

*Пономарев Максим Сергеевич,
студент направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация
технологических процессов и производств»*

ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Россия, г. Москва

*Кищенко Роман Валерьевич,
студент направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация
технологических процессов и производств»*

ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Россия, г. Москва

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

***Аннотация:** В статье рассмотрены принципы применения частотно-регулируемого электропривода в автоматизированных технологических установках. Предложена функциональная структура взаимодействия преобразователя частоты, асинхронного двигателя, программируемого логического контроллера и датчиков технологического процесса. Систематизированы области рационального применения скалярного и векторного управления, требования к выбору оборудования, электромагнитной совместимости, функциональной безопасности и диагностике. На расчетном примере центробежной насосной установки показано, что регулирование производительности изменением частоты вращения может снизить годовое потребление электроэнергии с 134,82 до 72,33 МВт·ч, то есть на 46,3 % по сравнению с принятой моделью дросселирования. Сформулированы практические рекомендации по проектированию, программированию и поэтапной наладке электропривода.*

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, технологическая установка, программируемый логический контроллер, энергосбережение, векторное управление.

Annotation: The article considers the application of variable-frequency electric drives in automated technological installations. A functional structure integrating a frequency converter, induction motor, programmable logic controller and process sensors is proposed. The areas of rational use of scalar and vector control are systematized together with equipment-selection, electromagnetic-compatibility, functional-safety and diagnostic requirements. An illustrative calculation for a centrifugal pumping unit shows a reduction in annual electricity consumption from 134.82 to 72.33 MWh, or by 46.3%, compared with the adopted throttling model. Practical recommendations for design, programming and staged commissioning are formulated.

Key words: automated electric drive, frequency converter, induction motor, technological installation, programmable logic controller, energy saving, vector control.

Принцип частотного регулирования электропривода

Основой наиболее распространенного промышленного электропривода является трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Синхронная частота вращения магнитного поля статора зависит от частоты питающего напряжения и числа пар полюсов. Ее можно определить выражением:

$$n_1 = 60f / p, \quad (1)$$

где n_1 — синхронная частота вращения, об/мин; f — частота питающего напряжения, Гц; p — число пар полюсов. Фактическая частота вращения ротора ниже синхронной вследствие скольжения. Изменяя частоту на выходе преобразователя, можно плавно изменять скорость двигателя без внесения

дополнительного сопротивления в силовую цепь и без механического регулирования передаточного отношения.

Преобразователь частоты обычно включает выпрямитель, звено постоянного тока, автономный инвертор и микропроцессорную систему управления. Выпрямитель преобразует сетевое напряжение в постоянное, звено постоянного тока сглаживает пульсации и накапливает энергию, а инвертор формирует последовательность импульсов с требуемыми действующими значениями напряжения и частоты. За счет широтно-импульсной модуляции создается основная гармоника, определяющая электромагнитный режим двигателя. Одновременно силовые ключи формируют высокочастотные составляющие, поэтому при проектировании необходимо учитывать нагрев двигателя, токи утечки, электромагнитные помехи и допустимую длину моторного кабеля.

При частотах ниже номинальной для сохранения магнитного потока применяется согласованное изменение напряжения и частоты. В простейшем случае поддерживается приблизительно постоянное отношение U/f . Выше базовой частоты напряжение уже не может увеличиваться пропорционально, поэтому привод переходит в область ослабления поля: скорость возрастает, но доступный длительный момент уменьшается. Этот режим допустим только после проверки механической прочности двигателя и рабочего механизма.

Плавное задание времени разгона и торможения уменьшает пусковой ток и механические удары. Однако чрезмерно короткая тормозная рампа способна вызвать рост напряжения в звене постоянного тока. Для нагрузок с большой инерцией применяются тормозной резистор, рекуперативный преобразователь либо увеличение времени торможения. Следовательно, параметры ramпы должны выбираться по динамике механизма, а не только по желаемому технологическому быстродействию.

Таблица 1.

