечить ширину силовых проводников на плате, исключая их возгорание раньше, чем произойдет выключение внешних силовых расцепителей.

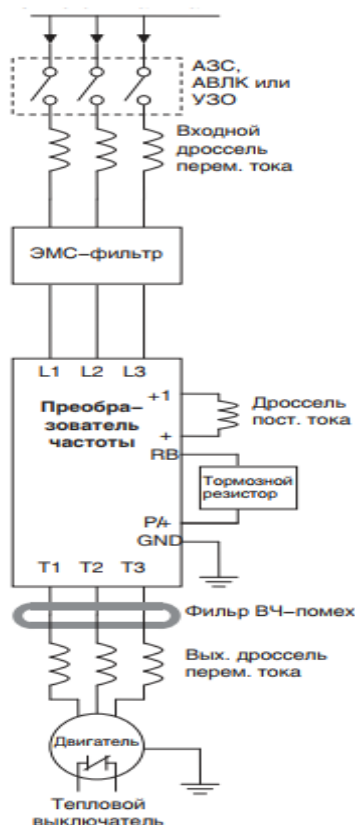


Рисунок 7 - Схема обвеса частотного преобразователя

На рисунке 7 полная эталонная схема обвеса частотного преобразователя, не снабженного ККМ (без отображения цепей безопасности)

### 1.7.2 Электробезопасность.

Необходимо, чтобы корпус ПЧ был заземлен. Для защиты от кратковременных перенапряжений на входе ПЧ могут использоваться варисторы, однако они не способны защитить от длительных перенапряжений, которые могут привести к сгоранию варисторов и образованию проводящей сажи. В данном случае решением проблемы является надежное заземление (рисунок 8).

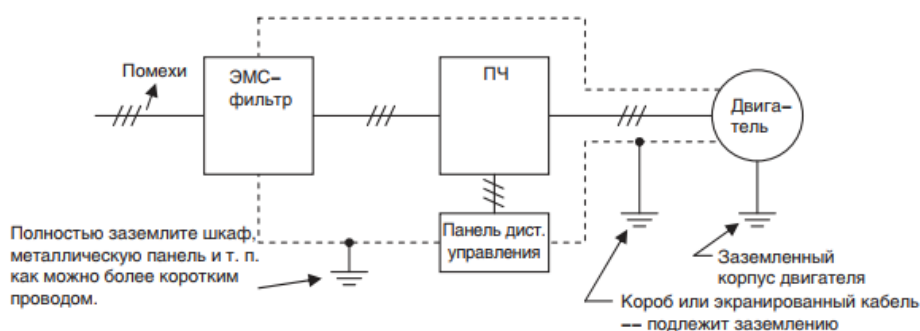


Рисунок 8 – Схема подключения

Однако стоит учитывать, что использование чувствительных реле утечки на частотные преобразователи не рекомендуется из-за большой емкости мотора относительно земли, что может вызвать утечку большую, чем уровень срабатывания реле. Поэтому необходимо обеспечить максимально надежное заземление.

Также следует помнить, что заземление само по себе не обеспечивает защиту от электромагнитных помех, генерируемых цепью заземления. Поэтому информационные кабели, расположенные рядом с цепью заземления или заземляющими конструкциями, должны иметь свои экраны, подключенные к собственным локальным землям, и эти экраны не должны образовывать замкнутых контуров.

### 1.7.3 Эксплуатационная безопасность.

На различных роботизированных объектах, таких как станки, агрегаты,

краны и эскалаторы, установлены средства экстренной остановки в виде концевиков, датчиков, микровыключателей и других устройств. Эти устройства объединены в электрическую цепь безопасности, которая заканчивается контакторами, реле или другими приемниками, которые отключают подачу тока на электродвигатели при возникновении аварийной ситуации.

Чтобы пассажиры или операторы могли активировать экстренную остановку, на всех устройствах устанавливаются крупные красные кнопки. Также на некоторых устройствах есть узел STO (SafeTorqueOff) в качестве расцепителя на частотных преобразователях. Обычно для дублирования систем безопасности используются два входа STO, однако в некоторых ЧП может быть только один вход. В этом случае для дублирования системы безопасности требуется внешний контактор, который разрывает цепь питания к ЧП при обрыве цепи безопасности в соответствии со стандартами.

### **1.8 Как работает преобразователь частоты.**

Свои корни преобразователь частоты брал от инвертора двойного преобразования. Способ работы которого был в том, что

- входной синусоидальный ток выпрямляется диодами;
- следом идут конденсаторы фильтрующие до минимума различные импульсы напряжения;
- затем на микросхемы и транзисторы подается  $U$ , делающее из него трехфазную волну с заданными параметрами;
- в конце синусоидальное  $U$  превращает в себя прямоугольные импульсы.

В преобразователях частоты сетевое напряжение подается непосредственно на сам асинхронный двигатель через управляемые контакты. Преобразователь частоты выполнен с использованием схем, состоящих из 3-х фаз, которые изменяют напряжение с 3-х фаз в одну фазу.



На рисунке 7а показана схема данного преобразователя частоты. В природе есть 2 вида сигнала управления – это синусоидальное (в виде синусов) и прямоугольное (в виде прямоугольников). «При прямоугольном управлении в течение полуволны тока на один конец подаются управляющие импульсы с углом управления (углом задержки)  $\alpha = \text{const}$  пока этот комплект работает в выпрямительном режиме, а затем наступает угол управления (углом опережения)  $\beta = \alpha$ , когда для снижения тока необходим переход в инверторный режим» [9] (рис. 7 б).

«При синусоидальном управлении угол управления  $\alpha$  бесперебойно меняется так, чтобы выходное напряжение изменялась по синусоидальному закону» [9] (рисунок 9в).

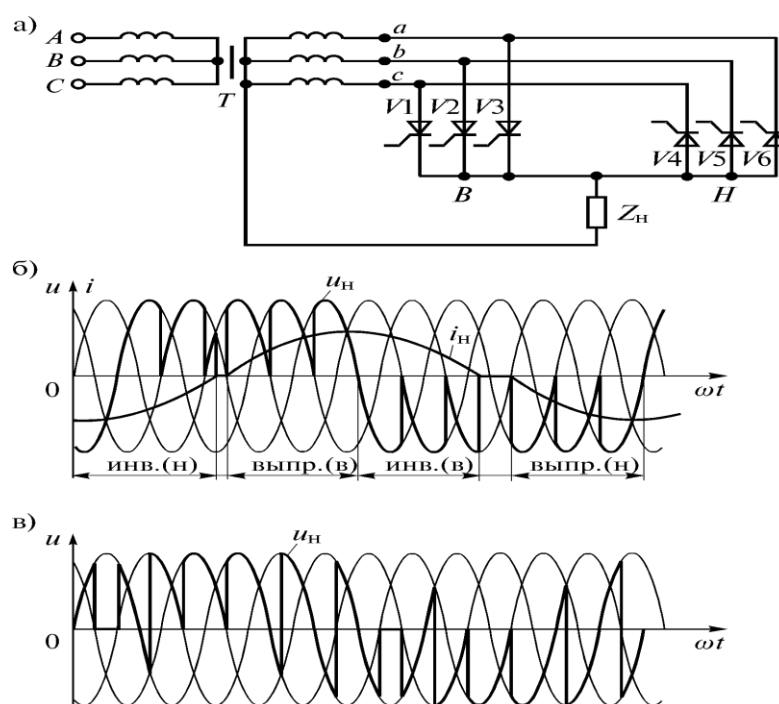


Рисунок 9 - Схема трехфазно-однофазного ПЧ (а), диаграммы напряжения нагрузки при прямоугольном управлении (б) и диаграммы напряжения на нагрузке при синусоидальном управлении(в)

Отрицательные черты ПЧ - низкий минимальный порог частоты в 15 Гц при нулевых схемах и 15 Гц при мостовых схемах, низкий

коэффициент мощности, вызванный постоянным изменением угла управления.

Положительные черты ПЧ: однородность применяемых устройств, однократное преобразование энергии, позволяющие получить наибольший КПД, плавное регулирование скорости вращения двигателя, дешевле и надёжнее, преобразователи частоты в составе с АД могут вполне использоваться для замены электродвигателей постоянного тока, модернизация может производиться без перерыва в работе.

«Фазовое регулирование может быть применено для регулирования скорости асинхронного двигателя. Такое регулирование применяется очень широко и повсеместно, да практически при каждом случае, в устройствах для ограничения пусковых токов в асинхронных двигателях. Однако стоит задуматься, из-за большого содержания высших гармоник в токе, протекающем через фазы двигателя, уменьшение скорости должно быть быстрым, так сказать кратковременным, чтобы обезопасить двигатель от перегрева и не привести его к серьезным авариям.

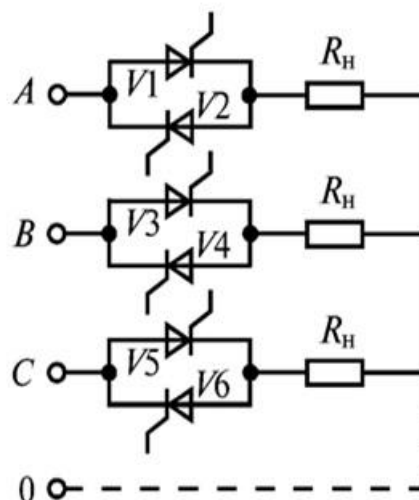


Рисунок 10 – Преобразователь 3-ф напряжения для регулирования активной нагрузки

Для небыстрого запуска асинхронных двигателей применяют устройства преобразователи частоты, плавно уменьшающиеся от нижнего значения до полного включения тиристоров. При всем этом пусковые токи снижаются в несколько раз. По данным в 2-3 раза» [24].

### 1.9 Принцип работы автономного инвертора.

Рассмотрим работу автономного инвертора напряжения. «В каждый момент времени открыт либо один транзисторный ключ в анодной группе и два ключа в катодной группе, либо наоборот. При этом продолжительность работы каждого ключа составляет 50% периода выходного напряжения преобразователя».

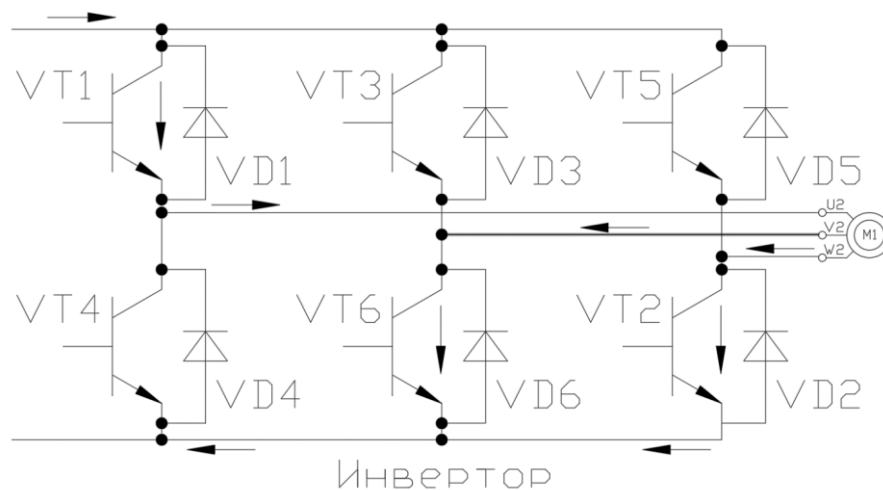


Рисунок 11 - Схема инвертора при включенных транзисторах VT1,VT2,VT6

В момент времени открыты транзисторы VT1,VT2,VT6 (рисунок 11). Ток будет протекать по всем трем фазам обмотки статора двигателя (направления токов показаны стрелками). По обмотке фазы U, от начала к концу обмотки, по обмоткам V и W в отрицательном направлении. Две трети выпрямленного напряжения прикладывается к обмотке фазы A, и треть к двум другим. Затем происходит смена работающих транзисторов, (ключ VT6 закрывается, а ключ VT3 открывается). При закрывании ключа VT6, ток в фазе B не может молниеносно поменяться из-за наличия в обмотке индукции и некоторое время будет проходить через диод VD3 замыкаясь на конденсатор. За один период выходного напряжения происходит 6 коммутаций транзисторных ключей. При этом фазное напряжение, прикладываемое к обмоткам двигателя, будет иметь вид синусоиды (рисунок 12).

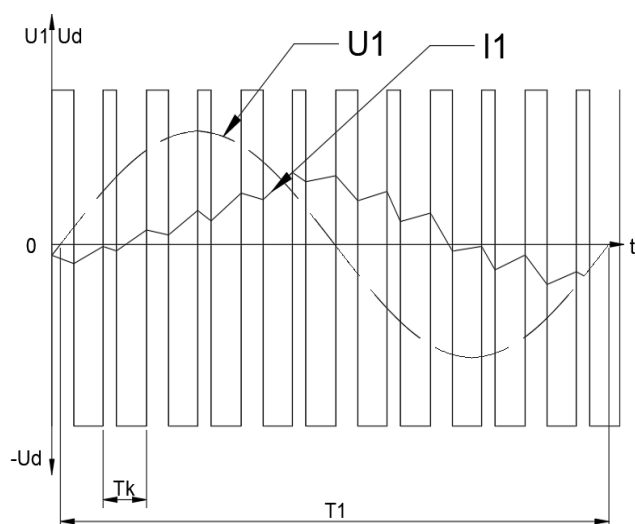


Рисунок 12 - Принцип широтно-импульсной модуляции.

Так же необходимо одновременно регулировать величину выходного напряжения. Регулирование величины напряжения производится методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Задачей широтно-импульсного регулирования является регулирование средней величины выходного напряжения и коррекция его формы приближающаяся к синусоидальной.

ШИМ реализуется следующим образом: в периоды включенного состояния транзисторного ключа, в соответствии с выходной частотой, каждый ключ включается и запирается с высокой несущей частотой порядка 2–10 кГц. Несущая частота не меняется, но изменяется продолжительность включенного состояния транзистора, т.е. изменяется ширина импульса открытого состояния транзистора.

Изменяя скважность импульсов, можно регулировать среднюю величину выходного напряжения преобразователя частоты и обеспечивать близкое к синусоиде изменение напряжения в пределах заданного периода частоты выходного напряжения (рисунок 13).

