

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет: Профессионального образования
Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Профиль: «Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы»
Кафедра: Общенаучных дисциплин

Допускается к защите
и.о. зав. кафедрой ОНД
_____ К.В. Кондратьева
«___» _____ 2026 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему:

**«Автоматизация и оптимизация работы электропривода
конвейера с использованием частотного преобразователя и
ПЛК.»**

Студент: _____ А.В. Кибанов
(подпись, дата)

Группа: АЭП-21-160з

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на _____ стр.
2. Графическая часть на _____ листах.

Руководитель: _____ ст.преподаватель С.А. Нечаев
(подпись, дата)

Руководитель
бакалаврской
программы: _____ Старший преподаватель, В.Г. Лопатин
(подпись, дата)

Проверено
на наличие
заимствования: _____ канд. экон. наук, доцент, К.В. Кондратьева
(подпись, дата)

Лысьва 2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет: Профессионального образования

Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы»

Кафедра: Общенаучных дисциплин

УТВЕРЖДАЮ

и.о. зав. кафедрой ОНД

_____ К.В. Кондратьева

«___» _____ 2026 г.

ЗАДАНИЕ на выпускную квалификационную работу

Фамилия, имя, отчество: Александр Владимирович Кибанов

Группа: АЭП-21-160з

1. Начало выполнения работы: 01.11.2025 г.

2. Срок предоставления на кафедру: 22.06.2026 – 23.06.2026 г.

3. Защита работы на заседании ГЭК: 22.06.2026 – 23.06.2026 г.

4. Выпускная квалификационная работа на тему:

Автоматизация и оптимизация работы электропривода конвейера с использованием частотного преобразователя и ПЛК.

5. Исходные данные к работе: Законодательные и нормативно-правовые акты по вопросам повышения эффективности и надёжности работы ленточного конвейера за счёт автоматизации электропривода на базе частотного преобразователя и программируемого логического контроллера с реализацией энергосберегающих алгоритмов управления.

6. Содержание пояснительной записки:

Введение. Актуальность темы, цель и задачи работы, объект и предмет исследования, методы, ожидаемые результаты, практическая значимость.

1. Общая характеристика объекта исследования.

1.1 Назначение и конструктивные особенности ленточного конвейера.

1.2 Технологические требования к электроприводу конвейера.

1.3 Анализ условий эксплуатации и режимов работы.

2. Анализ проблемы и состояния вопроса в области автоматизации конвейерных приводов.

2.1 Обзор существующих систем электропривода конвейеров.

2.2 Способы регулирования скорости и оптимизации энергопотребления.

2.3 Применение частотно-регулируемого привода: преимущества и ограничения.

2.4 Роль программируемых логических контроллеров (ПЛК) в автоматизации.

3. Выбор и обоснование технических решений.

3.1 Критерии выбора частотного преобразователя для конвейерного привода.

3.2 Выбор типа ПЛК и периферийного оборудования.

3.3 Разработка функциональной и структурной схемы автоматизированного электропривода.

4. Проектирование системы автоматизации и оптимизации.

4.1 Расчёт и выбор мощности электродвигателя с учётом частотного регулирования.

4.2 Настройка частотного преобразователя.

Заключение. Краткое изложение решаемых задач и полученных результатов, практическая значимость работы, соответствие полученных результатов теме и заданию ВКР.

Список используемых источников.

7. Дополнительные указания: нет

8. Основная литература:

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. — М. : Академия, 2004. — 575 с. — ISBN 5-7695-1410-4.
2. Беспалов В. Я., Котеленец Н. Ф. Электрические машины : учебник для вузов / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Академия, 2013. — 320 с. — ISBN 978-5-4468-0296-2.
3. Ерзин О. А., Пантюхина Е. В. Программирование логических контроллеров в системах автоматизации технологических процессов : учебник / О. А. Ерзин, Е. В. Пантюхина. — Тверь : Тверской государственный технический университет, 2019. — 200 с.
4. Золкин А. Л. Программирование логических контроллеров : учебник для СПО / А. Л. Золкин. — 2-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2026. — 148 с. — ISBN 978-5-507-54338-0.
5. Ильинский Н. Ф. Основы электропривода : учебное пособие для вузов / Н. Ф. Ильинский. — 3-е изд., стер. — М. : Издательский дом МЭИ, 2007. — 221 с. — ISBN 978-5-383-00001-4.
6. Ключев В. И. Теория электропривода : учебник для вузов / В. И. Ключев. — 3-е изд. — М. : Энергоатомиздат, 2001. — 704 с. — ISBN 5-283- 01570-9.
7. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. — М. : Академия, 2007. — 361 с. — ISBN 978-5-7695-3805-6.
8. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации : учебник / О. В. Шишов. — М. : ИНФРА-М, 2019. — 365 с. — ISBN 978-5-16-012064-3.
9. ГОСТ 12.2.022-80 Система стандартов безопасности труда. Конвейеры. Общие требования безопасности. — Введ. 1981-07-01. — М. :Стандартинформ, 1980. — 12 с. 85
10. ГОСТ ИЕС 60034-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения и рабочие характеристики. — Введ. 2016-03- 01. — М. :Стандартинформ, 2015. — 110 с.
11. ГОСТ Р 52350.14-2006 (МЭК 60079-14:2002) Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 14. Электроустановки во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок). — Введ. 2007-01-01. — М. :Стандартинформ, 2006. — 50 с.
12. ГОСТ 17516.1-90 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам. — Введ. 1992-01-01. — М. : Издательство стандартов, 1991. — 32 с.

Руководитель ВКР _____ ст. преподаватель С.А. Нечаев
(подпись, дата)

Задание получил _____ А.В. Кибанов
(подпись, дата)

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

№ п/п	Наименование этапа	Объем этапа, в %	Сроки выполнения		Примечание
			начало	конец	
1	Получение задания на выполнение ВКР.	10 /10	01.11.25	09.11.25	
2	Написание ВКР.	20/30	10.11.25	22.05.26	
3	Оформление пояснительной записки.	30/60	23.05.26	14.06.26	
4	Представление работы на проверку и отзыв руководителя квалификационной работы	15/75	19.06.26	20.06.26	
5	Представление ВКР на проверку заведующему кафедрой	10/85	19.06.26	20.06.26	
6	Защита на заседании ГЭК	7/92	22.06.26	23.06.26	

Руководитель ВКР _____ ст. преподаватель С.А. Нечаев
(подпись, дата)

«С календарным графиком ознакомлен» _____ А.В. Кибанов
(подпись, дата)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 84 страницы текста, 4 таблицы, 2 рисунка, 12 источников литературы.

Объект исследования: электропривод ленточного конвейера (горизонтальный, длина 50 м, ширина ленты 800 мм, производительность 100 т/ч, скорость 1,6 м/с, переменная нагрузка 20–100%, режим S1).

Предмет исследования: методы и средства автоматизации и оптимизации работы электропривода конвейера с использованием частотного преобразователя и программируемого логического контроллера.

Цель работы: повышение эффективности и надёжности работы ленточного конвейера за счёт автоматизации электропривода на базе частотного преобразователя и ПЛК с реализацией энергосберегающих алгоритмов управления.

Методы исследования: теоретический анализ технической литературы; методы теории электропривода (расчёт механических характеристик, переходных процессов, тяговый расчёт конвейера); методы математического моделирования (нагрузочные диаграммы); методы алгоритмизации и программирования (разработка логики управления ПЛК).

Основные результаты работы:

1. Проведён анализ существующих систем электропривода конвейеров. Показано, что нерегулируемые системы (прямой пуск, мягкие пускатели) не обеспечивают энергосбережения при переменной нагрузке и создают высокие динамические нагрузки. Обосновано, что решение «частотный преобразователь + ПЛК» является оптимальным для достижения цели работы.

2. Выполнен тяговый расчёт конвейера, выбрана мощность электродвигателя (5,5 кВт, 11,5 А, 1450 об/мин, класс изоляции F). Произведена проверка двигателя по нагреву методом эквивалентного тока – перегрев не превышает допустимого.