Сравнение основных способов управления частотно-регулируемым электроприводом

Способ управления	Преимущества	Ограничения	Рациональная область применения
Скалярное U/f	Простая настройка; устойчивость; невысокие требования к данным двигателя	Ограниченная точность момента и скорости на малых частотах	Насосы, вентиляторы, простые конвейеры и механизмы с умеренной динамикой
Бессенсорное векторное	Повышенная точность скорости и момента без энкодера; хороший пусковой момент	Требуется идентификация параметров двигателя; качество зависит от модели	Мешалки, экструдеры, конвейеры, компрессоры, дозаторы
Векторное с энкодером	Высокая точность в широком диапазоне скоростей; устойчивый момент при малой скорости	Дополнительный датчик, кабель, настройка и обслуживание	Подъемные механизмы, позиционирование, намотка, синхронизация осей
Прямое управление моментом / высокودинамическое	Быстрая реакция момента; хорошая работа при переменной нагрузке	Повышенные требования к преобразователю и наладке	Динамичные технологические механизмы, испытательные стенды, тяжелые приводы

Частотно-регулируемый привод дает наибольший технологический эффект, когда его выходная частота формируется не только ручным заданием, а по измеряемому параметру процесса. В насосной станции таким параметром может быть давление или расход, в вентиляционной системе — разрежение, температура или концентрация, в конвейере — массовая подача, в мешалке — скорость либо косвенная оценка вязкости по моменту двигателя. Обобщенная структура системы показана на рисунке 1.



Рисунок 1. Функциональная структура частотно-регулируемого электропривода в составе АСУ ТП

Датчик технологического параметра передает измеренное значение в ПЛК. Контроллер сравнивает его с заданием и формирует частотную или скоростную команду. Для насосов и вентиляторов часто используется ПИД-регулятор давления, расхода или температуры. Преобразователь выполняет внутреннее управление током, потоком и моментом двигателя, а ПЛК решает задачи межблочных блокировок, очередности запуска, выбора рабочих агрегатов, переключения резервов и обработки аварий. Такое распределение функций уменьшает нагрузку на центральный контроллер и сохраняет быстрые контуры управления внутри привода.

Связь между ПЛК и преобразователем может выполняться дискретными сигналами, аналоговым заданием 0–10 В или 4–20 мА либо промышленной сетью. Дискретно-аналоговое подключение проще и удобно для локальных установок, но передает ограниченное число параметров. Цифровая сеть позволяет задавать скорость, читать ток, момент, мощность, состояние входов, код аварии и счетчики энергии. При этом сеть не должна быть единственным каналом аварийного останова, если анализ риска требует независимой аппаратной цепи безопасности.

SCADA- или HMI-система отображает состояние привода, уставку, фактическую скорость, ток, оценку момента и сообщения диагностики. Архивирование этих величин позволяет выявлять постепенное увеличение нагрузки, загрязнение фильтра, заклинивание механизма, износ подшипников или ухудшение гидравлического режима. Таким образом, частотный преобразователь становится источником данных для технического обслуживания по фактическому состоянию, хотя встроенные оценки не заменяют специализированную вибродиагностику и контроль изоляции.

При построении программы ПЛК целесообразно разделить команды «разрешение работы», «пуск», «направление», «задание скорости» и «аварийный останов». Состояния установки следует оформлять в виде конечного автомата: отключено, готово, запуск, работа, технологическая

остановка, авария и ручной режим. Такой подход исключает противоречивые команды и облегчает проверку блокировок.

Выбор преобразователя частоты и двигателя

Выбор преобразователя только по номинальной мощности двигателя является недостаточным. Основным электрическим критерием служит допустимый выходной ток с учетом перегрузочной способности, режима работы и температуры окружающей среды. Для вентиляторной нагрузки обычно достаточно умеренной перегрузки, тогда как конвейер, дробилка, экструдер или подъемный механизм требуют повышенного пускового и динамического момента. При работе нескольких двигателей от одного преобразователя учитывается суммарный ток, индивидуальная тепловая защита и невозможность независимого регулирования скоростей.