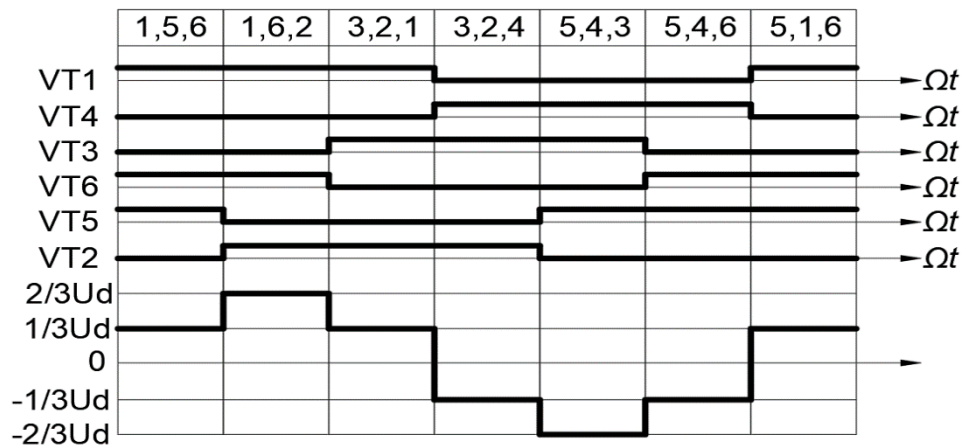


Рисунок 13 - Диаграмма переключений ключей

Скважность импульсов  $\gamma$  – это отношения времени включенного состояния к периоду ШИМ.

Фактически, напряжения на выходе инвертора имеет вид последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой равной величине выпрямленного напряжения, с переменной длительностью, так что среднее напряжение имеет синусоидальный характер с требуемой амплитудой.

### 1.10 Тормозной режим работы асинхронного двигателя.

Асинхронный двигатель от ПЧ умеет работать в двух режимах – в режиме двигателя и режиме тормоза. При работе в тормозном режиме асинхронная машина работает как генератор, вырабатывая активную мощность.

Тормозной резистор применяют в стандартных схемах преобразователя частоты, если точнее, когда входе схемы установлен неуправляемый выпрямитель, то он не может выдать изменяемую мощность при торможении (рисунок 14).

Тормозной резистор подсоединяется через транзистор VT7. Когда

двигатель работает в тормозном режиме, генерируемый ток через диоды VD1–VD6 замыкаются на фильтр заряжая его. Когда на конденсаторе повышается  $U$  и превышает его номинальное значение на 10%, транзистор VT7 открывается, и происходит нагрев резистора от мощности торможения. В этом случае энергия торможения расходуется на нагрев резистора.

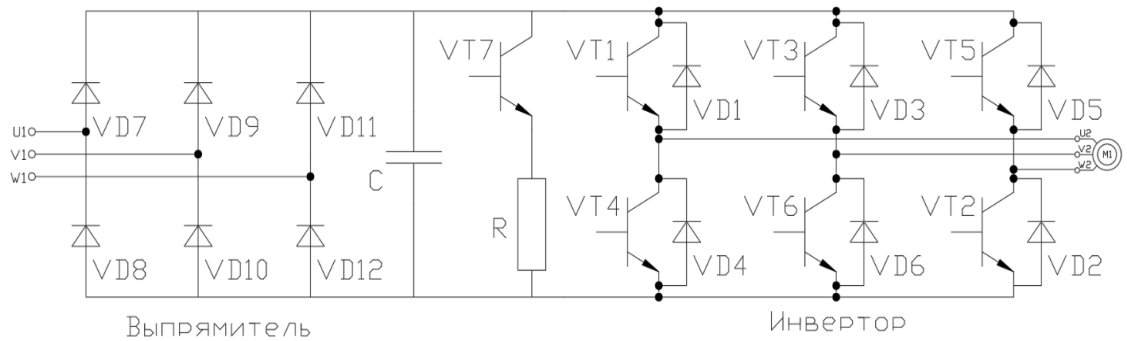


Рисунок 14 - Схема преобразователя частоты с тормозным резистором.

Энергию торможения можно использовать полезно, возвращая ее в питающую сеть, это целесообразно, когда привод длительное время работает в тормозном режиме, например, при спуске груза в подъемно-транспортных механизмах.

Для возврата энергии в питающую сеть необходимо параллельно неуправляемому выпрямителю включить рекуператор (рисунок 15).

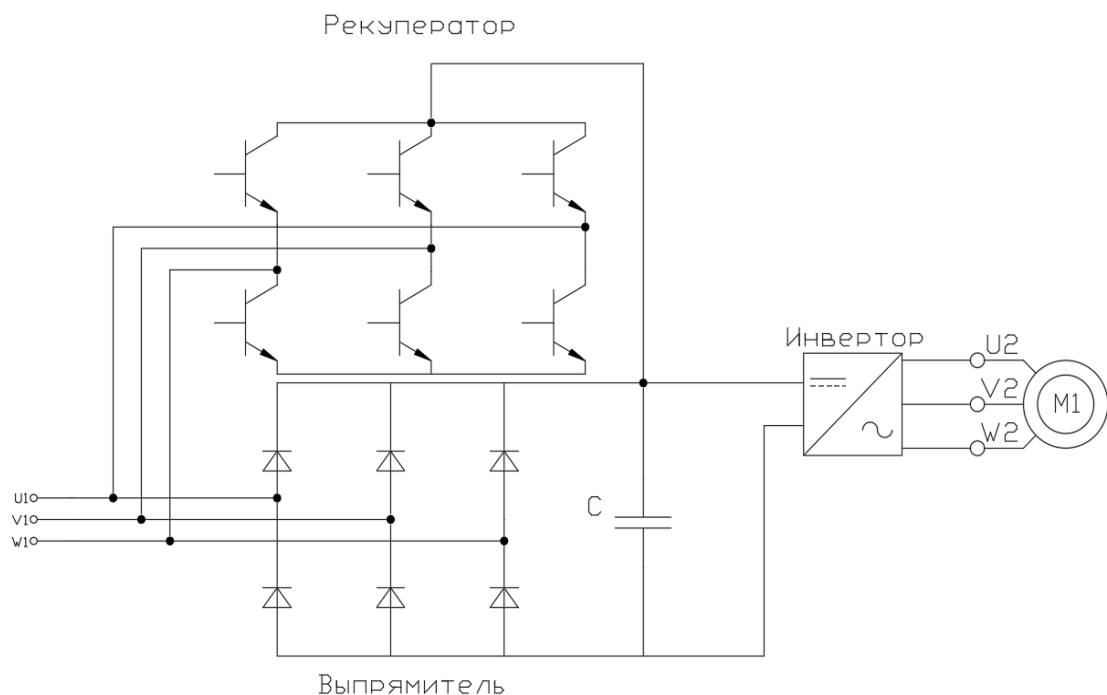


Рисунок 15 - Схема подключения рекуператора

Рекуператор представляет собой инвертор напряжения на транзисторах, коммутация которых производится с частотой питающей сети. Использование рекуператора существенно поднимает цену преобразователя. На входе преобразователя частоты обычно устанавливают реактор служащий для уменьшения токов короткого замыкания и уменьшающий содержание высших гармоник тока, в цепях питания преобразователя частоты.

Поскольку в цепи выпрямленного тока преобразователя частоты установлен конденсатор достаточно большой емкости, то при включении преобразователя частоты необходимо ограничить ток заряда конденсатора. Это достигается включением в цепь выпрямленного тока ограничивающего резистора, который затем шунтируется контактором, и не участвует в работе преобразователя частоты.

Для улучшения гармонического состава выходного напряжения иногда необходима установка выходного трехфазного фильтра. Такой фильтр тоже поднимает цену преобразователя, однако он улучшает условия работы асинхронного двигателя. Иногда он необходим, когда двигатель и



преобразователь установлены вдалеке друг от друга и длина питающего кабеля превышает 100 метров.

### **1.11 Общее о Фильтрах**

Для устранения гармоник в преобразовательной технике используются фильтры, которые могут быть размещены как на входе, так и на выходе. Пассивные фильтры состоят только из реактивных элементов - катушек индуктивности и конденсаторов, а некоторые фильтры также могут содержать резисторы для снижения вибраций от высокодобротных контуров. Фильтры на выходе преобразователя это устройства, которые помогают улучшить форму выходного напряжения. Когда мы говорим о сглаживающих фильтрах, то речь идет о тех фильтрах, которые предназначены для улучшения выходного напряжения постоянного тока. «Сглаживающие фильтры выполняют задачу удаления пульсаций и других помех в выходном напряжении, что зачастую требуется для обеспечения надежной работы электронных устройств» [14].

«Фильтры на выходе применяются для того, чтобы уменьшить вредное влияние преобразовательной техники на электрическую сеть» [15], а также защитить сам преобразователь. Они помогают предотвратить возникновение электромагнитных помех, которые могут появиться из сети. Обычно люди называют их просто “сетевой фильтр”. Следовательно, будет правильно применить выходной фильтр в своем преобразователе частоты.

#### **1.11.1 Входные фильтры**

Не секрет, что преобразовательная техника потребляет из внешней сети токи, содержащие ряд гармоник. В этом случае падение напряжения из-за протекания токов высших гармоник на сопротивлении сети  $X_C$  приводит к тому, что напряжение сети становится несинусоидальным на входе преобразователя.

В соответствии с ГОСТ 13109-97: «не синусоидальность напряжения

оценивается коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения» [5]  $K_U$

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \quad (5)$$

где,  $U_{(1)}$  и  $U_{(n)}$  – первая и  $n$ -ые гармоники напряжения сети.

### 1.11.2 Выходные фильтры.

Если есть входные фильтры. Следовательно, есть и выходные. Фильтры на выходе повышают качество DCU. Они носят название сглаживающие. Сглаживающие фильтры существуют в нескольких разных вариантах, но самые часто применимые это

- Емкостные
- Индуктивные
- Г–образные

Емкостной фильтр: Схема включения емкостного фильтра показана на рисунке 16а. «Процесс увеличения напряжения на выходе выпрямителя показан на рис. 11 при наличии емкостного фильтра. При подаче напряжения конденсатор создает короткое замыкание и первый импульс тока весьма велик. Затворы отпираются в моменты, когда ЭДС на вторичных обмотках превышает напряжение на конденсаторе, и запираются в моменты, когда ЭДС на вторичных обмотках снижаются ниже напряжения на конденсаторе. Выпрямитель работает в режиме прерывистого тока» [18]. Во время переходного процесса ток постепенно уменьшается, вместе с ним уменьшается угол проводимости затвора.

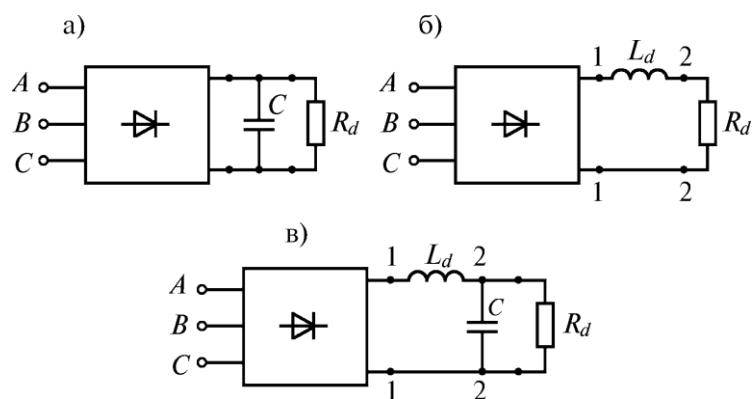


Рисунок 16 - Схемы присоединения сглаживающих фильтров к выпрямителям: емкостного(а),индуктивного(б),Г–образного(в)

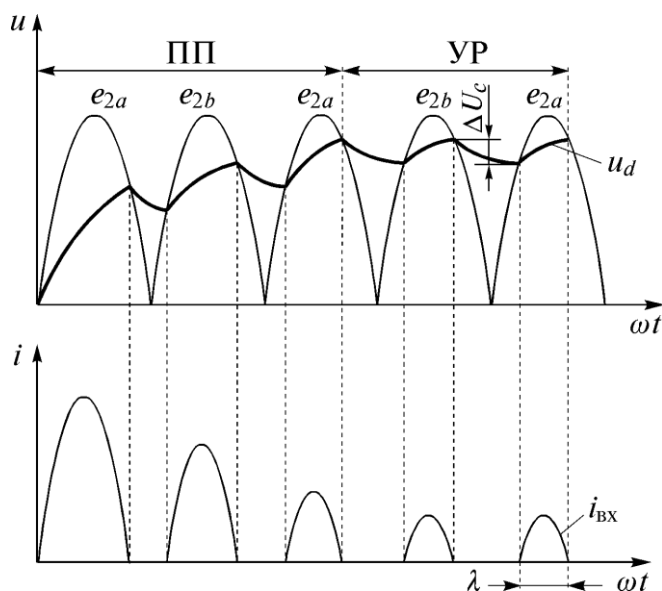


Рисунок 17 - Временные диаграммы токов и напряжений в однофазной мостовой схеме, работающей на емкостной фильтр (ПП–переходный процесс; УР–установившийся режим)

Изначальный бросок тока при начале работ является существенным минусом в работе фильтра. У любой техники есть разные режимы работы. Скажем так, «тяжелые условия работы и вредное влияние на сеть не очень хорошо влияют на ПЧ.

Посмотрим на другую положительную сторону – это его простота и невысокая стоимость.

Для уменьшения начального резкого повышения тока применяется

накопившейся заряд конденсатора который был накоплен при помощи зарядного резистора» [7].

Емкостные фильтры в 80% применяются вместе с выпрямителями небольшой емкости.

Г–образный фильтр: Г–образные фильтры в преобразовательной технике применяют в общем и целом для того же что и остальные, но есть нюансы. Применяя фильтры на основе емкости и индукции невозможно достигнуть высокого коэффициента сглаживания. Включение Г–образного фильтра показано на рисунке 16в.

«Выходные фильтры применяются на АИН с ШИМ для увеличения лучших условий работы асинхронных двигателей, особенно, это заметно, если ШИМ-сигнал расположен слишком далеко, скажем, соединен длинным проводом» [14].

