



В. В. Беспалов

В. В. Шипилов

# **ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Екатеринбург  
УГЛТУ  
2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Уральский государственный лесотехнический университет»  
(УГЛТУ)

Кафедра управления в технических системах и инновационных технологий

В. В. Беспалов  
В. В. Шипилов

## **ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Методические указания для проведения практических и лабораторных  
занятий, организации самостоятельной работы обучающихся очной  
и заочной форм обучения по направлениям подготовки  
«Автоматизация технологических процессов и производств»,  
«Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих  
производств»

Екатеринбург  
УГЛТУ  
2024

Печатается по рекомендации методической комиссии  
Инженерно-технического института УГЛТУ.

Протокол № 2 от 5 октября 2023 г.

Рецензент – зав. кафедрой управления в технических системах и инновационных технологий д-р техн. наук *А. Г. Гороховский*

Предназначены для всех обучающихся, осваивающих образовательные программы всех направлений и специальностей высшего образования, реализуемых в УГЛТУ.

Редактор З. Р. Картавцева  
Компьютерная верстка Т. В. Упорова

---

Подписано в печать 17.12.2024

Плоская печать

Заказ №

Формат 60×84/16

Печ. л. 1,68

Поз. 24

Тираж 10 экз.

---

Редакционно-издательский сектор РИО УГЛТУ  
Сектор оперативной полиграфии РИО УГЛТУ

## Содержание

Частотно-регулируемый электропривод.....	4
Библиографический список.....	22

## Частотно-регулируемый электропривод

В настоящее время основным источником тяги (энергии, движения т. п.) для технологического оборудования и подъемно-транспортных механизмов являются электродвигатели. Насосы гидроприводы, компрессоры пневмопривода, различные механические редукторы и передачи – везде электродвигатели (э\д).

При совершении многих технологических операций от э\д требуется не просто вращение, а управляемое вращение: плавный разгон и торможение с контролируемым выбегом и(или) временем, работа с разной частотой вращения (по заранее известной циклограмме или в следящем режиме), толчковый режим, независимая скорость вращения на холостом ходу и под нагрузкой, стабилизация момента тяги и др.

Типов э\д существует очень много (коллекторные и без, постоянного и переменного тока, с постоянными магнитами и электромагнитами, пьезоэлектрические, шаговые, синхронные и асинхронные и др.), но в промышленности, особенно лесоперерабатывающей, в основном используют асинхронные трехфазные с короткозамкнутым ротором. Данный тип э\д характеризуется простотой конструкции, низкой стоимостью, высокой надежностью и неприхотливостью, широким ассортиментом, но обладает недостатками: зависимость скорости вращения от нагрузки на валу; существенное падение вращающего момента с уменьшением напряжения на обмотках; невозможность точного позиционирования ротора; отсутствие контролируемого выбега и останова э\д.

Эти проблемы частично решаемы использованием других типов э\д (далеко не всегда приемлемо) или усложнением конструкции и схем управления самих асинхронных э\д (фазный ротор, многообмоточные, переключение со звезды на треугольник, тиристорные регуляторы).

По мере развития и удешевления как силовой электроники (биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT), так и микропроцессорных технологий, а также систем и алгоритмов автоматического управления появилась возможность устранить вышеперечисленные недостатки асинхронных э\д с помощью преобразователей частоты (инверторов) с встроенными программируемыми логическими контроллерами с использованием при необходимости обратных связей (по положению, скорости, перемещению, давлению, расходу и т. д.). Нужно различать местную связь, необходимую для точного выставления скорости вала э\д (петля: вал-энкодер-преобразователь-питание э\д-обороты вала), от главной обратной связи системы управления технологическим оборудованием, в составе которой работает частотный преобразователь. В таких системах инвертор служит для изменения скорости вращения э\д в зависимости от какого-либо технологического параметра (например, петля: «давление – датчик», «давления – контроллер (регулятор) – инвертор-э\д-насос»).

Сам принцип преобразователей известен еще с 30-х годов XX в., но из-за слабости электроники, не получившей распространения.

Использование частотного привода (ПЧ – это управляемый инверторный частотный преобразователь в паре с э\д, в нашем случае стандартный асинхронный, а лучше изначально спроектированный для работы с ПЧ) позволяет отказаться от различных механических и гидравлических редукторов, вариаторов, муфт и т. п.

Надо отметить, что в тяжелых условия (большая мощность, инерционная нагрузка, частое включение, сильно пониженная (менее 20 %) или повышенная скорость вращения и т. п.) особенно важно использовать э\д, который изначально предназначен для использования в ПЧ. У таких двигателей улучшенная статическая и динамическая балансировка ротора, независимая от оборотов система охлаждения, обмотки статора рассчитаны на наличие в питающей сети высокочастотных гармоник, появляющихся из-за работы инвертора. Важно, что сам инвертор в таких ситуациях выбирается с большим запасом паспортной мощности и с особым вниманием обеспечению его теплового режима.

Применение регулируемого электропривода обеспечивает энергосбережение и позволяет получать новые качества систем и объектов. Значительная экономия электроэнергии обеспечивается за счет регулирования какого-либо технологического параметра. Если это транспортер или конвейер, то можно регулировать скорость его движения. Если это насос или вентилятор, то можно поддерживать давление или регулировать производительность. Если это станок, то можно плавно регулировать скорость подачи или главного движения.

Особый экономический эффект от использования преобразователей частоты дает применение частотного регулирования на объектах, обеспечивающих транспортировку жидкостей (газов). До сих пор самым распространенным 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.