Напряжение питания, число фаз, частота сети и допустимый ток короткого замыкания должны соответствовать месту установки. При высокой температуре, высоте над уровнем моря, загрязненном воздухе или плотной компоновке шкафа применяется снижение допустимого тока либо усиленное охлаждение. Степень защиты корпуса выбирается по окружающей среде. Установка преобразователя внутри герметичного шкафа без расчета тепловыделения способна привести к систематическим отключениям по перегреву.

Двигатель должен быть пригоден для питания от преобразователя. Импульсное напряжение создает повышенную нагрузку на изоляцию, особенно при длинном моторном кабеле. В зависимости от мощности, длины кабеля и рекомендаций изготовителя применяются моторный дроссель, фильтр dU/dt или синусный фильтр. Для мощных машин дополнительно оцениваются подшипниковые токи и необходимость изолированного подшипника либо заземляющей щетки.

На малых скоростях собственный вентилятор двигателя вращается медленно, поэтому допустимый длительный момент может снижаться. Если механизм должен долго работать с большим моментом при 5–15 Гц, требуется

независимая вентиляция, двигатель специального исполнения или увеличение типоразмера. Стандарт IEC 60034-2-3:2024 задает методы определения потерь и КПД двигателей, питаемых от преобразователя, в различных точках скорости и момента [7].

Таблица 3.

Ключевые критерии выбора оборудования

Критерий	Что необходимо проверить	Последствие ошибки
Ток и перегрузка	Номинальный ток двигателя, пусковой момент, цикл нагрузки, длительность перегрузки	Отключение по току, недостаточный момент, перегрев силового модуля
Диапазон скорости	Минимальная и максимальная частота, работа в ослаблении поля, охлаждение двигателя	Перегрев на малой скорости или механическое превышение допустимых оборотов
Сеть и гармоники	Мощность трансформатора, входной дроссель, фильтры, допустимые искажения	Падение напряжения, нагрев кабелей и трансформатора, влияние на соседние нагрузки
Моторный кабель	Длина, экранирование, емкость, допустимое dU/dt	Повреждение изоляции, ложные срабатывания, радиопомехи
Среда и охлаждение	Температура, пыль, влажность, шкаф, вентиляция, степень IP	Перегрев и снижение ресурса
Автоматизация	Протокол связи, число входов/выходов, резервирование, диагностика	Ограниченная интеграция и сложность обслуживания
Безопасность	СТО, тормоз, аварийный останов, требования анализа риска	Опасное непреднамеренное движение механизма

Программная реализация и алгоритмы управления

В автоматизированной установке преобразователь может работать по заданию скорости либо замыкать локальный технологический контур собственным ПИД-регулятором. Первый вариант целесообразен, когда один ПЛК координирует несколько механизмов и использует общую модель процесса. Второй уменьшает сетевую задержку и позволяет сохранить регулирование при временной потере связи с верхним уровнем. Выбор архитектуры должен быть единообразно отражен в проектной документации, чтобы исключить одновременную работу двух регуляторов одного параметра.

Задание скорости следует ограничивать минимальным и максимальным значениями. Минимум определяется охлаждением двигателя, устойчивостью процесса и возможностью механизма выполнять функцию. Например, слишком малая скорость насоса может вызвать отсутствие охлаждающего

протока, а конвейера — зависание материала. Максимум ограничивается номинальной скоростью механизма, кавитационным запасом, допустимой частотой вращения подшипников и мощностью двигателя.

Для исключения колебаний применяются фильтрация измерительного сигнала, зона нечувствительности и ограничение скорости изменения задания. Однако чрезмерная фильтрация ухудшает быстродействие. При настройке ПИД-регулятора сначала проверяют направление действия: повышение частоты должно изменять технологический параметр в ожидаемую сторону. Затем устанавливают безопасные пределы, настраивают пропорциональную и интегральную составляющие и испытывают систему при типовом возмущении.

В установках с несколькими насосами эффективна каскадная логика. Один агрегат регулируется по частоте, а дополнительные насосы включаются ступенчато, когда регулируемый привод приближается к верхнему пределу. При снижении нагрузки насосы выводятся из работы в обратной последовательности. Для равномерного износа выполняется ротация ведущего агрегата по наработке. Алгоритм должен содержать выдержки времени и гистерезис, иначе возможны частые переключения около границы производительности.