Г–образный LC-фильтр самый нетребовательный и легок в применении фильтр из данных видов (рисунок 16в). Индуктивность представляет достаточно большое сопротивление для высших гармоник, а емкость наоборот малое. Поэтому первые гармоники ослабляются, намного меньше чем вторые.

Коэффициент сглаживания фильтра - это отношение пульсаций на начальном этапе фильтра к пульсациям на конечном этапе. Индуктивные фильтры широко применяются в устройствах средней и большой мощности, а их подключение можно увидеть на рисунке 13б.

## **1.12 Поломки и ошибки преобразователя частоты**

Преобразователи частоты - это техника, как и другая техника, им свойственно ломаться, ведь ничего не вечно. Существуют разные виды поломок, основные факторы поломок представлено ниже:

### **1.12.1 Загрязнения**

Частотный преобразователь - это весьма большое устройство, которое

может запросто страдать от попадания пыли и загрязнений внутрь. Пыль может приводить к статическому напряжению, которое в любой момент способно вызвать короткое замыкание. Также пыль способствует перегреву системы и так далее. Благо, очистку преобразователя можно выполнить без дополнительных приспособлений, используя лишь навыки. И чтобы продлить срок службы устройства, иногда его стоит чистить.

### **1.12.2 Коррозия**

Коррозия поражает любые электронные компоненты, в том числе и внутри частотного преобразователя. Переживать о коррозии стоит в том случае, если вы используете преобразователь в не слишком благоприятных условиях. В таком случае, это может вызвать серьезные проблемы, вплоть до поломок, не совместимых с восстановлением (или, по крайней мере, к дорогим неисправностям). Если вы заметили следы коррозии, это становится отличным поводом для того, чтобы обратиться к специалистам из ремонта.

### **1.12.3 Неверный монтаж**

Огромное количество пользователей об этом не задумывается, но частотный преобразователь нужно ещё правильно установить. В случае, если это было выполнено неверно - система может не работать сразу, или перестать работать спустя небольшое количество времени. Именно поэтому, в первую очередь, стоит проверить правильность подключения частотного преобразователя. Если были выявлен случай неправильного монтажа, то нужно переподключить правильно.

Некоторые из самых распространенных проблем, связанных с преобразователями частоты, включают в себя:

- Перегрузка: Если нагрузка на двигатель превышает допустимый предел, то это может привести к перегрузке преобразователя частоты, что может привести к его выходу из строя.
- Короткое замыкание: Если происходит короткое замыкание на линии или на выходе преобразователя, то это может привести к его выходу из строя.

- Напряжение: Если напряжение на входе не соответствует требуемому, то это может привести к ошибкам в работе преобразователя.
- Температура: Высокая температура может привести к перегреву и повреждению электронных компонентов внутри преобразователя.
- Вибрации: Вибрации могут вызвать смещение компонентов или даже их разрушение.
- Неправильная настройка: Если настройки преобразователя не соответствуют требованиям конкретной системы, то это может привести к ошибкам в работе и повреждению оборудования.
- Подавление помех: Электромагнитные помехи могут повлиять на работу преобразователя частоты и привести к его сбою.

Все эти проблемы могут быть предотвращены правильным проектированием и установкой системы, а также регулярным техническим обслуживанием и проверкой работы оборудования.

Вывод по разделу. Данный раздел достаточно велик, в нем мы рассмотрели основные принципы работы асинхронных двигателей и их конструктивные особенности, узнали про преобразователь частоты, его структуру и применение и какие бывают неисправности.

Если не проводить модернизацию, то дальнейшая эксплуатация может быть продолжена, но это повышает уровень опасности работы. В этом случае, риск возникновения аварий на предприятии будет особенно велик. Учитывая, что компания стремится к снижению аварийности производства и минимизации рисков в процессе эксплуатации, модернизация является необходимой мерой.

Исходя из вышесказанного, необходимо составить схему преобразователя частоты, выяснить что для этого требуется, провести анализ рынка.

## **2 Техническое решение по управлению асинхронными двигателями**

### **2.1 Векторное управление**

Преобразование координат в системах векторного управления: Три обмотки, соединенные в звезду или треугольник в зависимости от нужных нам показаний, сдвинутые на 120 градусов, имеет статор асинхронного двигателя. При питании асинхронного двигателя от преобразователя частоты эти три напряжения получают на выходе преобразователя.

В регулируемом электроприводе заданием на скорость асинхронного двигателя является аналоговый сигнал задающего напряжения».

Следовательно, в регулируемом электроприводе в систему управления необходимо включить преобразователь».[3]

Для преобразования гармонических сигналов и напряжений асинхронного двигателя в сигналы обратных связей также необходимы преобразователи. Преобразование гармонических сигналов в аналоговые занимают «обратные координатные преобразователи» (ОКП).

### **2.2 Основные принципы векторного управления**

Регулирование скорости двигателя не дают нам максимальное сцепление ротора и статора как ни в режиме простоя, так ни в режиме работы. «Это является основной причиной тряски электромагнитного момента в асинхронном двигателе при его запусках и регулировании скорости. Данный абсолютно неприятный недостаток устраняется в системах векторного управления двигателем» [3]. Лучшее что мог придумать человек на данное время, это обеспечить управление двигателем – электромагнитной составляющей (моментом).

«Принцип векторного управления состоит из системы управления

контролирующая появляющиеся вектора, значение и положение их в пространстве друг относительно друга. Всплывает задача: Как определить и принудить установившиеся мгновенных значений токов в обмотках двигателя таким образом, чтобы общие векторы токов и потокосцеплений занимали в пространстве такое правильное положение, чтобы обеспечивалось создание требуемого электромагнитного момента» [7].

Таким образом, если контролировать изменение координатами переменных и вносить в них корректировки, то можно получить контролируемые значения электромагнитного момента.

### 2.3 Автоматическое регулирование

Пример структуры системы автоматического регулирования (далее САР) приведен ниже на Рисунке 18.

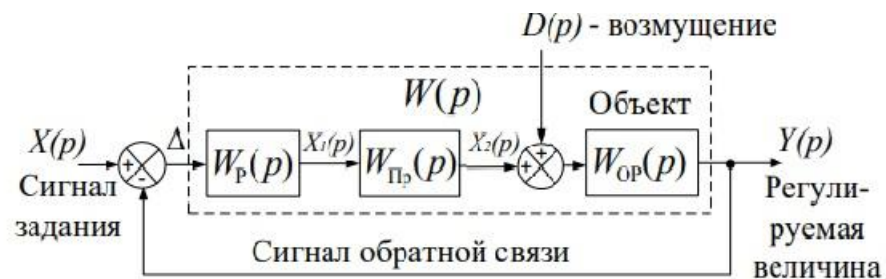


Рисунок 18 - Структура системы автоматического регулирования

Функция этой системы – «поддержание значения регулируемого параметра  $Y(p)$  равным заданному  $X(p)$ . Для этого ошибка между заданным и реальным значениями параметра ( $\Delta$ ) преобразуется в сигнал воздействия на объект регулирования  $X_2(p)$ , устремляющий эту ошибку к нулю» [12].



Передаточная функция разомкнутой САР (Рисунке 18), записывается так:

$$W_{\text{р}} = \frac{Y(p)}{\Delta} = W_{\text{Рег}}(p) * W_{\text{Пр}}(p) * W_{\text{Об}}(p) \quad (6)$$

Где:  $W_{\text{Р}}(p)$  – передаточная функция регулятора, определяющая алгоритм вычисления управляющего воздействия  $X_1(p)$   $W_{\text{пр}}(p)$  – передаточная функция преобразователя, реализующего вычисленное регулятором воздействие  $W_{\text{об}}(p)$  – передаточная функция объекта регулирования.

## 2.4 Управление скоростью и положением АД

Для управления скоростью и положением в асинхронном векторном электроприводе используется система управления моментом, которая является внутренним контуром. Система управления состоит из различных элементов, которые помогают регулировать скорость работы двигателя. На рисунке 19 показана структура такой системы управления в асинхронном драйвере.

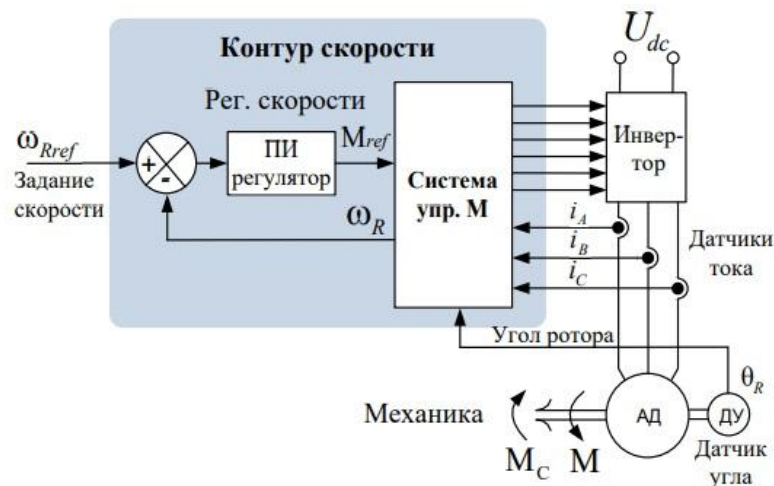


Рисунок 19 - Структура системы управления скоростью АД

Для преобразователей, которые работают с напряжениями, начиная от 380 В и имеют мощность более нескольких кВт, для измерения тока в фазах инвертора используются датчики на элементах Холла, которые гальванически развязаны. Это позволяет безопасно измерять токи высокого напряжения и защищает электронику устройства от повреждений, связанных с электрическими помехами и шумами.

«Элемент Холла – это полупроводниковый элемент, чувствительный к величине магнитного поля. Если его поместить в магнитное поле и пропустить через него калиброванный ток, то на его выходе возникнет ЭДС, пропорциональная величине магнитного поля» [8]. Конструкцию датчика тока на базе элемента Холла поясняет рисунок 20.

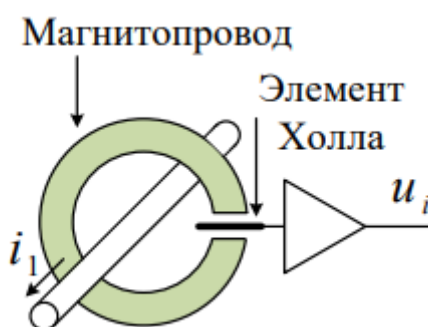


Рисунок 20- датчик Холла

«Проводник с измеряемым током  $I_1$  пропускается через магнитопровод, в зазоре которого устанавливается элемент Холла, запитанный калиброванным током. Выходным сигналом датчика является напряжение, пропорциональное величине магнитного поля в зазоре, а, следовательно, – измеряемому току. Такие датчики называются датчиками прямого усиления. В силу зависимости от зазоров, допусков, разбросов параметров магнитопровода и т.д. точность подобных датчиков не очень высока» [17].

Существует много датчиков для автоматического управления - датчики тока, напряжения, индуктивные датчики положения, Магнитные датчики

положения, Оптические датчики положения (энкодеры) и тд.

## **2.5 Измерение напряжения**

«Датчики напряжения используются в электроприводах для измерения напряжения в звене постоянного тока. Измерение этого напряжения необходимо в алгоритмах защитного отключения преобразователя по минимуму и максимуму допустимого напряжения, а также для управления гасителем энергии генераторного торможения» [5].

Для измерения напряжения в системах электропитания могут использоваться различные типы датчиков, включая резистивные делители и гальванически развязанные датчики напряжения на элементах Холла. Один из таких датчиков - компенсационного типа, в котором измеряемое напряжение преобразуется в намагничивающий ток первичной обмотки через использование резисторов. Затем система компенсации использует сигнал с элемента Холла для выработки размагничивающего тока, который поддерживает нулевую намагниченность сердечника. Наконец, ток преобразуется в сигнал, пропорциональный значению измеряемого напряжения, с коэффициентом передачи, определяемым величиной сопротивлений резисторов и соотношением числа витков намагничивающей и размагничивающей обмоток.

## **2.6 Измерение положения и скорости**

Измерители положения – это устройства, которые используются для определения местоположения объекта в пространстве. В позиционных приводах они играют важную роль, поскольку позволяют замкнуть обратную связь и точно контролировать положение движущейся части.

В синхронных приводах информация о положении ротора является необходимой для правильного ориентирования системы координат. Для

измерения скорости в прошлом использовались тахогенераторы, но в современных электроприводах скорость вычисляется на основе данных от датчика положения, что позволяет достичь более высокой точности и надежности.

## **2.7 Магнитные датчики положения**

Магнитные измерители положения имеют меньшее разрешение и точность, чем оптические. Они работают там, где при тяжёлых условиях оптические датчики неприменимы. Магнитные измерители используют магнитное поле для определения положения, тогда как оптические используют световые сигналы.

Подобно тому, как в резольвере вторичные обмотки устанавливаются под углом  $90^\circ$ , «в магнитном измерителе также используются два чувствительных элемента, расположенные под углом в  $90^\circ$ . Такое их расположение позволяет однозначно определить положение микромагнита по их сигналам» [15].

«Магнитные измерители положения могут быть абсолютные и относительные и имеют интерфейсы, аналогичные интерфейсам рассмотренных ранее оптических измерителей» [8].

При использовании ШИМ-управления в токах фаз двигателя возникают пульсации. Для преобразователей, которые работают с напряжениями, начиная от 380 В и имеют мощность более нескольких кВт, для измерения тока в фазах инвертора используются датчики на элементах Холла, которые гальванически развязаны. Это позволяет безопасно измерять токи высокого напряжения и защищает электронику устройства от повреждений, связанных с электрическими помехами и шумами.

Заметим, что для измерения токов в системах управления используется метод ШИМ, при котором измерение проводится один раз за период. Это происходит в окрестности вершины опорного треугольника перед началом

следующего цикла вычислений. При использовании этого метода программные фильтры тока не требуются, так как постоянная времени таких фильтров должна быть значительно больше, чем цикл управляющей программы контура тока. В большинстве случаев это делает фильтр слишком медленным, что может негативно сказаться на точности и быстродействии контура тока.

## **2.8 Базовые характеристики двигателя (асинхронного, с короткозамкнутым ротором)**

Для правильного использования преобразователя частоты крайне важно знать характеристики того двигателя (асинхронного, с короткозамкнутым ротором), который вы собираетесь контролировать.