3. Обоснован выбор оборудования: асинхронный двигатель 5АИ 132 М4, частотный преобразователь SINAMICS G120 (векторное бездатчиковое управление, PROFINET), ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C с модулем аналоговых входов, датчики (тензодатчик загрузки 4–20 мА, инкрементальный энкодер 1024 имп/об, датчики схода ленты ВД-3, датчик обрыва ленты УКПР2, термодатчики Pt100), панель оператора HMI KTP700 Basic PN, шкаф управления IP54 с фильтровентиляцией.

4. Разработаны структурная и функциональная схемы автоматизированного электропривода, отражающие контуры регулирования скорости, оптимизации энергопотребления и защиты.

5. Выполнена детальная настройка частотного преобразователя: идентификация двигателя (динамический автотюнинг), настройка рамп разгона/торможения с S-образной кривой (5–8 с), выбор векторного бездатчикового управления, активация энергосберегающих функций AOP/ECO, конфигурация защит (тепловая, ограничение тока, Safe Torque Off), настройка дискретных входов и аналогового задания скорости (4–20 мА), параметризация связи с ПЛК по PROFINET.

6. Сформулированы технологические требования к электроприводу: плавный пуск и торможение, регулирование скорости в диапазоне 0,4–1,0 от номинальной, точность стабилизации скорости $\pm 3\%$, перегрузочная способность 150% в течение 60 с, целевая экономия электроэнергии не менее 25%.

Область применения: разработанные технические решения могут быть непосредственно использованы при модернизации конвейерных линий на горно-обогатительных комбинатах, предприятиях строительной индустрии, пищевой и химической промышленности, а также в складских и логистических центрах. Система легко интегрируется в существующие АСУ ТП предприятия.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Назначение и конструктивные особенности ленточного конвейера	10
1.2 Технологические требования к электроприводу конвейера	15
1.3 Анализ условий эксплуатации и режимов работы	20
2 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНВЕЙЕРНЫХ ПРИВОДОВ	26
2.1 Обзор существующих систем электропривода конвейеров	26
2.2 Способы регулирования скорости и оптимизации энергопотребления	31
2.3 Применение частотно-регулируемого привода: преимущества и ограничения	36
2.4 Роль программируемых логических контроллеров (ПЛК) в автоматизации	42
3 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	49
3.1 Критерии выбора частотного преобразователя для конвейерного привода	49
3.2 Выбор типа ПЛК и периферийного оборудования	55
3.3 Разработка функциональной и структурной схемы автоматизированного электропривода	67
4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ	72
4.1 Расчёт и выбор мощности электродвигателя с учётом частотного регулирования	72
4.1.1 Исходные данные для расчёта	72
4.1.2 Методика тягового расчёта конвейера	73
4.1.5 Проверка двигателя по нагреву при частотном регулировании	77
4.2 Настройка частотного преобразователя	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	89

ВВЕДЕНИЕ

В современном промышленном производстве ленточные конвейеры являются одним из наиболее распространённых видов транспортирующих машин, обеспечивающих непрерывное перемещение сыпучих и штучных грузов. Электропривод конвейера, как правило, работает в тяжёлых условиях: частые пуски и остановки, нестабильная загрузка, высокие пусковые токи и механические перегрузки. Традиционные системы управления на основе прямого пуска асинхронного двигателя (АД) не позволяют гибко регулировать скорость, снижать динамические нагрузки и эффективно использовать электроэнергию.

Внедрение частотно-регулируемого привода (ЧРП) в сочетании с программируемым логическим контроллером (ПЛК) открывает новые возможности для автоматизации конвейерных линий. Частотный преобразователь позволяет плавно изменять скорость вращения двигателя, обеспечивать заданный закон изменения момента и существенно снижать пусковые токи. ПЛК, в свою очередь, реализует логику управления, сбор данных с датчиков (скорости, загрузки, положения, температуры), защиту оборудования и интеграцию в верхний уровень АСУ ТП.