Состояния и аварии преобразователя следует разделять на предупреждения, восстанавливаемые отказы и блокирующие отказы. Автоматический перезапуск допустим только для тех причин, при которых повторное движение не создает опасность. После срабатывания защиты двигателя, заклинивания механизма, аварийного останова или потери критической обратной связи запуск должен требовать осмотра и подтверждения оператора.

Аварийный останов проектируется по результатам оценки риска всей машины. Команда от программного ПЛК по обычной сети не должна считаться достаточной, если требуется безопасная функция. Цепи безопасности должны иметь требуемую категорию, диагностическое

покрытие и подтвержденный уровень полноты безопасности. После устранения причины останова повторный пуск не должен происходить самопроизвольно.

Частотно-регулируемый электропривод обеспечивает плавное изменение скорости и момента асинхронного двигателя, уменьшает динамические нагрузки и позволяет непосредственно согласовать производительность механизма с потребностью технологического процесса. Наиболее простой скалярный режим рационален для насосов, вентиляторов и механизмов с невысокими требованиями к динамике. Векторное управление применяется при необходимости точного момента, устойчивой работы на малых скоростях и быстрого изменения нагрузки.

Эффективная автоматизированная установка должна включать технологический датчик, ПЛК или локальный регулятор, преобразователь частоты, двигатель, рабочий механизм и средства диспетчеризации. Функции регулирования, межблочной логики и безопасности должны быть распределены явно. Цифровая связь повышает информативность, но критические защитные функции проектируются по результатам анализа риска и не должны зависеть только от программной команды верхнего уровня.

В расчетном примере для насоса мощностью 30 кВт и продолжительностью работы 6000 ч применение частотного регулирования уменьшило модельное годовое потребление с 134,82 до 72,33 МВт·ч. Экономия составила 62,49 МВт·ч, или 46,3 %. Результат показывает потенциал регулирования скорости при переменной подаче, но для реального объекта должен уточняться по характеристикам насоса, сети, двигателя, преобразователя и фактическому графику нагрузки.

Для практического внедрения необходимо выбирать преобразователь по току и перегрузочной способности, проверять охлаждение двигателя на малой скорости, учитывать электромагнитную совместимость и длину кабеля, вводить корректные данные двигателя и проводить поэтапную наладку. Архивирование параметров привода и процесса позволяет оценить

фактический эффект и перейти от реактивного ремонта к обслуживанию по состоянию.

Использованные источники:

1. Москаленко, В. В. Электрический привод : учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования / В. В. Москаленко. — 7-е изд., испр. — М. : Издательский центр «Академия», 2014. — 368 с.

2. IEC 61800-2:2021. Adjustable speed electrical power drive systems — Part 2: General requirements — Rating specifications for adjustable speed AC power drive systems. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2021. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62105> (дата обращения: 05.08.2026).

3. IEC 61800-3:2022. Adjustable speed electrical power drive systems — Part 3: EMC requirements and specific test methods for PDS and machine tools. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2022. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/65056> (дата обращения: 05.08.2026).

4. IEC 61800-5-1:2022. Adjustable speed electrical power drive systems — Part 5-1: Safety requirements — Electrical, thermal and energy. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2022. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62103> (дата обращения: 05.08.2026).

5. IEC 61800-5-2:2016. Adjustable speed electrical power drive systems — Part 5-2: Safety requirements — Functional. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2016. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/24556> (дата обращения: 05.08.2026).

6. IEC 61800-9-2:2023+AMD1:2025. Adjustable speed electrical power drive systems — Part 9-2: Ecodesign for motor systems — Energy efficiency determination and classification. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2025. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/111276> (дата обращения: 05.08.2026).

7. IEC 60034-2-3:2024. Rotating electrical machines — Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors. Geneva

: International Electrotechnical Commission, 2024. URL:
<https://webstore.iec.ch/en/publication/67758> (дата обращения: 05.08.2026).