Ниже мы привели обзор базовых характеристик двигателя для того, чтобы вы лучше понимали то, как работают преобразователи частоты.

### **Характеристики "Частота вращения — крутящий момент/ток"**

Базовые параметры двигателя (асинхронного, с короткозамкнутым ротором) включают характеристики "частота вращения–выходной крутящий момент" и "частота вращения–ток".

Наивысший ток протекает через двигатель при запуске. По мере роста частоты вращения, он падает. Крутящий момент увеличивается по мере роста частоты вращения, однако он начинает падать после того, как частота вращения превысит определенное значение. Работа с номинальной частотой вращения начинается в той точке, где крутящие моменты, создаваемые нагрузкой и двигателем, уравниваются.

Частота вращения двигателя определяется не только крутящим моментом нагрузки, но и числом полюсов в двигателе, а также частотой источника переменного тока. На рисунке 21 показана схема преобразователя частоты, который позволяет плавно изменять фиксированную частоту сети электропитания.

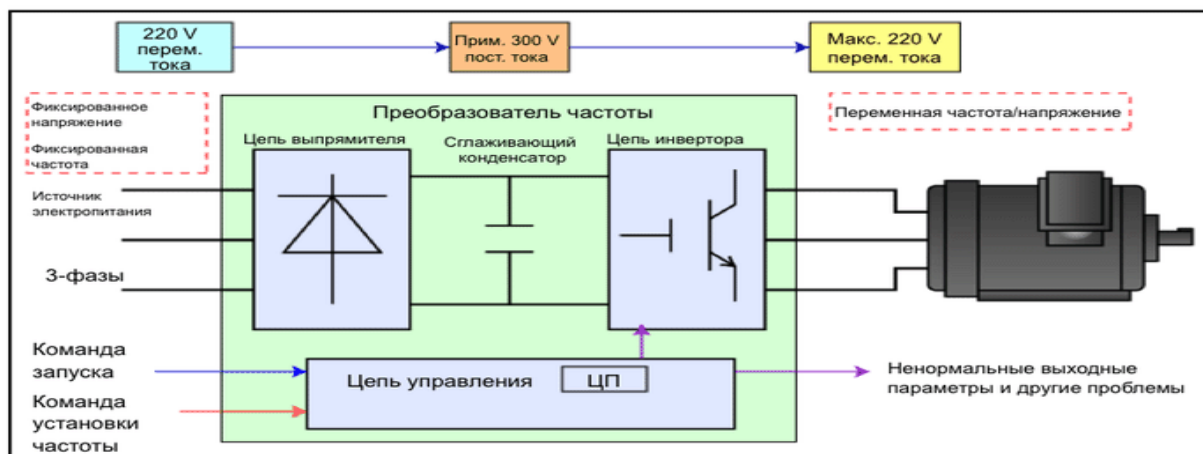


Рисунок 21 - Схема ПЧ, плавно изменяющая фиксированную частоту сети

Все эти величины сведены в приведенную ниже формулу.

$$\text{Частота вращения двигателя} = \frac{120 \cdot \text{Частота } f \text{ [Гц]}}{\text{Число полюсов}} \cdot (1 - S) \frac{\text{об}}{\text{мин}} \quad (7)$$

Номинальный крутящий момент двигателя - крутящий момент определяется как величина созданной силы, приводящей двигатель в движение.

Стандартной единицей измерения силы для прямолинейного движения является "Ньютон", обозначаемый символом "Н". Так как ротор двигателя вращается вокруг своей оси, то его движение не является прямолинейным. В итоге, крутящий момент измеряется в единицах "Ньютон-метр", "Нм". Номинальный крутящий момент двигателя может быть рассчитан с помощью приведенной ниже формулы.

$$\text{Номинальный крутящий момент, } T_m = 9550 \cdot \frac{P \text{ кВт}}{N \frac{\text{об}}{\text{мин}}} \text{ Нм} \quad (8)$$

Скольжение. При приложении нагрузки частота вращения двигателя начинает отличаться (снижается) относительно синхронной частоты вращения.

Скольжение определяет величину смещения частоты вращения двигателя от синхронной частоты.

$$S = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \cdot 100\% \quad (9)$$

Скольжение равно 100% при запуске (когда частота вращения ротора равна 0). (Скольжение обычно выражается как "Скольжение = 1"). Скольжение в несколько процентов частоты медленно увеличивается преобразователем частоты (что также относится к частоте при запуске).

Когда двигатель работает с номинальным крутящим моментом, скольжение обычно составляет от 3% до 5%. Скольжение увеличивается при повышении нагрузки (перегрузка), что вызывает увеличение тока в двигателе;

Скольжение становится отрицательным, когда частота вращения превышает синхронную частоту ( $N > N_0$ ).

## 2.9 Обзор работы выпрямительного блока

Блок выпрямителя в преобразователе частоты предназначен для преобразования переменного тока (частоты сети) в постоянный ток, который затем используется для питания инвертора. Этот процесс выполняется при помощи диодного моста, состоящего из четырех диодов.

Входными клеммами блока выпрямителя являются фазы переменного тока сети. Диодный мост выпрямляет переменное напряжение в постоянное напряжение, которое называется средним (или выпрямленным) напряжением. Среднее напряжение на выходе зависит от характеристик

диодов. После выпрямления в блоке выпрямителя возможна дополнительная обработка напряжения, такая как фильтрация и стабилизация. Это может потребоваться для уменьшения уровня шума и стабилизации напряжения на определенном уровне.

Таблица 1 – Устройство блока выпрямителя

Цепь выпрямителя	Преобразовывает переменный ток в постоянный. В ней используется полупроводниковый элемент — диод.
Сглаживающий конденсатор	Сглаживает пики постоянного тока.
Цепь инвертора	Используется для создания напряжения переменного тока из постоянного. Это устройство, называемое "инвертором" имеет противоположное выпрямителю назначение. Используется для питания двигателя созданным переменным напряжением/частотой. Используются полупроводниковые переключающие элементы (БТИЗ или аналогичные компоненты), которые могут включаться и выключаться.
Цепь управления	Управляет контуром инвертора.

### 2.9.1 Характеристики формы колебаний

Какие будут различия между входными и выходными колебаниями при использовании преобразователя частоты?

На рисунке 22 можно увидеть формы колебаний ПЧ. В таблице 2 описаны формы колебаний. Колебания тока «зайчиковых ушек» являются одной из характерных особенностей работы некоторых типов преобразователей частоты, в которых используется модуляция ширины импульсов.

Таблица 2 – Формы колебаний преобразователя частоты

Входной ток	Форма кривой тока выглядит как «заячьи уши»
Выходное напряжение	Форма кривой похожа на набор полос (прямоугольников)



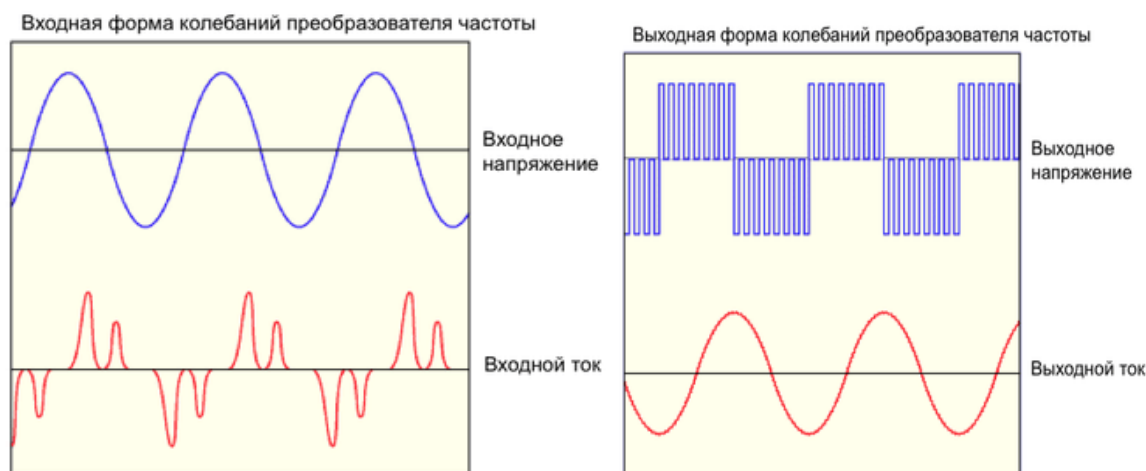


Рисунок 22 –Формы колебаний преобразователя частоты

Форма колебаний тока «зайчиковых ушек» обычно представляет собой серию импульсов переменной длительности и амплитуды. Длительность каждого импульса определяется отношением ширины «зайчиковой ушки» к периоду модулирующего сигнала, а его амплитуда - уровнем напряжения питания и нагрузки.

Для различных типов преобразователей частоты, форма колебаний тока «зайчиковых ушек» может быть различной, в зависимости от параметров преобразователя и способа его настройки. Важно отметить, что форма колебаний тока «зайчиковых ушек» является важным параметром, влияющим на эффективность работы преобразователя, а также на его надежность и долговечность.

### 2.9.2 Принципы работы блока выпрямителя

Давайте рассмотрим этот принцип на простом примере однофазного переменного тока.

Для упрощения давайте будем использовать в этом примере нагрузку в виде резистора. Используемый элемент - диод.

Диод позволяет току (рисунок 23) проходить только в одном направлении в соответствии с приложенным к нему напряжением.

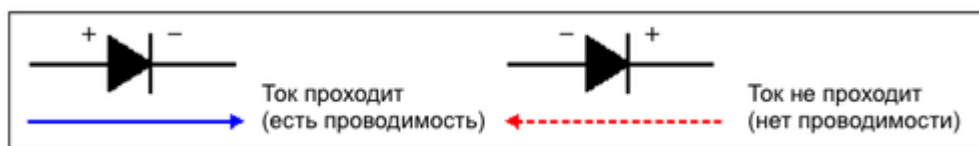


Рисунок 23 – Ток диода

Благодаря этому свойству, «при приложении напряжения между точками А и В в цепи выпрямителя, напряжение прикладывается к нагрузке в одном и том же направлении.

Другими словами, переменное напряжение преобразовывается (выпрямляется) в постоянное напряжение» [19].

Для выпрямления 3-фазного поступающего от источника питания переменного тока используется комбинация из шести диодов, которая создает выходное напряжение, показанное ниже на рисунке 24.



Рисунок 24 – Выходное напряжение в блоке выпрямителя

Выходное напряжение в блоке выпрямителя зависит от нескольких факторов, таких как тип выпрямителя (однофазный или трехфазный), характеристики трансформатора и диодов, а также нагрузки на выходе.

## 2.10 Принципы работы сглаживающего контура

### 2.10.1 Цепь ограничения бросков пускового тока

При объяснении принципа работы выпрямителя используется нагрузка в виде резистора. Однако в реальных установках в качестве нагрузки используется сглаживающий конденсатор.

Сразу же после приложения напряжения, «конденсатор начинает заряжаться, и через цепь начинает проходить большой пусковой ток. Для предотвращения повреждения диодов выпрямителя таким большим пусковым током, в цепь последовательно установлен резистор, который ограничивает пусковой ток в течение короткого промежутка времени после включения» [27].

После выполнения своей задачи контакты резистора замыкаются, что исключает его из электрической цепи.

Такая цепь называется цепью ограничения бросков пускового тока на рисунке 25 это показано.

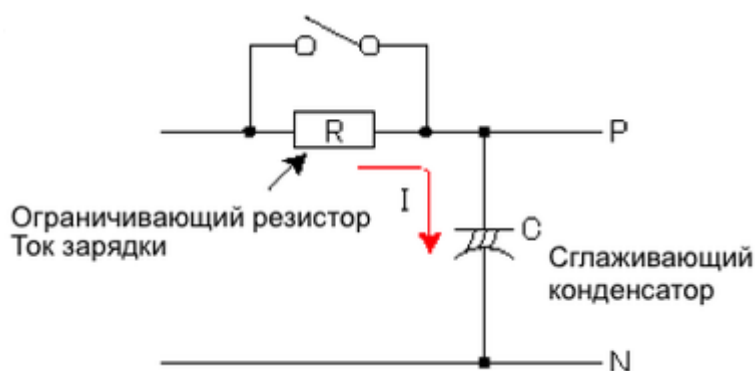


Рисунок 25 - Цепь ограничения бросков пускового тока

При использовании цепи ограничения бросков пускового тока, пик тока уменьшается, что защищает модуль выпрямителя от повреждения, это видно на рисунке 26.

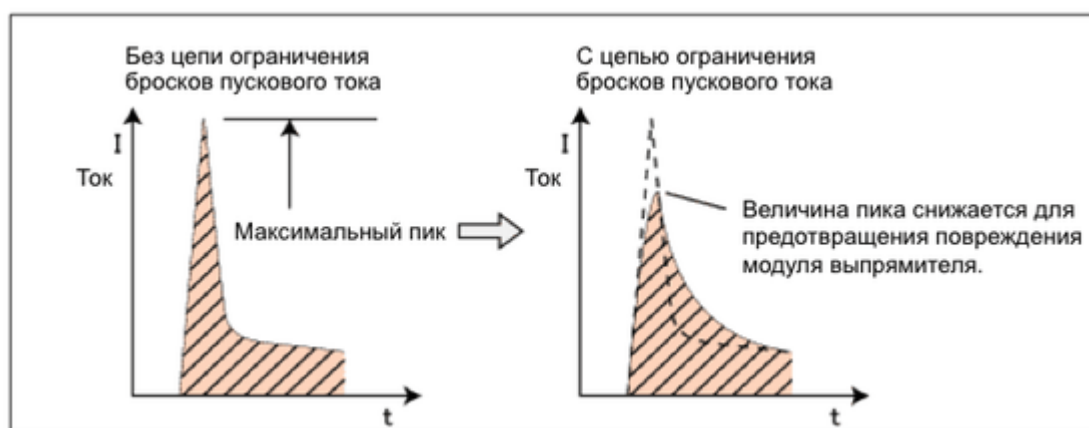


Рисунок 26 – Графики ограничения бросков

Цепь ограничения бросков пускового тока может включать в себя различные элементы, такие как: резисторы с низким сопротивлением для ограничения тока при запуске, конденсаторы для сохранения заряда и уменьшения пускового тока, дроссели для ограничения тока в момент пуска, тиристоры или диоды для контроля тока, микросхемы управления для автоматической настройки параметров ограничения тока.