Преимущества частотного регулирования наглядно показаны на рис. 1

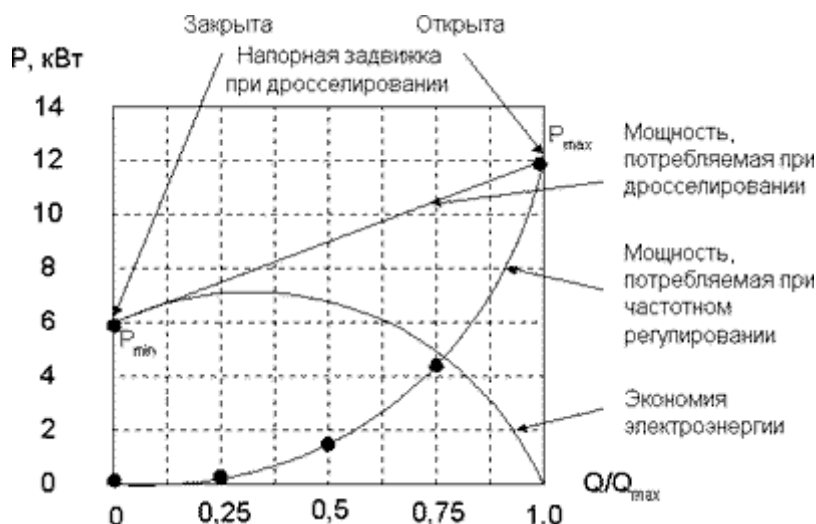


Рис. 1. Потребляемая мощность при разных режимах работы

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 не только обеспечит экономию электроэнергии, но и снизит потери транспортируемого вещества.

Принцип частотного метода регулирования скорости асинхронного двигателя заключается в том, что, изменяя частоту  $f_1$  питающего напряжения, можно в соответствии с выражением

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

где  $\omega_0$  – угловая скорость;

$f_1$  – частота питающей сети;

$p$  – число пар полюсов;

$\pi$  – 3,14;

неизменном числе пар полюсов  $p$  изменять угловую скорость магнитного поля статора ( $p$  обычно 4).

Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а механические характеристики обладают высокой жесткостью.

Регулирование скорости при этом не сопровождается увеличением скольжения асинхронного двигателя, поэтому потери мощности при регулировании невелики.

Для получения высоких энергетических показателей асинхронного двигателя – коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности – необходимо одновременно с частотой изменять и подводимое напряжение.

Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки  $M_c$ . При постоянном моменте нагрузки  $M_c = \text{const}$  напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте:

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

Для вентиляторного характера момента нагрузки это состояние имеет вид:

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

При моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости:

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

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

Упрощенная схема частотного преобразователя на рис. 2

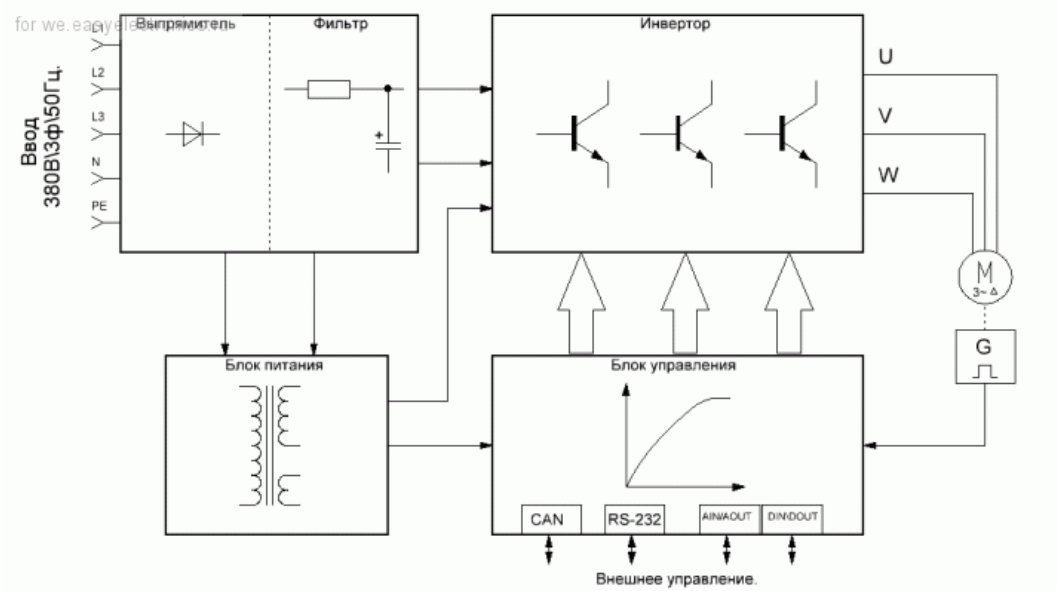


Рис. 2. Структурная схема частотно-регулируемого электропривода

На вход управляемого или неуправляемого выпрямителя поступает трех-, двух- или однофазное напряжение, при необходимости нейтраль и обязательное заземление. Заземлению при использовании ПЧ надо уделять особое внимание! Заземлять через отдельную шину (не друг через



друга) надо все: э\д, инвертор, оболочку кабелей, силовые шкафы, щиты управления. Постоянное напряжение, пройдя через фильтр сглаживается и в некоторых схемах, стабилизируется. Далее поступает на силовой трехфазный импульсный инвертор состоит из шести транзисторных ключей (может быть одно- и двухфазным в зависимости от используемого э\д, соответственно 2 и 4 ключа). Каждая обмотка электродвигателя подключается через соответствующий ключ к положительному и отрицательному выводам выпрямителя. Инвертор осуществляет преобразование выпрямленного напряжения в трехфазное переменное напряжение нужной частоты и амплитуды, которое прикладывается к обмоткам статора электродвигателя. На рис. 3 показаны покаскадные формы напряжений.