Несмотря на очевидные преимущества, на многих действующих предприятиях конвейерные приводы до сих пор эксплуатируются без современных средств автоматизации, что приводит к повышенному износу механической части, перерасходу электроэнергии и частым аварийным остановам. Поэтому задача автоматизации и оптимизации работы электропривода конвейера на базе ЧРП и ПЛК является высокоактуальной для повышения надёжности, энергоэффективности и технологической гибкости производственных процессов.

Цель работы – повышение эффективности и надёжности работы ленточного конвейера за счёт автоматизации электропривода на базе

частотного преобразователя и программируемого логического контроллера с реализацией энергосберегающих алгоритмов управления.

Задачи работы:

1. Провести анализ существующих систем электропривода конвейеров и обосновать необходимость применения ЧРП и ПЛК.
2. Разработать структурную и функциональную схему автоматизированного электропривода конвейера.
3. Выбрать и обосновать тип частотного преобразователя, ПЛК и датчиков обратной связи в соответствии с технологическими требованиями.
4. Выполнить расчёт мощности электродвигателя и параметров силовой части с учётом работы в режиме частотного регулирования.
5. Разработать алгоритм управления и программу для ПЛК, обеспечивающие: плавный пуск и останов, стабилизацию скорости при переменной нагрузке, защиту от аварийных режимов, автоматическое снижение скорости при малой загрузке.
6. Построить механические и регулировочные характеристики электропривода, оценить качество переходных процессов.

Объект исследования – электропривод ленточного конвейера производственного предприятия (на примере конвейера транспортной линии).

Предмет исследования – методы и средства автоматизации и оптимизации работы электропривода конвейера с использованием частотного преобразователя и ПЛК.

Методы исследования:

- теоретический анализ (изучение технической литературы, нормативной документации, обзор существующих решений);
- методы теории электропривода (расчёт механических характеристик, переходных процессов, энергетических показателей);
- методы математического и имитационного моделирования (построение нагрузочных диаграмм, моделирование работы ПЛК);

— методы алгоритмизации и программирования (разработка логики управления в среде программирования ПЛК);

Ожидаемые результаты:

— разработанная структурная и принципиальная схема автоматизированного электропривода конвейера;

— алгоритм и программа управления ПЛК с возможностью адаптации под различные режимы загрузки;

— расчётные характеристики электропривода (механические, энергетические, переходные процессы);

— количественная оценка снижения энергопотребления (ориентировочно на 20–35% по сравнению с нерегулируемым приводом) и увеличения межремонтного ресурса конвейера.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные технические решения могут быть непосредственно использованы при модернизации конвейерных линий на горно-обогатительных комбинатах, предприятиях строительной индустрии, пищевой и химической промышленности. Разработанные алгоритмы управления позволяют сократить затраты на электроэнергию, снизить динамические нагрузки на ленту и роlikоопоры, уменьшить число аварийных остановов и увеличить срок службы оборудования. Кроме того, система легко интегрируется в существующие АСУ ТП предприятия.

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Назначение и конструктивные особенности ленточного конвейера

Ленточный конвейер (ленточный транспортер) – это непрерывно действующее транспортное устройство, в котором груз перемещается на тяговом и несущем элементе – гибкой ленте. Ленточные конвейеры являются одним из наиболее распространённых видов промышленного транспорта благодаря высокой производительности, простоте конструкции, надёжности и возможности перемещать грузы на значительные расстояния (от нескольких метров до нескольких километров) как в горизонтальной, так и в наклонной плоскостях.

Основное назначение ленточного конвейера в рамках данной работы – транспортировка сыпучих или штучных грузов в составе технологической линии производственного предприятия. Конкретный тип груза (например, руда, щебень, уголь, зерно, готовая продукция) определяет требования к ленте, роlikоопорам, скорости и системе управления, однако принципы автоматизации электропривода остаются общими.

Типичные области применения ленточных конвейеров, где требуется автоматизация и оптимизация привода:

- горнорудная и угольная промышленность (транспортировка породы, угля, концентрата);
- строительная индустрия (подача песка, щебня, цемента);
- пищевая и химическая промышленность (транспортировка сыпучих продуктов);
- складские и логистические центры (перемещение грузов в коробках, мешках).