Каждый из этих элементов может использоваться в зависимости от требований конкретной системы и её параметров. Важно выбрать правильную комбинацию элементов, чтобы обеспечить эффективное ограничение пускового тока без ущерба для работы системы.

### 2.10.2 Как получить переменное напряжение из постоянного

Давайте опишем, как работает устройство, используя в качестве нагрузки не двигатель, а лампу на простом примере однофазного переменного тока.

«Четыре переключателя, от S1 по S4, подсоединены к источнику постоянного тока попарно: S1 и S4, S2 и S3. По мере переключения пар переключателей через лампу начинает проходить ток» [32], как показано ниже на рисунке 27.

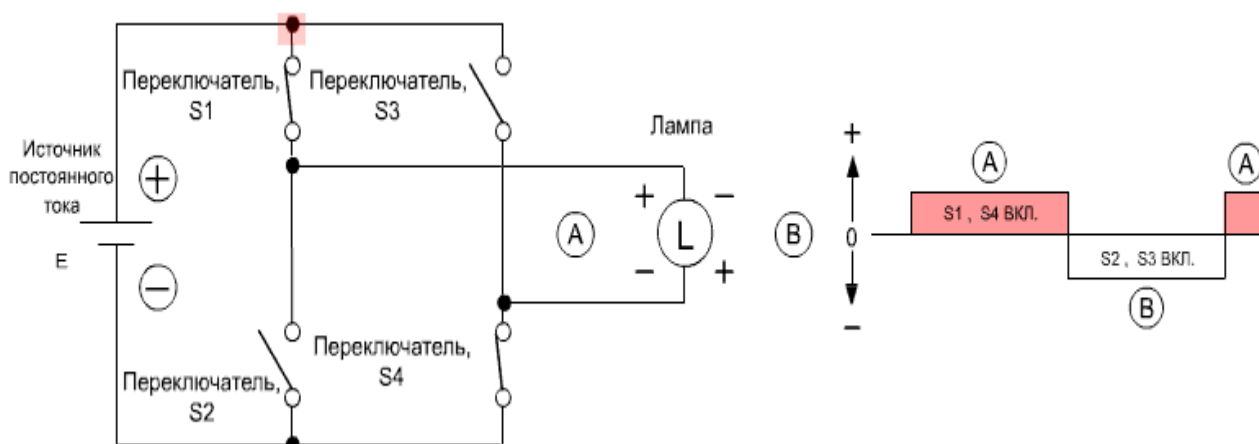


Рисунок 27 –Принцип работы блока инвертора

Форма тока:

- когда включаются переключатели S1 и S4, ток проходит через лампу в направлении А,
- когда включаются переключатели S2 и S3, ток проходит через лампу в направлении В.

Если работа переключателей будет повторяться через определенный период времени, то попеременное изменение направления тока создаст переменный ток.

### 2.10.3 Как можно изменить частоту

Частота будет изменяться по мере изменения промежутка времени между переключениями S1 — S4.

Например, если мы попеременно включаем S1 и S4 на 0,5 с, а затем — S2 и S3 на 0,5 с, то мы создаем переменный ток, который изменяет направление один раз в секунду, что эквивалентно частоте в 1 Гц (рисунок 28).

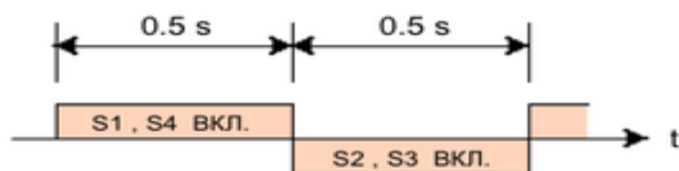


Рисунок 28 – Изменение частоты

В общем случае, частота определяется как  $f = 1/t_0$  (Гц), где  $t_0$  — это время цикла в секундах (рисунок 29).

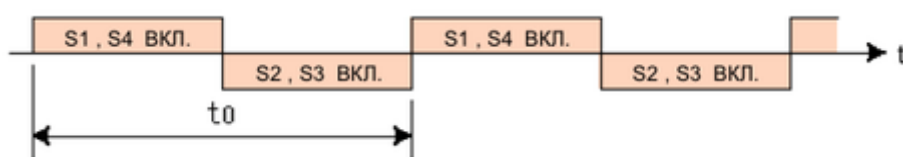


Рисунок 29 - Изменение частоты

Другими словами, частота будет изменяться вместе с изменением времени  $t_0$ .

#### 2.10.4 Как можно изменить напряжение

Чтобы изменить напряжение (среднее), можно изменить соотношение времени включения и выключения переключателей, а это можно сделать путем уменьшения цикла -  $t_0$ . Для этого нужно сократить время переключения напряжения, что приведет к возникновению коротких импульсов с определенной частотой, которую называют несущей. Например, «если уменьшить наполовину время включения переключателей S1 и S4, то (среднее) выходное напряжение переменного тока будет равно  $E/2$ , т.е. половине напряжения постоянного тока, E. Показано на рисунке 30.

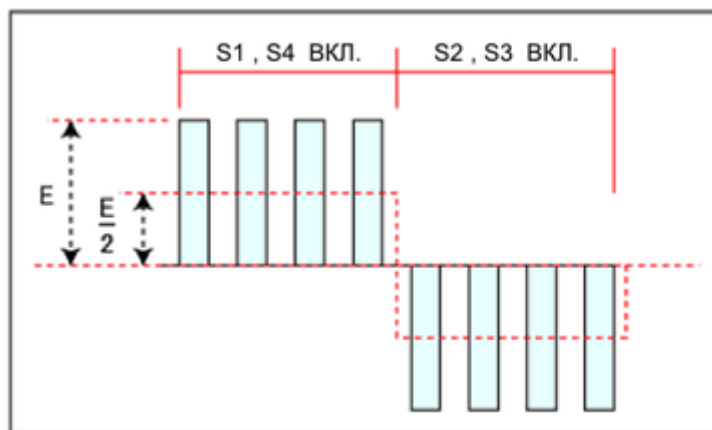


Рисунок 30 - Изменение временного соотношения включения/выключения переключателей

Для снижения (среднего) напряжения необходимо снизить соотношение времени включения, а для повышения (среднего) напряжения — повысить» [23]. Показано на рисунке 31.

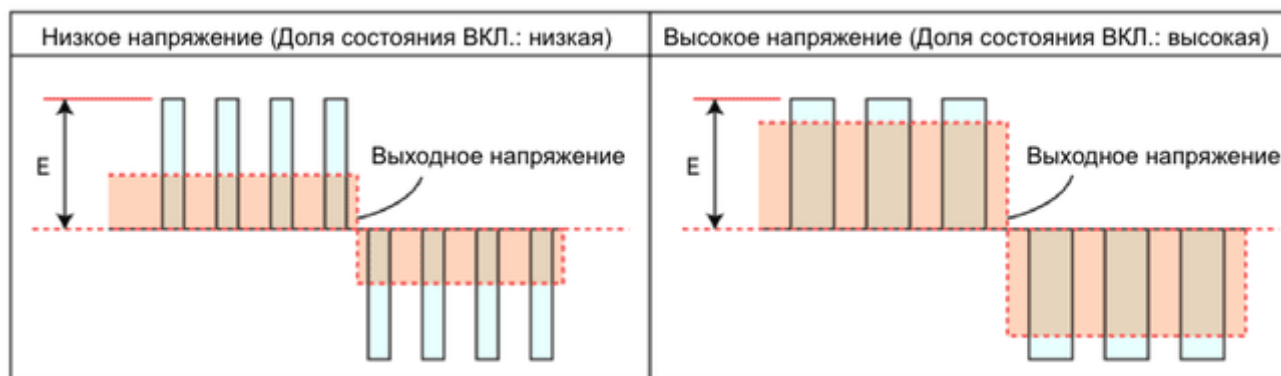


Рисунок 31 - Ширина импульса и соотношение включения/выключения

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) - это метод управления напряжением, при котором ширина импульса и соотношение включения/выключения изменяются для регулирования выходного напряжения. Этот метод наиболее часто используется в инверторах и других электронных компонентах. ШИМ позволяет точно контролировать выходное

напряжение, что особенно важно для приложений, требующих стабильной работы электронных устройств. Применение ШИМ также помогает снизить потребление энергии и повысить эффективность работы электронных систем.

### 2.10.5 Как быть с 3-фазным напряжением переменного тока

На рисунке 32 показано базовое устройство блока 3-фазного инвертора и 3-фазного напряжения переменного тока. Если вы измените порядок включения/выключения шести переключателей, то последовательность для U-V, V-W и W-U изменится. Это может использоваться для изменения направления вращения двигателя.

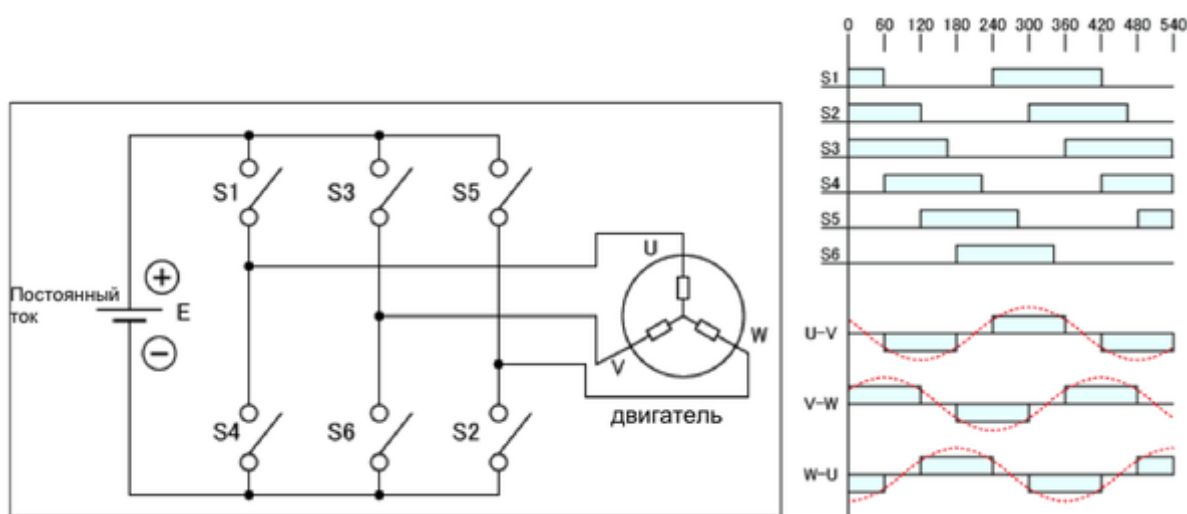


Рисунок 32 - Базовое устройство блока 3-фазного инвертора и 3-фазного напряжения переменного тока.

Обратите внимание, что «переключающие напряжение полупроводниковые элементы, которые обсуждались выше, позволяют выполнять это переключение с исключительно высокой скоростью» [25].

Современные инверторы стали гораздо более продвинутыми благодаря новейшим технологиям и оборудованию для контроля, включая использование полупроводников. В частности, векторное управление с генератором LPG начали применять для асинхронных двигателей уже в 90-х годах. Эта технология позволяет достичь очень высокой точности управления оборотами и нашла широкое применение в областях, где это



особенно важно.

В 80-х годах единственным доступным преобразователем частоты был преобразователь с контролем типа V/F (напряжение/частота), который использовался для изменения частоты электрического тока.

Однако в 90-х годах был представлен метод контроля без датчиков (оборотов), который позволял повысить крутящий момент в нижнем диапазоне контроля V/F. Этот метод контроля без датчиков был разработан для улучшения работы системы и повышения ее эффективности.

### **2.11 Разновидности преобразователей частоты**

Поскольку данная работа связана с модернизацией преобразователей частоты, то необходимо рассмотреть уже имеющийся преобразователи частоты, пример преобразователей частоты показан на рисунке 33.



Рисунок 33 – Различные преобразователи частоты

## Преобразователь частоты Веспер Е5-8500



Рисунок 34 - ПЧ Веспер Е5-8500

На рисунке 34 показан ПЧ ВесперЕ5-8500, где Е5-8500 обозначает серию преобразователя частоты.

Е5-8500 используется для управления асинхронными электродвигателями с мощностью 15-55кВт, выходная частота до 600Гц.

Применение преобразователя частоты Веспер Е5-8500:

- обрабатывающее оборудование;
- пищевая промышленность;
- текстильное оборудование;
- полиграфическое оборудование.

Технические характеристики ПЧ Веспер Е5-8500:

- метод управления: скалярный, векторный;
- тип двигателя: асинхронный;
- встроенный тормозной прерыватель: есть (до 30кВт);
- встроенный ПЛК: есть;
- защита от колебаний входного напряжения: есть;
- ПИД-управление: есть;

- многофункциональные дискретные входы: 6;
- многофункциональные дискретные выходы: 3;
- аналоговые входы: 2;
- аналоговые выходы: 1;
- выходная частота 0,01-599 Гц;
- интерфейсы: RS-485, Modbus RTU, Modbus ASCII, BACnet;
- температура окружающей среды во время работы: от -10°C до +50°C.

Преимущества:

Преобразователь E5-8500 обладает рядом значимых особенностей. Например, при подключении датчика температуры (РТС) он обеспечивает дополнительную термозащиту двигателя. Преобразователь также позволяет быстро настроить пределы включения/отключения защиты и имеет предустановленные сетевые протоколы (MODBUS, BACNET).

Преобразователь обеспечивает высокую точность поддержания скорости  $\pm 0,5\%$  благодаря своему ПИД-регулятору.

Добавление режима автоматического регулирования выходного напряжения является еще одной полезной функцией преобразователя E5-8500. Более того, наличие 1 аналогового выхода, 2 аналоговых входов, 6 дискретных входов и 3 дискретных выходов позволяют свободно интегрировать преобразователь в системы автоматизации и расширить ее функциональность.

## Преобразователь частоты Овен ПЧВ1



Рисунок 35 – ПЧ Овен ПЧВ1

На рисунке 35 изображен Овен ПЧВ1, что обозначает то что преобразователь частоты векторный, мощность подключаемого двигателя до 4кВт. Выходная частота 400Гц.