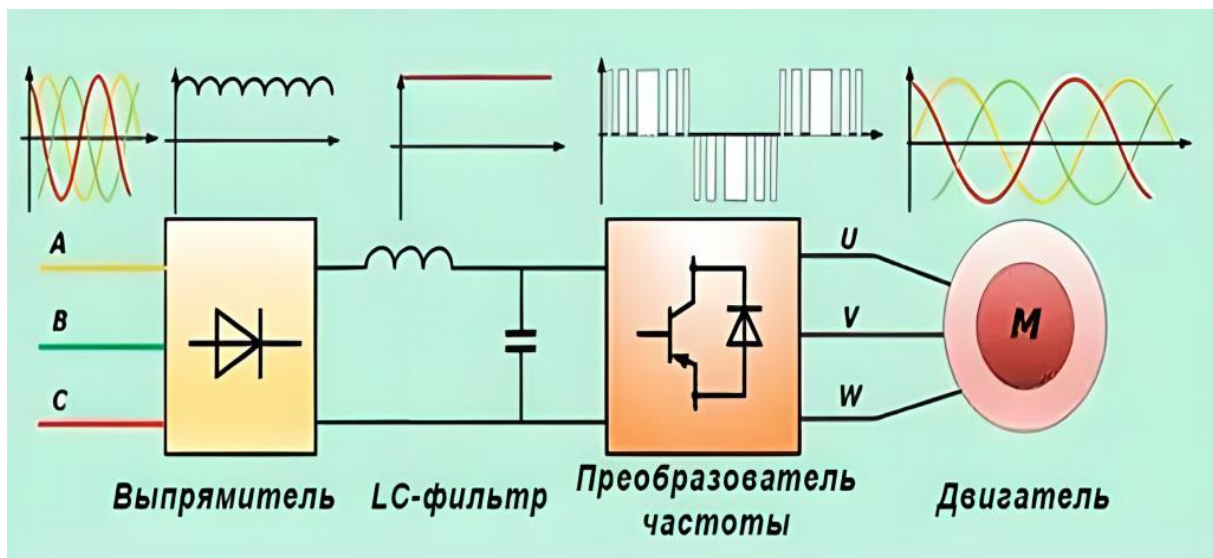


Рис. 3. Принцип работы частотно-регулируемого электропривода

Регулирование выходной частоты и напряжения осуществляется в инверторе за счет высокочастотного широтно-импульсного управления, которое характеризуется периодом модуляции, внутри которого обмотка статора электродвигателя подключается поочередно к положительному и отрицательному полюсам выпрямителя.

Длительность этих состояний внутри периода ШИМ (частота и амплитуда неизменны) модулируется по синусоидальному закону. При высоких (обычно 2...15 кГц) тактовых частотах ШИМ в обмотках электродвигателя, вследствие их фильтрующих свойств, текут синусоидальные токи с необходимыми частотами и амплитудами. Наибольшая ширина импульсов обеспечивается в середине полупериода, а к началу и концу полупериода уменьшается. На рис. 4 это хорошо видно.

$$F_{\text{ШИМ}} = 1 / T_{\text{ШИМ}}$$

$$F_{\text{ШИМ}} = 1 \dots 15 \text{ кГц}$$

$$F_{\text{ВЫХ}} = 1 / T_{\text{ВЫХ}}$$

$$F_{\text{ШИМ}} \gg F_{\text{ВЫХ}}$$

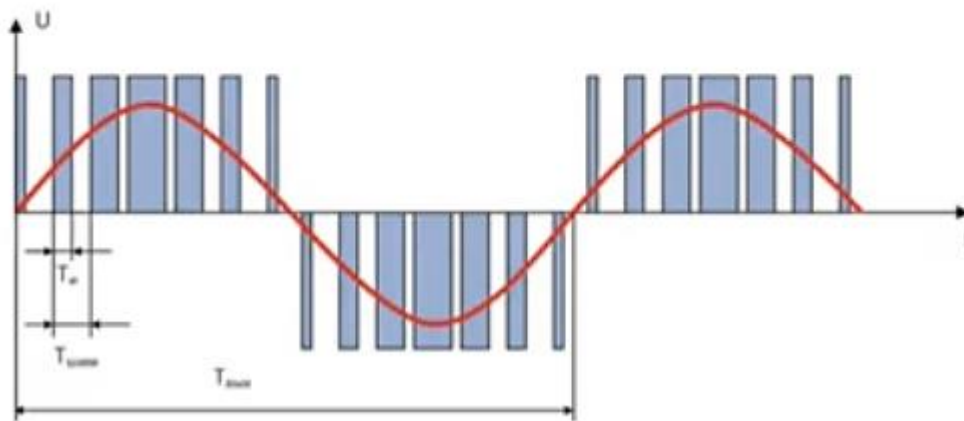


Рис. 4. Широтно-импульсная модуляция

В выходных каскадах инвертора в качестве ключей используются силовые IGBT-транзисторы. По сравнению с тиристорами они имеют более высокую частоту переключения, что позволяет вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы с минимальными искажениями.

Каждый из шести IGBT-транзисторов подключается по встречно-параллельной схеме к своему диоду обратного тока. При этом через силовую цепь каждого транзистора проходит активный ток асинхронного двигателя, а его реактивная составляющая направляется через диоды.

Для включения режима «торможения» двигателя в схему может быть установлен управляемый транзистор с мощным резистором, рассеивающим энергию. Такой прием позволяет убирать генерируемое двигателем напряжение для защиты конденсаторов фильтра от перезарядки и выхода из строя. Перенапряжение возникает при торможении, когда частота вращения вала электродвигателя превышает частоту тока на клеммах электродвигателя. Это часто встречается на кранах или крупных вентиляторах, когда невозможно быстро затормозить вращение.

При наступлении события превышения напряжения этот транзисторный ключ замыкается, передавая энергию звена постоянного тока на тормозной резистор. Конечно, резистор при этом может очень сильно нагреться и даже разрушиться, но при этом не пострадает частотный преобразователь.

Тормозной резистор является опциональным оборудованием и подключается к специальным клеммам преобразователя частоты.

Время и длительность открытия транзисторных ключей определяет микроконтроллерный блок управления на основании заданного алгоритма, текущего режима работы, внешних сигналов, скалярных и векторных значений входных и выходных токов и напряжений, рассогласования между требуемой, расчетной и фактической (при наличии энкодера) скоростью (угла поворота, при абсолютном энкодере) вращения ротора  $\omega_d$ , температурой двигателя (при наличии датчика), температурой самого преобразователя. Последний пункт на практике имеет очень большое значение. Поэтому строго регламентируется положение преобразователя в пространстве и расположение относительно других элементов системы, чтобы встроенная вентиляционная система охлаждения могла поддерживать рабочий тепловой режим.