Рисунок 1.1 – Ленточный конвейер

Ленточный конвейер (рисунок 1.1) состоит из следующих основных узлов:

Лента (тягово-несущий орган). Изготавливается из многослойной прорезиненной ткани (резинотканевая) или синтетических материалов с сердечником (стальным или текстильным). Лента опирается на роlikоопоры и огибает приводной и натяжной барабаны. Ширина ленты для рассматриваемого конвейера – 800 мм.

Приводной барабан. Установлен на приводной станции. Передаёт крутящий момент от электродвигателя через редуктор (или непосредственно, при мотор-барабане) на ленту. Поверхность барабана может быть футерованной (резиной) для увеличения сцепления с лентой.

Натяжной барабан и натяжное устройство. Обеспечивает необходимое предварительное натяжение ленты, предотвращая её проскальзывание на приводном барабане и провисание между роlikоопорами. Натяжное устройство может быть винтовым (для коротких конвейеров), грузовым или гидравлическим.

Роlikоопоры. Поддерживают ленту на прямолинейных участках. Различают:

— верхние (рабочие) роlikоопоры – несут груз и ленту, обычно трёхроlikовые (жёлобчатые) для придания ленте формы жёлоба;

— нижние (холостые) роlikоопоры – поддерживают порожнюю ветвь ленты, обычно однороlikовые или двухроlikовые.

Роlikоопоры устанавливаются на раме с определённым шагом (зависит от ширины ленты и насыпной плотности груза).

Рама (станина). Несущая металлоконструкция, на которой монтируются все элементы конвейера. Изготавливается из прокатных профилей (швеллер, уголок, труба) и соединяется болтами или сваркой.

Загрузочное и разгрузочное устройства. Загрузочный лоток направляет груз на ленту, разгрузка может производиться через концевой барабан или с помощью разгрузочной тележки (при необходимости разгрузки в нескольких точках).

Очистные устройства. Скребки или щётки для очистки ленты от налипающего груза на разгрузочном барабане и на холостой ветви.

Ограждения и защитные устройства. Борты, улавливатели оборвавшейся ленты, датчики схода ленты, датчики затормаживания.

Для правильного выбора электропривода и последующей оптимизации необходимо понимать режимы работы конвейера:

— По характеру загрузки: возможна постоянная номинальная загрузка (редко) или, что чаще, переменная загрузка – от 0 до 100% от номинальной производительности. Это характерно для питающих конвейеров, работающих от бункеров с нестабильным истечением, либо для конвейеров, обслуживающих дробилки или грохоты с неравномерной подачей.

— По длительности включения: большинство конвейеров работают в продолжительном режиме S1 (постоянная нагрузка в течение времени, достаточного для достижения теплового равновесия). Однако возможны повторно-кратковременные режимы (например, при циклической работе склада).

— По направлению движения: обычно нереверсивные (груз движется в одну сторону), но в некоторых схемах требуется реверс.

Статический момент сопротивления на валу приводного барабана определяется как:

$$n = \frac{F_t \cdot D_b}{2 \cdot i \cdot \eta_{\text{ред}}} \quad (1)$$

где:

F_t – тяговое усилие на барабане, Н;

D_b – диаметр приводного барабана, м;

i – передаточное число редуктора;

$\eta_{\text{ред}}$ – КПД редуктора.

Тяговое усилие, в свою очередь, зависит от длины конвейера, массы груза, массы ленты, сопротивлений роlikоопор и т.д. Для горизонтального конвейера преобладает сопротивление от трения ленты о роlikоопоры и от изгиба ленты при огибании барабанов. Для наклонного конвейера добавляется составляющая от подъёма груза.

Исходя из назначения и конструкции, электропривод ленточного конвейера должен удовлетворять следующим требованиям:

Обеспечение заданной скорости ленты (обычно 0,8–3,0 м/с) с возможностью её регулирования для согласования с производительностью линии и энергосбережения.

Плавный пуск и торможение – исключение рывков, предотвращающих обрыв ленты и просыпание груза.

Пусковой момент, достаточный для трогания загруженного конвейера (коэффициент пускового момента 1,2–1,5 от номинального момента двигателя).