Применение преобразователей частоты Овен ПЧВ1:

- обрабатывающее оборудование
- пищевая промышленность
- текстильное оборудование
- полиграфическое оборудование

Технические характеристики ПЧ Овен ПЧВ1:

- питание 1×220 В (0,18...2,2 кВт) и 3×380 В (0,37...4 кВт);

- выходная частота до 400 Гц;
- диапазон регулирования до 1:1000;
- точность поддержания скорости до 0,1% от фактической;
- точность поддержания момента до 0,5% от фактического;
- температура окружающего воздуха – от 0 до +40 °С;
- метод управления: скалярный, векторный;
- интерфейсы: RS-485;
- автоматический подхват частоты вращающегося электропривода;
- плавный разгон и снижение скорости АД с заданной скоростью;
- сверхмодуляция инвертора ПЧВ для повышения выходного напряжения на 15 %;
- местное/дистанционное управление;
- встроенный ПИ-регулятор;
- мониторинг параметров работы ПЧВ с возможностью отображения на ЖКИ-панели ЛПО1 или ЛПО2 либо на мобильном устройстве (планшет/смартфон) по беспроводному каналу Wi-Fi для ЛПО1В;

Преимущества:

Векторное управление можно определить как метод управления, который позволяет контролировать магнитный поток ротора синхронных и асинхронных двигателей. Преобразователи ОВЕН ПЧВ обеспечивают такой вид управления и формируют гармонические токи фаз для этого. Автоматическая оптимизация энергопотребления. Автоматическая оптимизация энергопотребления также является одной из функций преобразователей ОВЕН ПЧВ, которые способны оперативно приспосабливаться к изменяющейся нагрузке тока, что ведет к снижению потребления электроэнергии. «Еще одной полезной опцией является спящий режим, который позволяет предотвратить перегрев и снизить вероятность изнашивания привода при работе на частотах вращения ниже 20-30 Гц» [1].

Преобразователи ОВЕН ПЧВ также оснащены встроенным ПЛК, который заменяет программируемое реле и даёт возможность реализовать

дополнительную программу управления. Другая функция - автоматическая адаптация двигателя - позволяет управлять преобразователем частоты ОВЕН ПЧВ с высокой точностью и защищать двигатель от перегрева.

Для удобной коммуникации устройства ОВЕН ПЧВ оснащен встроенным гальванически изолированным интерфейсом RS-485, который позволяет диагностировать и программировать прибор посредством специального ПО, а также оперативно передавать сведения. Кроме того, преобразователи ОВЕН ПЧВ обладают функциями плавного пуска, динамического торможения и противопожарного режима.

Пропуск резонансных частот - еще одна полезная опция преобразователей ОВЕН ПЧВ, которая помогает исключить ненужный режим вращения привода в данный момент. Подхват двигателя даёт возможность возобновить работу свободно вращающегося двигателя сразу после подачи питания. И, наконец, обнаружение обрыва ремня является полезной функцией для работы насосов, вентиляторов и другого оборудования.

Недостатки:

«Снят с производства по данным с сайта производителя» [1].

## Преобразователь частоты ADV 0.4-E210M



Рисунок 36 – Преобразователь частоты ADV 0.4-E210M

На рисунке 36 изображен ADV 0.4-E210M, что обозначает что преобразователь частоты серии e210, экономичный общего назначения, мощность 0,4кВт.

Применение преобразователей частоты ADV 0.4-E210M:

- обрабатывающее оборудование
- пищевая промышленность
- текстильное оборудование
- оборудование намотки/размотки

Технические характеристики ПЧ ADV 0.4-E210M:

- производитель: AdvancedControl;
- серия: E210;
- модель: ADV 0.40 E210-M;
- применение: насосы / вентиляторы / промышленность;

- мощность, кВт: 0.4;
- номинальный ток, А: 2.5;
- напряжение питания, В: 220;
- фазность (количество фаз): 1;
- выходная частота, Гц: 0,1-600;
- класс защиты: IP 20;
- время разгона, с: 0,1-6500;
- время торможения, с: 0,1-6500;
- тормозной блок: есть;
- аналоговый вход, кол-во: 2;
- дискретный вход, кол-во: 4;
- аналоговый выход, кол-во: 1;
- дискретный выход, кол-во: 1;
- релейный выход, кол-во: 1;
- интерфейс RS485 (Modbus RTU): да;
- пусковой момент: 150%;
- регулятор: ПИД – регулирование;
- управление по ВЧХ: да;
- векторное управление с обратной связью: да;
- бессенсорное векторное управление: нет;
- рабочая температура, °С: -10.....+40;
- габариты (ШхВхГ), мм: 106x160x137;

#### Преимущества:

- пусковой момент: 150%/1 Гц;
- перегрузочная способность: 150% от номинального тока в течение 60с для нагрузок с постоянным крутящим моментом: 120% от номинального тока в течение 60с - для нагрузок с переменным крутящим моментом;
- функция автоматического энергосбережения;



- функция поддержания заданного выходного напряжения при изменении напряжения питающей сети;
- задание 4-ех времен ускорения/замедления в диапазоне 0.1-6500 с
- внешнее управление 8-мью скоростями
- перезапуск с помощью функции поиска частоты после кратковременного пропадания напряжения питания;
- режим намотки/размотки (предназначен специально для задания постоянной скорости при работе с процессами намотки/размотки);

Недостатки:

Снят с производства по данным с сайта производителя.

Преобразователь частоты VT100-5R5-3B EKF PROxima



Рисунок 37 - Преобразователь частоты VT100-5R5-3B EKF PROxima

На рисунке 37 изображен преобразователь частоты VT100-5R5-3B EKF PROxima. Применение преобразователей частоты VT100-5R5-3B EKF PROxima:

Общепромышленные преобразователи частоты ВЕКТОР EKF

PROxima применяются в системах автоматизации вентиляции, насосного оборудования, в системах электроприводов конвейеров, лифтов и т.д.

Обеспечивают:

- плавный пуск электродвигателя;
- регулирование частоты вращения электродвигателя;
- защиту электродвигателя от перегрузок;
- уменьшение пусковых токов;
- преобразование однофазной сети в трехфазную (однофазные преобразователи).

Технические характеристики ПЧ VT100-5R5-3B

- серия PROxima;
- ширина: 130мм;
- высота: 264мм;
- глубина: 153мм;
- с блоком управления: да;
- количество HW-интерфейсов RS-485: 1;
- поддержка протокола MODBUS: Да;
- поддержка протокола других шинных систем: нет;
- степень защиты (IP): IP20;
- с возможностью подключения ПК (персонального компьютера): нет;
- сетевое напряжение 340...460В;
- частота сети 50/60 Гц;
- возможно управление в 4-х квадрантах: да;
- тип преобразователя Непосредственный преобразователь;
- количество выход. фаз 3;
- количество вход. фаз 3;
- с встроенными тормозными сопротивлениями: Нет;
- допускается применение в промышленной зоне: Да;
- допускается применение в жилых и коммерческих зонах: Да;
- макс. частота на выходе 600Гц;

- температура окружающей среды от -10°C до +50°C;
- макс. выход при линейной нагрузке при номин. выход. напряжении 5,5кВт;
- макс. выход при квадратичной нагрузке при номин. выход. напряжении 7,5;
- относительная симметрия сети, допуски по току 15;
- относительная симметрия сети, допуски по частоте 15;
- поддержка протокола SafetyBUS: Нет;
- прямой контракт: Да;
- гарантийный срок эксплуатации, лет 3;
- количество аналог. входов 2;
- макс. выходное напряжение 400В;
- степень защиты (NEMA) 1;
- количество цифров. входов: 5;
- количество цифров. выходов 2;
- количество аналог. выходов 1;
- номинальный выходной ток I2N 13;
- гарантийный срок хранения, лет 3;
- срок службы, лет 7;
- производитель ЕКФ.

#### Преимущества:

- два режима управления двигателями: скалярное – V/f и векторное без обратной связи;
- пусковые моменты 150% 0,25 Гц для применения в конвейерных линиях и других устройствах, критичных к пусковым моментам.
- допускаются перегрузки до 150% в течение 60 секунд, позволяет применять с более мощными двигателями;
- встроенный интерфейс RS-485 с поддержкой протокола Modbus для интеграции в системы диспетчеризации.

- температура окружающей среды от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  для работы в шкафах управления с большим количеством дополнительного оборудования;

- выносной дисплей для установки на лицевую панель щита управления и ограничения доступа обслуживающего персонала внутрь шкафа.

Преобразователь частоты ONI A650-33E037T

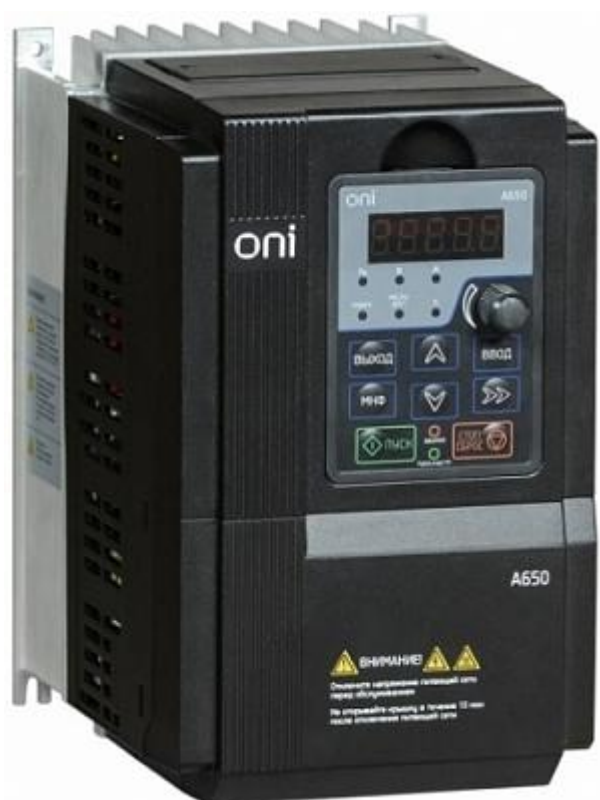


Рисунок 38 - Преобразователь частоты ONI A650-33E037T

На рисунке 38 изображен ONI A650-33E037T. Применение преобразователя частоты ONI A650-33E037T:

Преобразователь частоты ONI A650 разработан специально для применения в системах вентиляции и насосных установках.

Обеспечивает:

- возможность управления группой насосов (каскадное управление);
- очистка насоса;
- возможность управления вращающим моментом.

Технические характеристики:

- Производитель IEK;
- артикул А650-33Е037Т;
- степень защиты (IP) IP20;
- номинальная мощность, кВт 37;
- номинальный ток, А 75;
- напряжение питания, В 380;
- вид управление векторное с разомкнутым контуром;
- рабочая температура, °С -10°С ~ +40°С;
- тип охлаждения Воздушное охлаждение (Вентилятор);
- интерфейс Modbus RTU;
- перегрузка, % в течение 1 минуты 120;
- тормозной модуль не встроен;
- 7 цифровых настраиваемых цифровых входов. Один вход может быть настроен, как импульсный;
- 3 – аналоговых входа;
- релейный выход, кол-во 2.

Преимущества:

Управление устройствами осуществляется векторным методом без сенсора. ПЧ имеют низкую выходную частоту и обеспечивают точное управление скоростью.

Инверторы обладают несколькими полезными функциями. Они могут выдерживать перегрузки до 160% от номинала, а также устойчивы к перепадам напряжения. Преобразователи обеспечивают возможность многоступенчатого управления скоростью (16 шагов) и имеют встроенный ПИД-регулятор и программируемый логический контроллер.

Связь с другими устройствами осуществляется через протокол Modbus, что делает интеграцию с системой автоматизации процессов более удобной. Также предусмотрена возможность запрограммировать оборудование на повышение/понижение напряжения и на перезапуск после

потери питания. Особая функция «Защита от сухого хода» гарантирует продление срока службы агрегатов.

«У инверторов есть специальная функция "Плавное заполнение трубы", которая позволяет существенно снизить риск гидроударов в системе. Кроме того, преобразователи обладают функцией "Очистка насоса", которая позволяет легко и без дополнительных усилий удалять загрязнения насоса» [22]. Два релейных выхода расширяют возможности конфигурирования преобразователей и обеспечивают большую гибкость при настройке.

### Преобразователь частоты Силиум SL9



Рисунок 39 – Преобразователь частоты Силиум SL9

На рисунке 39 изображен преобразователь SL9 - это универсальный привод, который может быть использован в различных отраслях промышленности и доступен в настенном и шкафом исполнении. Он обеспечивает эффективное управление процессами, которое ранее было сложным, и делает его легким и понятным. Привод способен управлять широким спектром механизмов с переменным и постоянным крутящим

моментом, таких как насосы, вентиляторы, конвейеры, смесители и др.

Преобразователь SL9 полностью совместим с приводами общего назначения, и не требует значительной наладки или дополнительного оборудования для работы. Все основные функции уже встроены в устройство, что снижает потребность в дополнительной наладке и упрощает выбор привода. Благодаря этому, привод SL9 готов к работе на многих типах механизмов и обеспечивает высокую гибкость и удобство использования.

Технические характеристики:

- производитель Силиум;
- монтаж - монтаж на стене;
- степень защиты IP20;
- номинальная мощность двигателя ( $M=\text{const}$ ) 2,2 кВт;
- номинальная мощность преобразователя ( $M=\text{const}$ ) 9 кВт;
- номинальный выходной ток ( $M=\text{const}$ ) 5,1 А;
- токовая перегрузка ( $M=\text{const}$ ) 150% от номинальной мощности электродвигателя в течение 60 с, 80% в течение 3 с;
- выходное напряжение трехфазное (от 0 В до напряжения источника питания);
- диапазон управления по частоте 0...3000 Гц;
- метод управления вольт-частотное ( $U/f$ ) управление, векторное управление магнитным потоком;
- несущая частота ШИМ 0.5 -16 кГц;
- входное напряжение 200–240 В, однофазное;
- частота входного напряжения 50 / 60 Гц;
- дискретность настройки частоты дискретный вход 0.01 Гц;
- точность выходной частоты аналоговый вход 0,025 %;
- диапазон настройки  $V/f$  характеристики 0...3000 Гц;
- стартовый момент 150 (0,5 Гц) %;
- время разгона/торможения 0-65000 с;

- характеристики разгона/торможения линейная или S-образная, выбирается пользователем;
- время торможения постоянным током 0-36 с;
- задание уровня токоограничения торможения постоянным током 0-100%;
- сигналы задания частоты аналоговый вход 2 входа 0...10 В, 0...20 мА;
- сигналы задания частоты дискретный вход 6 входов до 50 кГц;
- количество уставок скорости 16;
- контуров ПИД регулирования 1;
- защита двигателя от перегрузки, перегрева, перенапряжения, КЗ, потери фазы;
- последовательный интерфейс Modbus-R;
- способ охлаждения пассивное охлаждение;
- температура рабочая -10...+40 °С;
- температура хранения -20...+60 °С;
- длина 157 мм;
- ширина 118 мм;
- высота 185 мм;
- масса 3 кг.