Современные преобразователи частоты обладают разнообразным набором функциональных особенностей, например, имеют ручное и автоматическое управление скоростью и направлением вращения двигателя, а также встроенный потенциометр на панели управления. Наделены возможностью регулирования диапазона выходных частот от 0 до 1200 Гц.

Преобразователи способны выполнять автоматическое управление асинхронным двигателем по сигналам с периферийных датчиков и приводить в действие электропривод по заданному временному алгоритму. Поддерживать функции автоматического восстановления режима работы при кратковременном прерывании питания. Выполнять управление переходными процессами с удаленного пульта и осуществлять защиту электродвигателей от перегрузок.

Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя позволяет изменять угловую скорость вращения вниз от основной практически до нуля.

При изменении частоты питающей сети верхний предел частоты вращения асинхронного двигателя зависит от его механических свойств, тем более что на частотах выше номинальной асинхронные двигатель работает с лучшими энергетическими показателями, чем на пониженных частотах. Поэтому, если в системе привода используется редуктор, то управление  $\omega_d$  по частоте следует производить не только вниз, но и вверх от номинальной точки, вплоть до максимальной частоты вращения, допустимой по условиям механической прочности ротора.

При увеличении оборотов вращения двигателя выше указанного значения в паспорте частота источника питания не должна превышать номинальную не более чем 1,5–2 раза.

Современные частотные преобразователи могут осуществлять управление асинхронным двигателем скалярным либо векторным способами.

Скалярный способ управления асинхронными механизмами является наиболее популярным благодаря простоте его реализации. Особенно хорошо скалярное управление зарекомендовало себя при его применении в случаях, когда для работы механизма (к примеру, вентилятора) достаточно

удерживать на постоянном уровне скорость вращения ротора. На практике для осуществления такого управления бывает достаточно сигнала обратной связи, поступающего от датчика скорости.

Принцип скалярного управления асинхронным двигателем основан на том, что амплитуда питающего напряжения представляет собой функцию частоты, при этом отношение напряжения к частоте является приблизительно постоянным. С учетом нагрузки на валу, при повышении частоты пропорционально происходит повышение напряжения, благодаря чему значение магнитного потока в зазоре между статором и ротором поддерживается на уровне, близком к постоянному. При этом важно знать особенность такого метода управления: в случае отклонения отношения напряжения к частоте от номинального двигатель получит недостаточное, либо, напротив, избыточное возбуждение, что станет причиной потерь в двигателе и сбоев в работе механизма. Кроме того, скалярное управление асинхронным электродвигателем не дает возможности контроля скорости вращения вала и момента на валу.

Применение векторного управления актуально в случаях, когда при работе асинхронного двигателя может происходить изменение нагрузки на одной и той же частоте, т. е. четкая зависимость между скоростью вращения и моментом нагрузки отсутствует. Кроме того, векторный режим дает более широкие возможности регулирования частоты при номинальном моменте. Принцип векторного управления основан на математическом расчете скорости вращения ротора и момента на валу, основанном на частоте и величине токов обмоток статора. Наиболее совершенные инверторы с векторным управлением дополнительно оснащаются устройствами обратной связи по скорости и положению (энкодеры относительные и абсолютные).

Основными преимуществами векторного метода управления асинхронными электродвигателями являются возможность быстрого изменения нагрузки, обеспечение повышенной плавности хода, высокая точность регулирования скорости и повышенный КПД. При этом следует отметить, что, учитывая необходимость задачи исходных параметров регулируемого привода, векторное управление не подходит для групповых электроприводов (один инвертор на несколько э\д): в этом случае лучше отдать предпочтение частотному преобразователю со скалярным управлением (рис. 5).

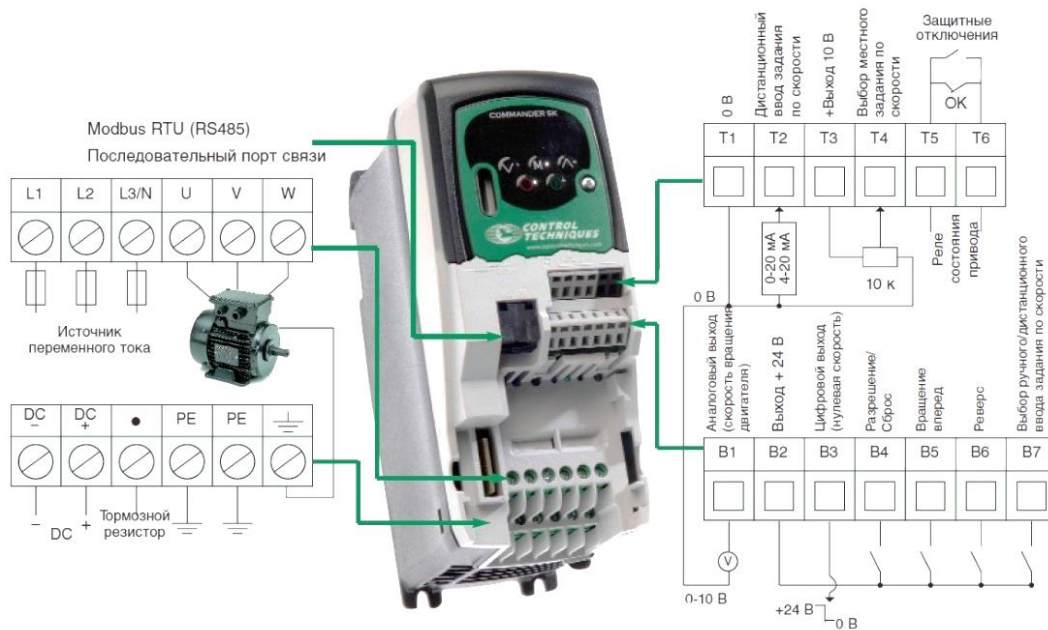


Рис. 5. Пример типичного внешнего вида ПЧ

Виден вертикальный прямоугольный корпус, на лицевой стороне в верхней части панель управления с кнопками и дисплеем, ниже силовые, управляющие и сигнальные клеммы. Внизу и вверху корпуса вентиляционные отверстия. Тыловая панель как правило из металла служит основой всей конструкции и выполняет функции внешнего крепежа и радиатора.