Стабилизация скорости при изменении загрузки – не более 5–10% отклонения для большинства технологических процессов (кроме дозирующих конвейеров, где требуется высокая точность).

Защита от аварийных режимов: затормаживание (заклинивание), обрыв ленты, сход ленты в сторону, перегрузка по току, превышение температуры подшипников.

Энергоэффективность – минимизация расхода электроэнергии при работе с неполной загрузкой.

Возможность интеграции в систему автоматизации – дистанционный пуск/останов, передача данных о скорости, токе, температуре на диспетчерский пункт.

Для определённости в рамках данной ВКР принимаются следующие параметры конвейера (на основе типового конвейера средней производительности):

Параметр	Значение
Тип конвейера	Ленточный, горизонтальный
Производительность номинальная Q	100 т/ч
Ширина ленты B	800 мм
Скорость ленты номинальная v	1,6 м/с
Длина конвейера по оси L	50 м
Высота подъёма (горизонтальный)	0 м
Угол наклона	0°
Насыпная плотность груза ρ	1,5 т/м ³ (например, щебень)
Режим работы	S1, продолжительный
Характер загрузки	Переменная (20–100% от Q)
Место установки	Закрытое отапливаемое помещение
Напряжение питающей сети	3×380 В, 50 Гц

Приводная станция предполагает использование электродвигателя, редуктора (цилиндрического или коническо-цилиндрического) и муфты. В существующей (неавтоматизированной) версии конвейера применяется прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, что приводит к высоким пусковым токам, динамическим ударам и отсутствию регулирования скорости. Задача данной работы – модернизация привода с установкой частотного преобразователя и ПЛК для устранения указанных недостатков.

1.2 Технологические требования к электроприводу конвейера

Электропривод ленточного конвейера является ключевым элементом, определяющим его производительность, надёжность и энергоэффективность. Технологические требования к электроприводу формулируются исходя из:

- характера транспортируемого груза (сыпучий, штучный, абразивный, налипающий);
- требуемой производительности технологической линии;
- режимов работы (пуски, остановки, реверс, длительная эксплуатация);
- условий окружающей среды (температура, влажность, запылённость);
- требований безопасности и охраны труда.

Для проектируемого конвейера (горизонтальный, длина 50 м, ширина ленты 800 мм, номинальная производительность 100 т/ч, груз – щебень, режим S1, переменная загрузка) формулируются следующие группы требований.

Требования к режимам пуска и останова

Плавность пуска. При прямом пуске асинхронного двигателя возникают динамические усилия, в 3–5 раз превышающие номинальные, что приводит к:

- проскальзыванию ленты на приводном барабане и её ускоренному износу;

- растяжению стыков ленты и риску её обрыва;

- повышенным нагрузкам на редуктор, подшипники, раму.

Технологическое требование: ограничение ускорения ленты в период пуска не более $0,3\text{--}0,5\text{ м/с}^2$ (для предотвращения просыпания груза в месте загрузки). Соответственно, время пуска должно быть не менее 3–5 секунд для принятых параметров. Частотный преобразователь должен обеспечивать программируемый S-образный закон разгона (плавное нарастание ускорения и его снижение в конце разгона).

Плавность торможения. При штатной остановке (не аварийной) также требуется плавное снижение скорости во избежание пробуксовки ленты и обратного просыпания груза. Допустимое замедление – не более $0,3\text{--}0,5\text{ м/с}^2$. При необходимости точной остановки (например, перед разгрузочным устройством) требуется позиционирование с погрешностью не более 50–100 мм.

Предотвращение обратного хода. Для наклонных конвейеров требуется механический или электрический тормоз, удерживающий ленту при останове. В данном проекте конвейер горизонтальный, однако при возможной модернизации требование следует предусмотреть.

Требования к регулированию скорости

Основной технологической причиной регулирования скорости является переменная загрузка конвейера. Поток груза может изменяться от 20 до 100% номинальной производительности (например, из-за неравномерной работы питателя). Поддержание постоянной максимальной скорости при неполной загрузке ведёт к:

- повышенному износу ленты и роlikоопор (холостой ход);

- перерасходу электроэнергии (до 40–60% от потребления при номинальной загрузке).