#### Преимущества:

- несколько классов напряжения;
- номенклатура преобразователей охватывает приборы с однофазным питанием от сети 220 V, трехфазным питанием от сети 220 V, 380 V, 480 V, 690 V и 1140 V;
- поддержка нескольких типов моторов;
- преобразователи позволяют управлять в векторном режиме работой трехфазных асинхронных АС моторов и синхронными трехфазными АС моторами с ротором на постоянных магнитах (PMSM);
- различные режимы управления;
- преобразователи поддерживают четыре режима управления: векторное



управление без датчика (SFVC), векторное управление с датчиком (CLVC), вольт-частотное управление и независимое вольт-частотное управление;

- несколько протоколов обмена данными;
- обеспечивается поддержка следующих протоколов: Modbus-RTU, Profibus-DP, CANopen;
- поддержка нескольких типов энкодеров;
- к преобразователям могут подключаться энкодеры различных типов, таких как дифференциальные энкодеры, энкодеры с открытым коллектором, энкодеры револьверного типа, энкодеры типа UVW;
- улучшенный алгоритм векторного управления;
- реализован быстрый отклик, улучшенные силовые характеристики на низких оборотах, поддержка управления моментом.

Преобразователь частоты Петра-0132



Рисунок 40- Преобразователь частоты Петра-0132

На рисунке 40 изображен Петра-0132. «Транзисторные преобразователи частоты ПЕТРА-0132 предназначены для питания индукторов индукционных электротермических установок. Наиболее распространённое применение - в составе индукционных плавильных печей ёмкостью до 400 кг, в составе индукционных закалочных установок и установок индукционного нагрева для ТВЧ-пайки инструмента, а также для индукционных кузнечных нагревателей» [22].

Преимущества:

- КПД – не менее 93%;
- глубина регулирования мощности — независимо от добротности нагрузки 5...100%;
- коэффициент мощности по сети питания — при любой глубине регулировки мощности — 0,95;
- частота бесконтактного отключения мощности – до 30 раз/мин;
- безопасная работа — от обрыва до короткого замыкания индуктора

Входная цепь;

- встроенный силовой контактор для полного безопасного отключения с ресурсом 5 млн. циклов;

Инвертор

- КПД не менее 90%;
- наибольшая полная мощность в индукторе по сравнению с аналогами;
- работа в широчайшем диапазоне нагрузок;
- сохранение работоспособности при замыкании или обрыве в индукторе;
- синусоидальный выходной ток и напряжение;

Выпрямитель

- коэффициент мощности потребления не менее 0,95;
- система защиты;
- активное ограничение перенапряжений;
- быстрое бесконтактное отключение;

- полный контроль состояния преобразователя. До 80 каналов защит и блокировок;

технические характеристики:

- КПД не менее 93%;
- регулирование мощности 5–100%;
- коэффициент мощности по сети питания 0,95.

Климатические условия шкафа:

- закрытое помещение;
- высота над уровнем моря не более 1000 м;
- температура окружающего воздуха +15...+35 °С;
- относительная влажность до 80% при температуре +25 °С;
- температура охлаждающей воды +5...+20 °С;
- окружающая среда невзрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли, агрессивных паров и газов, разрушающих изоляцию и металлы, отсутствие в охлаждающей воде примесей, образующих осадок;
- температура охлаждающей воды не ниже температуры окружающего воздуха более чем на 15 °С (во избежание появления росы).

Недостатки данного преобразователя заключаются в том, что для него нужна отдельная комната, с хорошей вентиляцией и водопроводом.

Вывод по разделу. В этом разделе диссертации был произведен осмотр рынка, где можем понять какие виды существуют преобразователей частоты, на какие типы они делятся и где применяются. После этого были подробно изучены способы управления преобразователем частоты. Какие датчики нам помогают в этом.

Также выяснили что без инвертора нам никуда не деться, он нужен.

### **3 Модернизация преобразователей частоты**

Современный частотно-регулируемый электропривод переменного тока широко применяется в изделиях военной техники. Для устройств первой категории необходимы строгие условия эксплуатации, определяемые государственными военными стандартами. В условиях термонагруженных отсеков изделий военной техники работа электропривода становится еще более сложной, так как необходимо снизить тепловыделение и обеспечить равномерное рассеивание тепла. Кроме того, повышение энергоэффективности является очень важной задачей для обеспечения гарантийной работоспособности приводного/рабочего механизма, а также для уменьшения потерь в компонентах электропривода и снижения энергопотребления.

«Один из вариантов решения данной задачи - совершенствование существующих и разработка новых типов электродвигателей и полупроводниковых преобразователей с улучшенными энергетическими характеристиками» [30].

«Сегодня благодаря прогрессу в развитии микропроцессорных средств управления возможны решение задач повышенной сложности, такие как идентификация параметров, оценка переменных состояния, адаптивное и оптимальное управление. Разработка электроприводов, которые позволяют осуществлять технологические процессы с минимальными энергетическими затратами, остается одним из важных направлений в теории и практике регулируемого электропривода» [29].

#### **3.1 Принципиальная схема преобразователя частоты**

На рисунке 41 сформировалось представление об архитектуре преобразователей частоты.

Во-первых, «во всех исследованных ЧП применяются интегрированные IGBT модули. На дискретных транзисторах изделий не попадалось. Всегда есть узел ограничителя тока включения. Даже до мощностей в 3 кВт с питанием от однофазной сети не встречаются корректоры мощности (ККМ). Наличие ЕМI фильтра тоже не является обязательным. Не бывает в ЧП и предохранителей. ЧП всегда включают через защитные автоматы.

Интерфейсная часть ЧП гальванически развязана от силовой части. Силовая часть находится под управлением микроконтроллера с архитектурой DSP или RISC. Микроконтроллеры при этом не самые быстрые по современным меркам, не более 80 МГц. Интерфейсная часть может содержать, а может и не содержать отдельного микроконтроллера. Измерители токов фаз на двигателе делаются на основе шунтов, присоединённых к минусу DC шины. Важным компонентом промышленных ЧП является сдублированный узел экстренного гарантированного отключения мотора (SafeTorqueOff, STO). Это узел позволяет отказаться от пары внешних контакторов для отключения питания ЧП в экстренных случаях»[28].

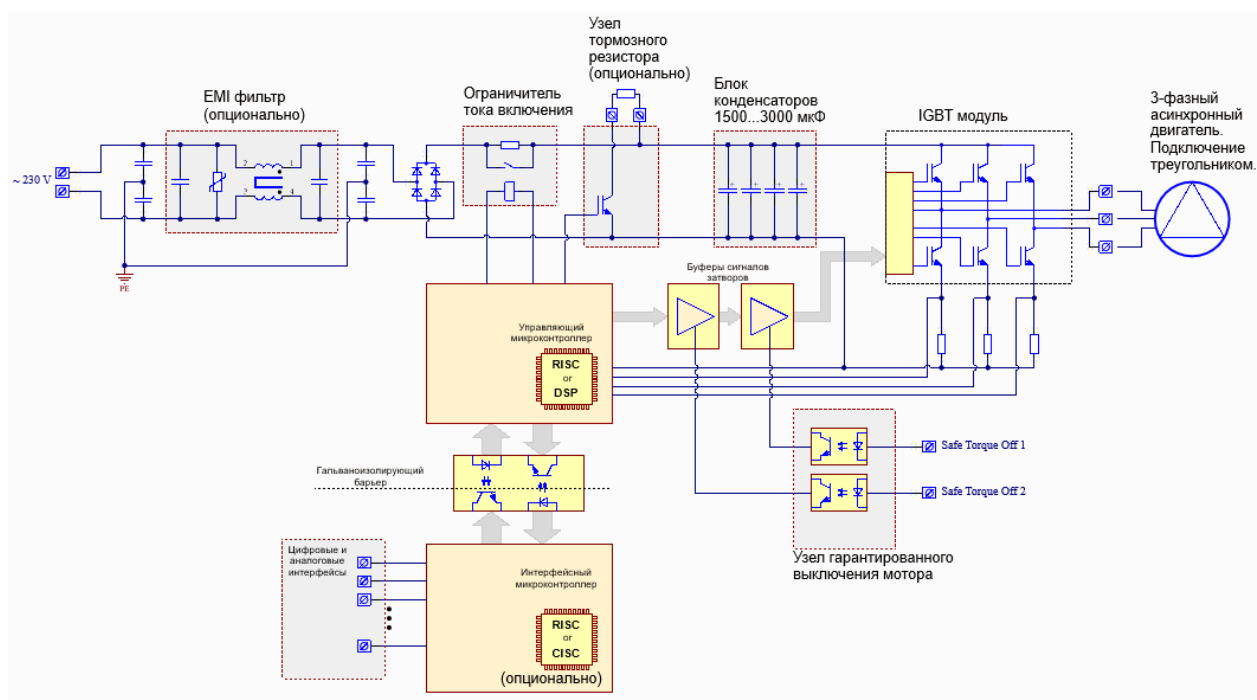


Рисунок 41 - Принципиальная схема преобразователя частоты

В таблице 3 представлен список распространенных методов управления преобразователями частоты, большинство из которых включает контроль оборотов. При этом, при движении с левой стороны таблицы к правой, технические характеристики и точность управления будут расти, однако гибкость и экономическая эффективность будут падать. Стоит отметить, что для управления без датчиков методы и их наименования могут различаться в зависимости от производителя. Также следует учитывать, что выбор оптимального метода управления зависит от требований к работе конкретной системы и ее особенностей. Кроме того, необходимо учитывать, что каждый метод управления имеет свои сильные и слабые стороны, и выбор конкретного метода также зависит от целей и требований к работе системы.

Таблица 3 - Методы управления преобразователями частоты

Метод управления	Управление характеристикой напряжение-частота (V/F)	Управление без датчиков		Векторное управление с PLG
		Управление с ориентацией по полю	Реальное бездатчиковое векторное управление	
Диапазон контроля оборотов	1 : 10 (от 6 Гц до 60 Гц: линии электропитания)	1 : 120 (от 0,5 Гц до 60 Гц: линии электропитания)	1 : 200 (от 0,3 Гц до 60 Гц: линии электропитания)	1 : 1500 1 об./мин/1500 об./мин: линии электропитания с рекуперацией
Реакция	от 10 до 20 (рад/с)	от 20 до 30 (рад/с)	120 (рад/с)	300 (рад/с)
Управление скоростью	ДА	ДА	ДА	ДА
Управление крутящим моментом	НЕТ	НЕТ	ДА	ДА
Управление положением	НЕТ	НЕТ	НЕТ	ДА
Краткое описание	Наиболее распространенный метод управления преобразователем частоты. Напряжение и частота поддерживаются на постоянном уровне.	Для устранения проблем с провалом крутящего момента на низких оборотах при управлении по типу V/F, используется метод управления, который корректирует выходное напряжение с помощью векторных расчетов для тока двигателя.	В стандартных двигателях без PLG управление осуществляется путем расчета и оценки оборотов двигателя на основании параметров двигателя и характеристики напряжение/ток.	В этом методе ток двигателя разделяется на ориентированные по полю компоненты и компоненты, создающие крутящий момент. Каждый из них контролируется независимо друг от друга. Это позволяет с высокой точностью и быстрой реакцией контролировать крутящий момент и положение.
Общее назначение	Данный метод является очень гибким при использовании со стандартными двигателями, которые имеют небольшое количество элементов управления.	Данный метод требует знания параметров двигателя, однако структура цепей остается сравнительно простой из-за небольшого количества элементов управления.	Данный метод требует знания параметров двигателя, а также настройки коэффициента усиления в системе управления.	Данный метод требует наличия двигателя с PLG, а также настройки коэффициента усиления в системе управления.
Доступные для использования двигатели	Стандартный двигатель (без PLG)	Стандартный двигатель (без PLG)	Стандартный двигатель (без PLG)	Стандартный двигатель (с PLG) Специальный двигатель с векторным управлением

Таблица 4 описывает различные приборы, используемые для защиты и управления электрическими системами и преобразователями. Каждый прибор имеет свое предназначение и устанавливается в соответствии с требованиями безопасности и нормами проектирования.

Таблица 4 - Подключение преобразователя частоты к двигателю

Задача	Наименование прибора	Примечание
Защита питающих цепей	Плавкие предохранители	Устанавливаются для гарантированного разрыва питающих цепей в аварийных случаях.
Защита питающих цепей	Автоматический выключатель	Должен быть установлен всегда на стороне питающей сети для защиты цепей силового питания. Номинальный ток выключателя выбирается: $I_{ном} ПЧ$ (номинальный ток преобразователя) $\times 1,4$
Предотвращение пожара, аварийное отключение, обеспечение безопасности персонала	Магнитный контактор	Устанавливается на входе преобразователя, если есть требования аварийного отключения привода (снятия напряжения) внешней командой (аварийная кнопка СТОП и др.). Монтируйте вместе с подавителем помех.
Подавление всплесков питающего напряжения (частичное), сглаживание фронтов всплесков	Входной фильтр (реактор переменного тока)	Должен быть установлен всегда, когда применяется преобразователь малой мощности ( $\leq 15$ кВт) в сетях с большой мощностью ( $\geq 600$ кВА), или при питании мощных потребителей от этой же сети.
Уменьшение воздействия излучения ШИМ на радиоприемные устройства и контрольные приборы	ЭМИ-фильтр (фильтр электромагнитного излучения)	Подавляет помехи диапазона 0,01...30 МГц, образующиеся на питающих зажимах преобразователя. Устанавливайте ЭМИ-фильтр как можно ближе к преобразователю
Дистанционное управление преобразователем частоты	Пульт дистанционного управления (ПДУ)	Позволяет дистанционно (не более 100 м) задавать и контролировать частоту, пускать/останавливать двигатель.
Подавление выбросов выходного напряжения, защита двигателя от перенапряжения	Выходной фильтр (фильтр $dU/dt$ )	Устанавливается на выходе преобразователя при больших расстояниях между преобразователем и электродвигателем (сотни метров). Ставится рядом с частотным преобразователем.
Остановка инерционного агрегата за заданное время	Тормозной прерыватель	Подключает тормозной резистор к шине ПТ для поглощения энергии, генерируемой электродвигателем
Остановка инерционного агрегата за заданное время	Тормозной резистор	Сокращает время торможения путем поглощения энергии, генерируемой электродвигателем

«Устанавливайте реактор переменного тока на стороне питающего напряжения, когда преобразователь подключен к питающей сети с трансформатором большой мощности (более 600 кВА на расстоянии ближе 10 м) или когда подключены конденсаторы повышения коэффициента мощности. В противном случае экстратоки и выбросы напряжения питающей цепи могут привести к повреждению преобразователя» [1].