Панель управления для удобства компоновки зачастую выполняется съемной и служит для настройки, программирования, индикации параметров, режимов и оперативного управления (рис. 6). Фрагмент инструкции ПЧ представлен в табл. 1.



Рис. 6. Пример панели управления и фрагмент инструкции ПЧ

## Фрагмент инструкции ПЧ

Кнопка	Цвет	Описание
ПРОГ	Черный	Вход / выход из режима программирования
ВВОД		Вход в меню / подтверждение введенных данных
		В режиме редактирования переход к следующему символу.
		В других режимах переключение отображаемых параметров
		Увеличение значения параметра
		Уменьшение значения параметра
МФ		Выбор режима прокрутки при управлении с клавиатуры
ПУСК	Зеленый	Запуск ПЧ
СТОП	Красный	Остановка ПЧ / сброс ошибки

На большинстве панелей присутствуют кнопки управления (программирования), ручка энкодера, дисплей. В инструкции указаны назначения элементов панели (рис. 7).



Рис. 7. Силовая схема включения ПЧ

Обязательные элементы в схеме: автомат на 3 I-ном. э\д, сам преобразователь мощностью 13–100 % мощности э\д, асинхронный э\д с короткозамкнутым ротором. Остальные элементы обеспечивают электрическую и электромагнитную безопасность схемы и на практике в целях экономии отсутствуют, что нежелательно.

Рис. 8 отображает схему внешних подключений к преобразователю.

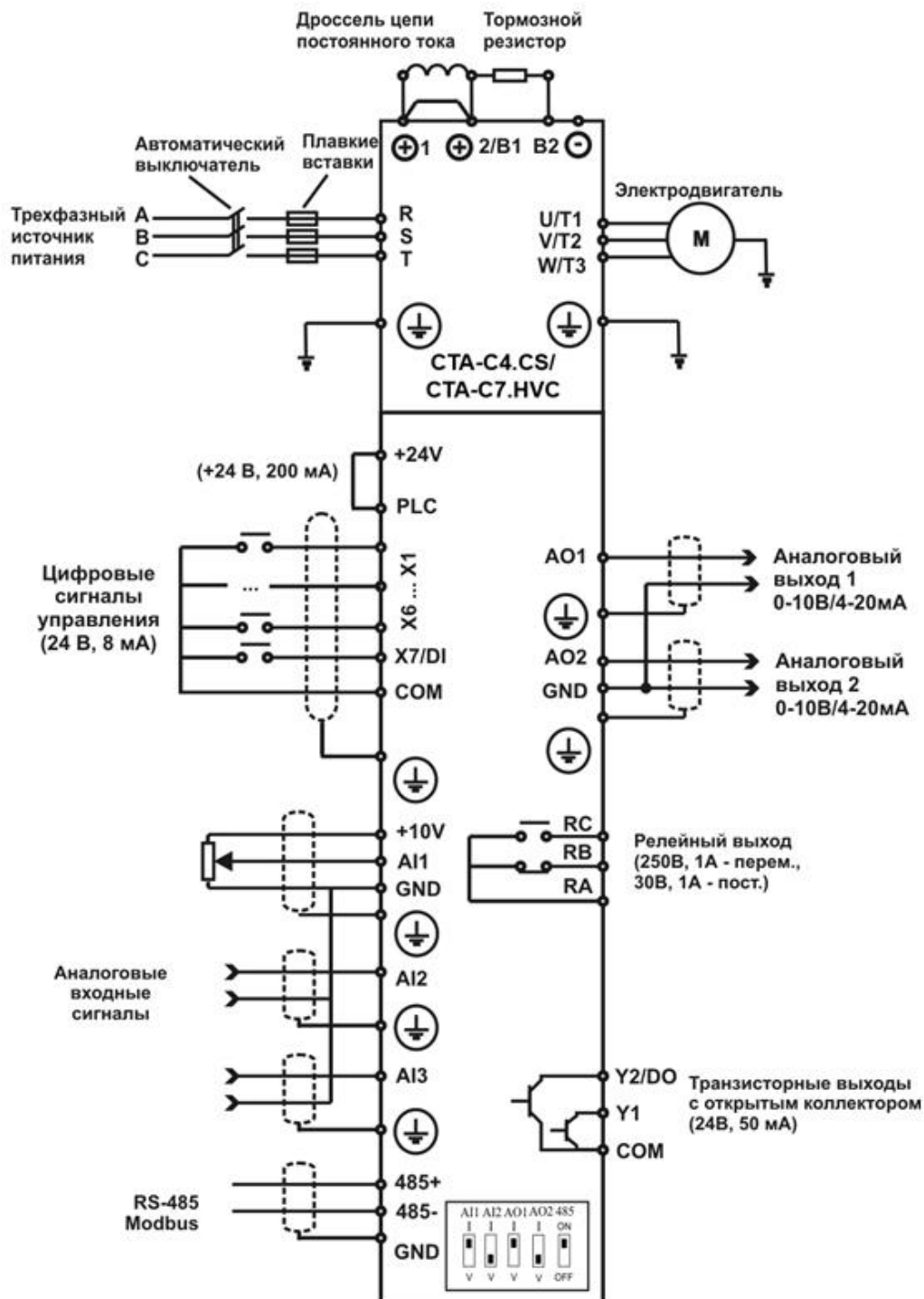


Рис. 8. Внешнее подключение к ЧП



Клеммы RST всегда подключаются к питающей сети, а к клеммам UVW всегда подключается э\д, **важно это не путать!!!**

Как правило, все дискретные и аналоговые входы и выходы в процессе настройки ПЧ программируются в соответствии с требованиями общей системы управления и автоматизации. К ним подключаются различные кнопки, датчики, приборы и исполнительные механизмы. Например: нажатие кнопки на первом цифровом входе приводит к работе на пониженной скорости вперед, нажатие второй ускорение до второй, замыкание третьего входа переводит ЧП в толчковый режим и т. д. и т. п.