Требование: электропривод должен обеспечивать плавное регулирование скорости ленты в диапазоне от 0,4 до 1,0 от номинальной (0,64–1,6 м/с). Регулирование может осуществляться:

- вручную (оператор с НМІ-панели);
- автоматически (ПЛК по сигналу датчика загрузки).

Дополнительное требование для ремонтных и наладочных работ (осмотр ленты, замена роlikоопор) необходима «ползучая скорость» 0,1–0,2 м/с.

Требования к точности поддержания скорости

Для большинства конвейерных систем не требуется высокая точность стабилизации скорости (допустимо $\pm 5\text{--}10\%$). Однако в рассматриваемом конвейере, подающем груз на дробилку или грохот, желательно поддерживать скорость с погрешностью не более $\pm 2\text{--}3\%$, чтобы обеспечить равномерную загрузку технологического агрегата.

Требование: электропривод должен иметь обратную связь по скорости (датчик на неприводном барабане или использование оценённой скорости из ЧРП) и ПИ-регулятор, обеспечивающий отклонение не более 3% от заданной при скачках нагрузки до 30%.

Требования к пусковому и перегрузочному моменту

Двигатель и ЧРП должны обеспечить пуск конвейера при полностью загруженной ленте (100% производительности). При этом статический момент сопротивления на валу двигателя (с учётом КПД редуктора) составляет величину M_c . Пусковой момент должен быть не менее $1,2 \cdot M_c$, чтобы гарантированно преодолеть момент трения покоя и инерцию. Кратковременная перегрузочная способность (например, при кратковременном заклинивании) – не менее 1,5 от номинального момента.

Требование частотный преобразователь должен иметь функцию ограничения тока (токоограничение) и возможность кратковременной перегрузки по моменту (150% в течение 60 с для типовых ЧРП).

Требования к защите и диагностике

Технологический процесс требует непрерывной работы конвейера. Аварийные остановки не должны быть ложными, но при реальных неисправностях система должна надёжно отключать привод и сигнализировать о причине.

Обязательные виды защиты:

Защита	Датчик/метод	Действие
Обрыв ленты	Датчик проскальзывания (разность скоростей приводного и холостого барабанов)	Аварийный останов
Сход ленты в сторону	Концевые выключатели с роликом	Аварийный останов
Затормаживание (заклинивание)	Контроль тока и скорости – отсутствие скорости при наличии тока	Аварийный останов
Перегрузка по току	Измерение тока в ЧРП	Снижение скорости или останов (по алгоритму)
Перегрев двигателя	Термистор РТС или термореле	Отключение при превышении
Перегрев подшипников привода	Датчики температуры РТ100	Предупредительная сигнализация, затем останов

Дополнительное требование: система должна вести журнал аварий с меткой времени для последующего анализа.

1.2.7 Требования к энергоэффективности

Заданный уровень экономии электроэнергии по сравнению с нерегулируемым приводом составляет **не менее 25%** в среднегодовом исчислении. Это достигается:

- работой на пониженной скорости при малой загрузке;
- автоматическим остановом при длительном отсутствии груза;
- оптимизацией напряжения в ЧРП (функция ECO);
- поддержанием высокого коэффициента мощности (не менее 0,95).

Требования к интеграции в систему автоматизации

Электропривод должен быть интегрирован в существующую или проектируемую АСУ ТП предприятия. Требования:

— дистанционный пуск/останов с пульта управления и с верхнего уровня (SCADA);

— передача телеметрии: скорость, ток, мощность, загрузка, температура, состояние защит;

— возможность изменения задания скорости с HMI или через полевую шину (Modbus TCP, Profinet);

— работа в каскаде с соседними конвейерами (блокировки пуска/останова, синхронизация скоростей).

Требования к надёжности и условиям эксплуатации

Конвейер работает в закрытом отапливаемом помещении с умеренной запылённостью. Температура окружающей среды +5...+35°C. Требования:

— наработка на отказ системы электропривода – не менее 10 000 часов;

— класс защиты электрооборудования – IP20 (в шкафу управления) или IP54 для датчиков на конвейере;

— лёгкость обслуживания – доступ к основным узлам ЧРП и ПЛК для диагностики и замены.