Если на один частотный преобразователь подключается специальный



электродвигатель или более одного двигателя, то выбирайте преобразователь с номинальным током, который превышает суммарный ток двигателей в 1,1 раза.

«Пусковые и разгонные характеристики двигателя, управляемого преобразователем, ограничены диапазоном токовой перегрузки преобразователя. В сравнении с прямым пуском двигателя от электросети, момент вращения меньше. Если необходим больший стартовый момент, можно использовать преобразователь большей мощности или одновременно увеличить мощность преобразователя и электродвигателя» [9].

При возникновении неисправности выходной контакт реле замыкается и напряжение на выходе преобразователя мгновенно снимается. Однако электродвигатель не может остановиться мгновенно, поэтому для быстрой остановки используется механический тормоз или устройство захвата.

Размещение платы - «Исключите масляный туман и пыль. Устанавливаем преобразователь на чистую поверхность или заключите его в закрытую оболочку так, чтобы не было проникновения пыли. При использовании закрытой оболочки выберите метод охлаждения и размеры оболочки, чтобы температура воздуха вокруг преобразователя была в допустимых пределах» [31]. Не устанавливайте преобразователь на поверхность, подверженную горению, например, деревянную.

При монтаже на стену или вертикальную поверхность преобразователь должен быть ориентирован наибольшей стороной вертикально.

Программирование частотного преобразователя позволяет разгонять двигатель до 400 Гц при помощи встроенного пульта управления. Ошибки программирования могут привести к опасным ситуациям, поэтому необходимо установить ограничение скорости, используя функцию верхнего ограничения частоты. Заводское значение максимальной выходной частоты при задании от внешнего входного сигнала ограничено 50 Гц. Большие значения инжекции постоянного тока и времени действия постоянного тока могут привести к перегреву двигателя.

«Времена разгона/торможения двигателя зависят от генераторного момента двигателя, момента нагрузки и момента инерции нагрузки. Если активирована функция предотвращения срыва, то следует устанавливать увеличенные времена разгона/торможения. После активации этой функции участки времени разгона/торможения увеличиваются так, что преобразователь сам контролирует процесс. Для сокращения времен разгона/торможения можно увеличить мощность преобразователя и, если возможно, двигателя» [14].

Работа: подача сетевого напряжения питания на выходные клеммы U, V, W может привести к разрушению выходных силовых цепей преобразователя. Дополнительно проверяйте провода и их присоединение до подачи питания.

«Если на стороне подачи напряжения питания используется магнитный контактор, не используйте его для пуска и останова электродвигателя при управлении скоростью. В противном случае срок службы преобразователя сокращается» [26].

После отключения напряжения питания электрический заряд на внутренних конденсаторах временно сохраняется. Подождите, пока погаснет индикатор ЗАРЯД, прежде чем касаться внутренних частей преобразователя.

Используйте специальный инструмент для обжима наконечников проводов при подсоединении их к клеммам преобразователя.

### **3.2 Применение внешних приборов**

«Установка и выбор автоматического выключателя на стороне подачи питающего напряжения должен быть установлен автоматический выключатель для защиты проводов питания. Коэффициент мощности преобразователя (зависящий от питающего напряжения, выходной частоты и нагрузки) должен быть учтен при расчете автоматического выключателя. Если должен быть установлен полный автоматический выключатель с

электромагнитным расцепителем, выбирайте больший номинал, т.к. рабочие характеристики изменяются в результате воздействия гармонических токов» [2]. Рекомендуется устройство защитного отключения с порогом срабатывания 200 мА и более.

«Магнитный контактор на стороне питания может использоваться без магнитного контактора на стороне питающего напряжения. Он может быть применен для предотвращения автоматического перезапуска после отключения и последующего восстановления напряжения питания при дистанционном управлении. Однако, если используется управление от собственного пульта управления при частотном регулировании, то магнитный контактор может привести к снижению надежности преобразователя. При этом, автоматический повторный пуск после потери питания невозможен, и автоматическое повторное включение контактора невозможно. Когда используется тормозной резистор с термовыключателем, необходимо проектировать систему управления так, чтобы контактор отключался при перегреве тормозного резистора» [19].

Однако следует учитывать, что если магнитный контактор используется для управления пуском/остановкой при частотном регулировании, то он может привести к снижению надежности преобразователя. Также, когда магнитный контактор отключает напряжение питания от преобразователя, то регенеративное торможение невозможно и двигатель останавливается инерционно.

Применение магнитного контактора на стороне электродвигателя «в общем случае нет необходимости в установке магнитного контактора на стороне электродвигателя. Пуск двигателя вместе с подключением к преобразователю приведет к большим выбросам тока и срабатыванию токовой защиты. Если используется магнитный контактор для переключения двигателя на сеть, переключение контактора производите только при остановленном двигателе и преобразователе. Для переключения двигателя от сети к преобразователю при вращающемся двигателе используйте функцию

поиска скорости» [2].

Если вы используете один преобразователь для нескольких электродвигателей и в нем есть функция защиты от перегрева, то необходимо установить тепловое реле на каждый двигатель отдельно. В этом случае следует отключить встроенную защиту, чтобы избежать конфликта между ней и установленными тепловыми реле.

Чтобы улучшить коэффициент мощности, можно установить реактор переменного тока на стороне питающего напряжения, но фазосдвигающие конденсаторы или подавители помех на выходе преобразователя необходимо избегать, так как они могут быть повреждены гармоническими составляющими на выходе. Также стоит учитывать, что увеличение выходного тока может привести к срабатыванию защиты по токовой перегрузке.

Для подавления этих помех следует использовать ЭМИ-фильтр, а для силового кабеля между преобразователем и двигателем - заземленный металлический экран.

Выводы по разделу: Если провести модернизацию автоматики и аппаратной части электрической станции, то это позволит достичь максимальной защиты и надежности работы главной схемы объекта и, соответственно, повысить общую производительность всего объекта. Была предложена схема преобразователя частоты, и даны рекомендации для безопасного выбора преобразователя частоты.

## Заключение

В энергетической отрасли в России наблюдается стабильный спрос на развитие преобразовательных установок, которое обусловлено стремлением к повышению качества производимой продукции и снижению издержек на электроэнергию. Эти направления являются основными приоритетами развития данной сферы. Исследуя разные виды преобразователей частоты, я пришел к выводу, что на рынке существует огромное количество различных преобразователей частоты. Каждый из них имеет свои особенности и предназначен для конкретных задач в разных отраслях промышленности. Преобразователи могут отличаться по размеру, мощности, функциональности и возможностям интеграции с другими устройствами.

Некоторые преобразователи обладают специальными функциями, такими как защита от перегрузки, термозащита двигателя, многоступенчатое управление скоростью, возможность работы в различных режимах и т.д. Кроме того, многие преобразователи могут быть легко интегрированы в системы автоматизации благодаря наличию специальных протоколов связи.

Обширный выбор преобразователей частоты позволяет выбрать оптимальное решение для конкретной задачи в зависимости от требований к производительности, надежности и цены.

После тщательного изучения была проведена тщательная оценка всех аспектов, включая надежность, безопасность и эффективность работы предприятия, чтобы принять решение о модернизации объекта. Был быстро произведен анализ возможных рисков, дефектов и опасностей, связанных с использованием объекта.

В процессе проделанной работы была получена информация:

- что такой асинхронный двигатель;
- что такое преобразователь частоты;
- принцип работы преобразователя частоты;
- способ управления асинхронным двигателем и ПЧ.

## Список используемой литературы

1. Асинхронные двигатели переменного тока с пусковой обмоткой [Электронный ресурс] URL: <https://vdn-plus.ru>
2. Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А., Преобразовательная техника 2009. [учебное пособие] 300-330.
3. Гломодза В.И Исследование и обоснование параметров преобразователей частоты со звеном постоянного тока, 2022.
4. ГОСТ 23414-84 Преобразователи электроэнергии полупроводниковые. Термины и определения официальное издание Электротехника. Термины и определения. Часть 1: Сб. стандартов. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2005 год
5. Жарикова Т.В Диссертация на тему «Нетрадиционные пути модернизации асинхронных двигателей средней мощности» 2002. [Электронныйресурс] URL: <https://dissercat.com>
6. Зиганшин Б. Г., Дмитриев А. В. Машины для заготовки кормов: регулировка, настройка и эксплуатация 2022, 200с
7. Капустин Н.А, Капустина В.С, Козлов А.А. Устройства и системы защиты двигателей и электроприводов. Учебное пособие. Москва: Энергоатомиздат, 2004. - 400 с.
8. Козярук А.Е. Структура и алгоритмы управления асинхронным электроприводом с полупроводниковыми коммутаторами. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт 2006.
9. Кравченко А,С, Гаранин В.Н деревообрабатывающие станки и автоматические линии 2011 30 с
10. Крейдунова Ю.В., Бубнов А.В., Пахомов Д.В. Методика расчета частоты ШИМ в системе ПЧ-АД // Культура, наука, образование проблемы и перспективы часть III 68-70с. Нижневартовск: Издательство Нижневартовского государственного университета 2014.
11. Монтаж, наладка и техническое обслуживание обслуживание пускорегулирующего электрооборудования — Студопедия.Нет [Интернет

ресурс], Дата обращения 18.06.22

12. Постников В.А., Аверин С.В., Следков Ю.Г. Алгоритм управления трехфазным инвертором в режиме ШИМ // Практическая силовая электроника 2009 №1 (33)

13. Разработка алгоритмов управления преобразователем частоты на основе математического моделирования электромеханических систем: Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электропривод и автоматика промышленных установок» / Сост. Л.А. Блощина, Е.И. Власова, А.В. Калинин, В.А. Постников. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2018. – 34 с.

14. Системы автоматизированного управления технологическими процессами: Учебно-методический комплекс для студентов направления подготовки 13.03.00 «Теплоэнергетика и теплотехника» / Сост.: Н.М.Коробков, М.М. Галкин, Т.О. Кузнецова. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2019. – 120 с.

15. Соколов В.Г. Техническая эксплуатация электрооборудования. Учебное пособие для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 2000. - 400 с.

16. Смирнов И.А., Безладнов С.В. Модернизация преобразовательных установок для асинхронного двигателя / «студенческие дни науки в ТГУ»: научно-практическая конференция (Тольятти, 3 апреля – 28 апреля) : сборник студенческих работ / отв. За вып. С.Х. Петерайтис. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2023.

17. Смирнов И.А., Безладнов С.В. Как влияет преобразователь частоты на асинхронный двигатель / «студенческие дни науки в ТГУ»: научно-практическая конференция (Тольятти, 3 апреля – 28 апреля) : сборник студенческих работ / отв. За вып. С.Х. Петерайтис. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2023.

18. Типовые задачи и упражнения по теории электрических машин и аппаратов / Сост. А.В. Калинин, А.А. Козлов, А.В. Попов. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. – 90 с.

19. Хакимов Р.Р., Дуйсеналиев Т.А., Кожухова И.М. Проектирование и настройка частотных преобразователей для электродвигателей. Москва: Интермет Инжиниринг, 2014. - 240 с.
20. Чернышева Е.А., Бондаренко В.С. Основы управления электроприводами. Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2003. – 384 с.
21. Шавшукова О.П., Федоров В.И. Электрические машины и электроприводы в сельском хозяйстве. Учебное пособие для студентов вузов. Москва: Энергоатомиздат, 2005. - 320 с.
22. Al-Hadidi K.M., Mustafa Y.I., Al-Saffar M.A. A review on modeling and control of induction motor drives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 36. – P. 556-576.
23. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. - 744 p.
24. Elsayed Ahmed E.E.-S., Elserougi A.A.M., Salem M.E.H. Robust fuzzy logic controller for direct torque control of induction motor drive // Electric Power Systems Research. – 2013. – Vol. 96. – P. 78-88.
25. Gupta A.K., Bharti P., Yadav R.K. Analysis and simulation of modified sine PWM inverter using MATLAB/Simulink for solar energy application // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2014. – Vol. 61. – P. 257-264.
26. Hamid A.B.A., Yusof R., Hamada H.M.A. A novel Z-source inverter for photovoltaic power generation system // Renewable Energy. – 2014. – Vol. 66. – P. 442-449.
27. High-performance vector control without AC phase current sensors for induction motor drives: Simulation and real-time implementation, 2021, Azzougab Y., Sahraoui M., Puscab R., Ameidb T., Romaryb R., J.MarquesCardosocA.,  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019057820303955>
28. Improved topology of three-phase series resonant DC-DC boost converter with variable frequency, 2021, Salem M., Jusoh A., Dahidah M., Ishak



D., Richelli A., Alhamroni I., Kamarol M.,  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821004415>

29. Krishnan R. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001. - 712 p.

30. Latify M.A., Abu-Rub H., Al-Naemi F. A new algorithm for speed sensorless control of induction motor drives // *Electric Power Systems Research*. – 2014. – Vol. 110. – P. 32-40.

31. Mohamed Y.S., Hasanien H.M., Radwan A.G. Novel maximum power point tracking controller for photovoltaic systems // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. – 2014. – Vol. 54. – P. 45-52.

32. Rashid M.H. *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*. UpperSaddleRiver, NJ: PrenticeHall, 2003. - 752 p.