Микропереключатели служат для выбора режимов аналоговых клемм (ток или напряжение).

Клеммы RS-485 служат для связи с другими ЧП, контроллерами, компьютерами.

Потенциометр АП1 служит для ручного оперативного изменения частоты.

Рекламный рис. 9 дает некоторое представление о начинке преобразователя. Электронные платы и модули, радиатор, вентилятор охлаждения, корпус, панель управления, разъемы.





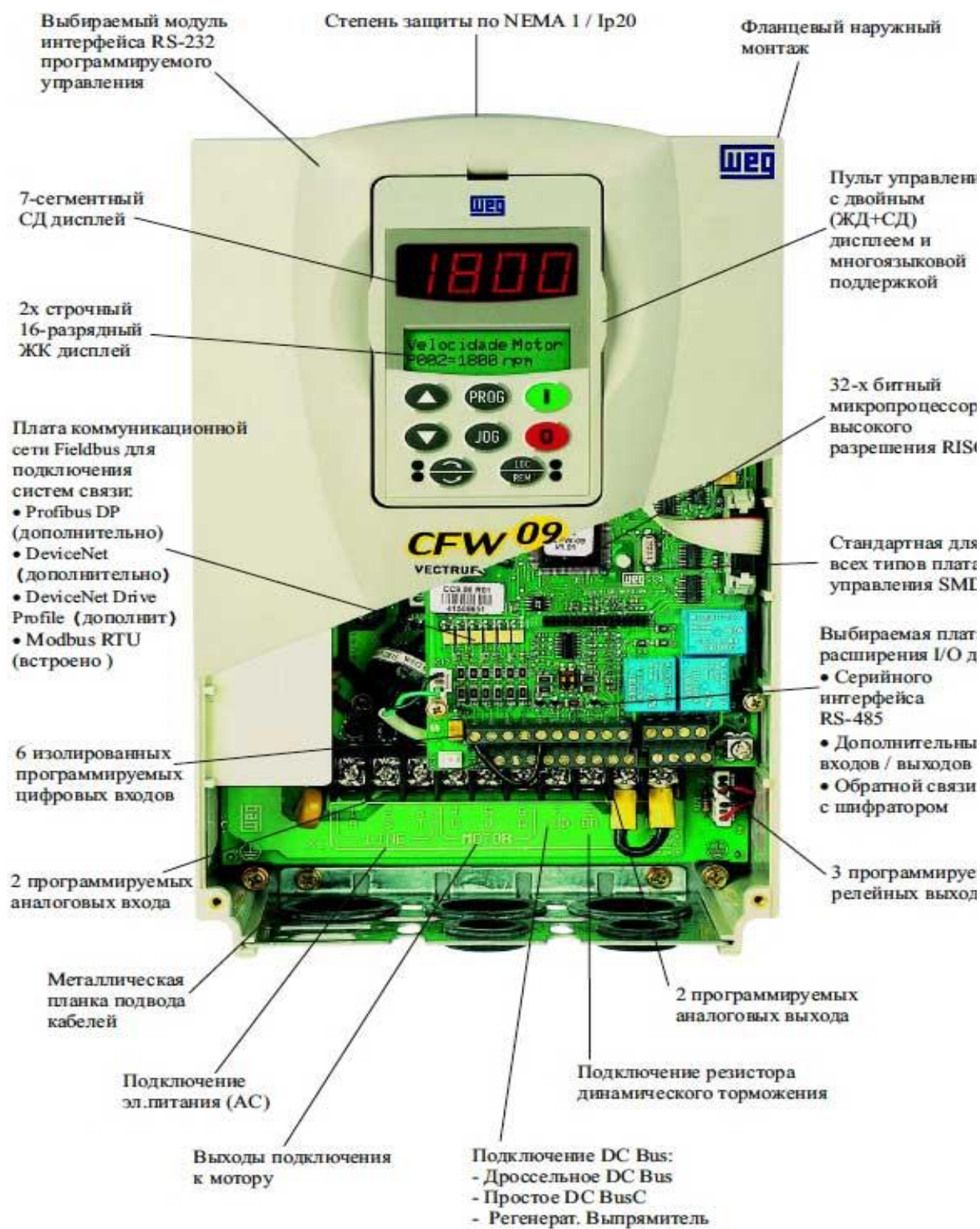


Рис. 9. Пример устройства ПЧ



Рис. 10. Пример э\д «заточенного» для работы в составе ПЧ

На рис. 10 хорошо видны отличия э\д используемого в ПЧ при длительной работе в тяжелом режиме (наличие датчиков температуры и положения ротора, вентилятор охлаждения с оборотами, зависящими от температуры э\д).

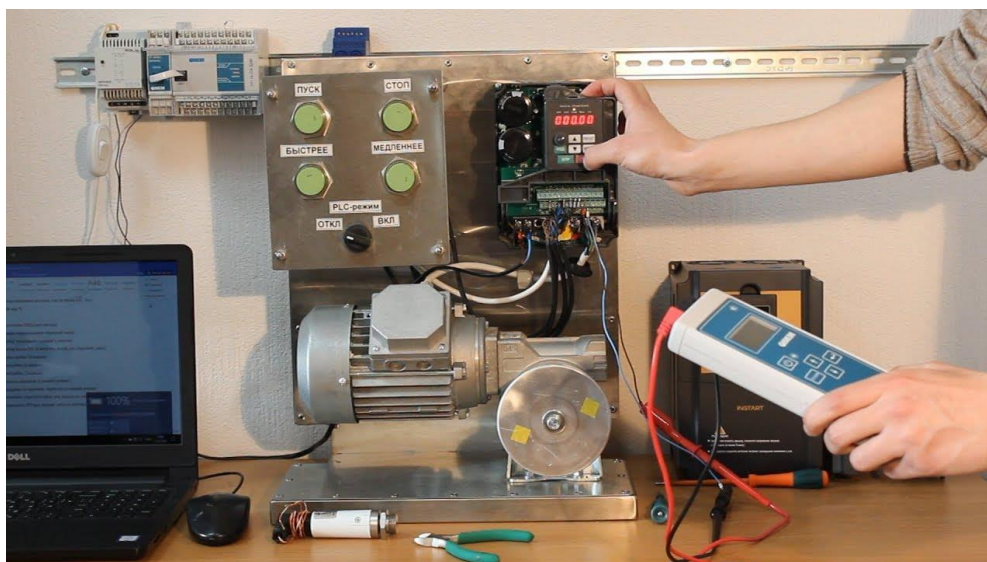


Рис. 11. Пример учебного стенда ЧП

На рис. 11 виден э\д, преобразователь со снятым кожухом, кнопки управления, PLC, PC, измерительный прибор с эмулятором датчика. На рис. 12 представлен пример монтажа преобразователя в шкафу.

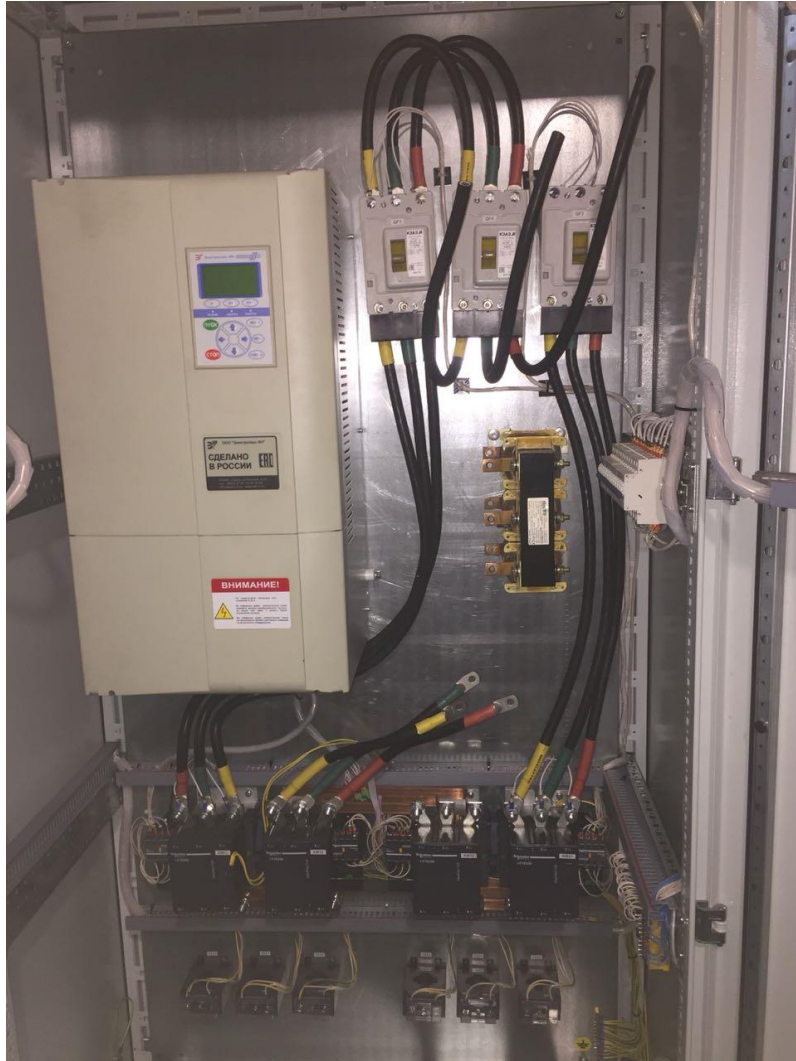


Рис. 12. Пример монтажа преобразователя в шкафу системы управления без лицевой панели

Виден сам ПЧ, автоматы, контакторы, соединительные провода, клеммники и пр.

Несмотря на цифровизацию и стандартизацию общепринятого обозначения частотного преобразователя нет, но можно выделить ряд наиболее логичных и часто встречающихся (рис. 13).

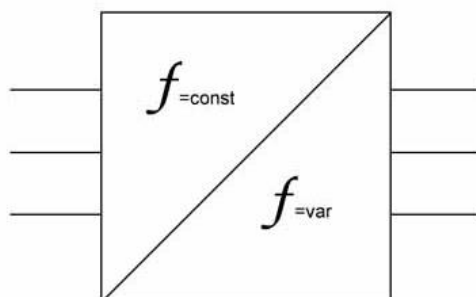


Рис. 13. Условное обозначение ЧП на структурных схемах



Используется общее обозначение преобразователя сигналов и указаны частоты – постоянная на входе (50 Гц) и изменяемая на выходе, вместо букв  $f$  иногда используются символы синусоиды. Другой вариант – отсылка к внутренней структуре AC/DC\DC/AC, т. е. переменное в постоянное, а потом постоянное в переменное. Могут применяться аббревиатуры ЧП, ЧПП, VFD и т. п. Допускается применение символов тиристора или IGBT транзисторов.

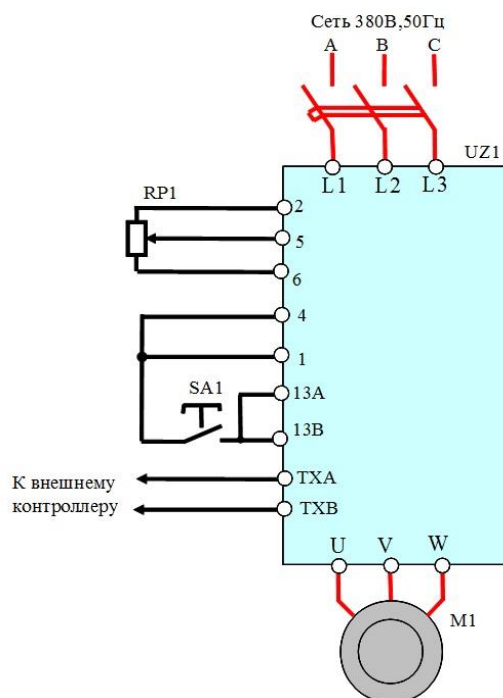


Рис. 14. Условное обозначение ЧП на электрических схемах

Преобразователь в виде прямоугольника с указанием используемых в данной схеме клемм обозначение UZ, иногда UZF.

На функциональных схемах наиболее частое SIC (скорость\частота, индикация, регулирование), но иногда обозначают по регулируемой технологической величине: контур температуры (TC), расхода (FC) и аналогично. Данное обозначение не позволяет понять без приложенной спецификации о использовании именно ЧП, поэтому часто дополнительно используют обозначения из структурных или принципиальных схем.

Любой ЧП перед началом работы требует настроить и при использовании встроенного контроллера (PID-регулятора) запрограммировать. Меню, уровни, пункты, условные обозначения, порядок настройки у каждого производителя свой, но освоив одного, другие по аналогии настраиваются (особенно при чтении инструкции). При «тонкой» подгонке нужно учитывать ошибки перевода и без проверки эффекта не увлекаться одновременным изменением нескольких параметров. В крайнем случае есть возможность возврата к заводским установкам (по умолчанию).

Настройка может производиться с встроенной панели (неудобно), внешним сканером-программатором или с компьютера с необходимым программным обеспечением (дорого).

В меню различают минимум три уровня доступа: обязательный, пользовательский и экспертный. Состав работ по настройке частотного преобразователя зависит от необходимости применения тех или иных функций и наличия внешних устройств управления, датчиков, дополнительных преобразователей.

При первом подключении включении двигателя, до подачи на него напряжения, на дисплее отображается ряд обязательных вопросов, на которые потребитель должен дать ответ при помощи выбора вариантов, прокручивая их кнопками направления. Необходимо подтвердить рабочую частоту сети; вид подключения двигателя: треугольник (*delta*), или звезда (*grid*); тип двигателя: асинхронный, синхронный. Для асинхронного двигателя надо указать его мощность, рабочее напряжение, частоту, ток, номинальную скорость, число полюсов – это все его паспортные, а не рабочие данные. Далее желательно провести автокалибровку преобразователя к данному экземпляру э\д (активные и реактивные сопротивления обмоток, потокосцепление пр.). На этом обязательная часть заканчивается и можно приступать к эксплуатации. В простых схемах использования остальные пункты меню по умолчанию устраивают.

Для удобства и оптимизации эксплуатации на следующем уровне настраивают визуализацию текущих параметров работы ЧП (частота, ток, время, режим и т. п.), способы их изменения. Далее режим эксплуатации э\д (усредненное число включений, отключений, реверсов электрической машины в заданный промежуток времени), требуемое время разгона и динамического торможения электродвигателя, темп разгона (линейный, квадратичный), наибольшую и наименьшую рабочую частоту электрической машины, максимальное значение тока в % от номинального, условия пуска двигателя при подаче напряжения в сети. На реальное время разгона и замедления также влияют различные механические и электрические параметры системы электропривода. Например, при установке очень малого времени разгона или торможения фактическое время может быть больше из-за инерции нагрузки на валу двигателя.

Инерция нагрузки при разгоне может привести к перегрузке по току, при этом преобразователь частоты выходит в ошибку. Чтобы такого не произошло, время разгона нужно выбирать по нескольким критериям. Если данный параметр не принципиален, можно выставить автоматический разгон. В этом случае преобразователь будет выбирать максимальный скоростной режим разгона или замедления, чтобы избежать ошибки перегрузки по току (разгон) или перенапряжению на звене постоянного тока (замедление). Во многих ПЧ имеется несколько вариантов времени разгона и торможения,

которые можно применить для различных этапов технологического процесса. Переключение производится посредством подачи сигнала на соответственно запрограммированный дискретный вход. Производители рекомендуют ограничить число пусков/остановок двигателя в единицу времени, поскольку при разгоне и торможении происходит наибольшая тепловая нагрузка на частотный преобразователь.

На следующем уровне выбирают режим сброса ошибок, вызывающих остановку электродвигателя, «спящий» режим, параметры скалярного или векторного управлений (вид режима, траектория, пропуск резонансных частот и пр.).

Особенно сложно настроить автоматическое регулирование, если это предусмотрено технологией оборудования, на которой ЧП будет эксплуатироваться. Нужно выбрать среди прочего источник сигнала обратной связи и источник опорного сигнала, как правило это токовые входы 4-20 мА. В зависимости от того, какую природу имеет управляющий сигнал (ток или напряжение), выбираются единицы измерения и устанавливаются пределы регулирования. Очень важно не ошибиться со знаком обратной связи – от этого будет зависеть реакция привода на сигнал ошибки. При «нормальном» регулировании сигнал обратной связи отрицательный и привод стабилизируется (в подавляющем большинстве применений требуется именно это), а при «инверсном» он ведет себя противоположным образом – либо идет «вразнос», либо «сваливается». Для управления скоростью этих процессов предназначены временные фильтры. Также можно использовать ПИД-регулятор преобразователя частоты и настроить привод под имеющуюся в механизме динамику. Пропорциональный коэффициент увеличивает быстродействие регулятора, однако может привести к появлению колебаний скорости (рывков), которые даже могут оказаться незатухающими. То же самое происходит при уменьшении времени интегрирования. Оба параметра, по той причине, что динамика системы крайне редко поддается расчету, приходится подбирать опытным путем (лучше делать это методом половинного деления, так можно быстрее найти оптимальную точку на плоскости координат. Между прочим, оптимальные значения параметров регулятора сами могут быть функцией какого-то состояния механизма).

В заключение отметим, что данное методическое пособие ни коим образом не исчерпывает информацию по ЧП, а служит только для указания направлений, в которых нужно развиваться студентам.

## Библиографический список

1. Использование солнечной энергии в России / Г. Б. Осадчий // Энергетика : [сайт]. – URL: <https://foraenergy.ru/ispolzovanie-solnechnoj-energii-v-rossii/> (дата обращения: 27.09.2023).
2. ГОСТ IEC 61800-2-2018. Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. – Москва : Стандартинформ, 2018.

*Для заметок*



*Для заметок*