Таблица 1.1 - Сводная таблица технологических требований

Параметр	Значение / диапазон
Диапазон регулирования скорости	0,4–1,6 м/с (0,4–1,0 от ном.)
Точность стабилизации скорости	±3% от заданной
Время пуска (0→1,6 м/с)	5–8 секунд (программируемое)
Время торможения (1,6→0 м/с)	5–8 секунд (программируемое)
Пусковой момент (отн.)	≥1,2 от М с
Перегрузочная способность	150% в течение 60 с

Параметр	Значение / диапазон
(кратковременная)	
Экономия электроэнергии (целевая)	$\geq 25\%$ по сравнению с прямым пуском
Защиты	обрыв, сход, затормаживание, перегрузка, перегрев
Интерфейс управления	дискретные сигналы + полевая шина (Modbus TCP/Profinet)
Режим работы	S1 (продолжительный) с возможностью автоматического останова

Сформулированные технологические требования определяют выбор оборудования и алгоритмов управления:

—необходимо применение частотного преобразователя с векторным управлением для обеспечения плавного пуска и регулирования скорости;

—требуется ПЛК для реализации автоматического изменения скорости по загрузке, останова при отсутствии груза, защиты и диагностики;

—система должна быть интегрирована в верхний уровень автоматизации.

—Данные требования будут использованы в разделах 3 (выбор оборудования) и 4 (проектирование системы автоматизации).

1.3 Анализ условий эксплуатации и режимов работы

Для обоснованного выбора электропривода, частотного преобразователя, программируемого логического контроллера и датчиков необходимо детально проанализировать условия, в которых эксплуатируется конвейер, а также реальные режимы его работы. Неучтённые факторы могут привести к преждевременным отказам оборудования, снижению эффективности автоматизации и невыполнению требований по энергосбережению.

Анализ внешних условий эксплуатации

Конвейер размещён в закрытом отапливаемом производственном помещении. Тем не менее, даже в таких условиях существуют факторы, влияющие на электрооборудование.

Температурный режим:

— Диапазон температуры воздуха в помещении: $+5^{\circ}\text{C} \dots +35^{\circ}\text{C}$ (зимой минимальная, летом максимальная).

— Вблизи конвейера могут быть локальные источники тепла (подшипники, редуктор, электродвигатель), создающие зоны с температурой до $+50^{\circ}\text{C}$.

— Для ЧРП и ПЛК, размещаемых в шкафу управления, необходимо обеспечить температуру внутри шкафа не выше $+40^{\circ}\text{C}$ (путём принудительной вентиляции или кондиционирования).

Влажность и конденсат:

— Относительная влажность воздуха в помещении – до 80% при $+25^{\circ}\text{C}$, без выпадения конденсата (отапливаемое помещение).

— Риск конденсата отсутствует, однако при останове конвейера в холодное время и последующем пуске возможна конденсация на поверхности электрооборудования, поэтому шкаф управления должен быть оснащён обогревателем (например, на 50–100 Вт с термостатом).

Запылённость:

— ЧРП и ПЛК должны быть размещены в шкафу с защитой не ниже IP54 (пыленепроницаемом) и с фильтром вентиляции.

— Датчики, установленные непосредственно на конвейере (концевые выключатели схода ленты, датчики проскальзывания), должны иметь защиту IP65 или выше.

Вибрация и удары:

— При работе конвейера возникают вибрации из-за вращения роlikоопор, биения ленты, работы редуктора. Уровень виброскорости на раме конвейера – до 2–3 мм/с в диапазоне 10–200 Гц.

— ЧРП и ПЛК, устанавливаемые на виброизолирующих прокладках в шкафу управления (вне зоны интенсивной вибрации), могут работать без дополнительных мер.

— Датчики на конвейере должны быть вибростойкими (по ГОСТ 17516.1, группа N1).

Электромагнитная совместимость (ЭМС):

— Рядом с конвейером могут работать другие электроприводы (дробилки, грохоты, питатели), создающие гармоники и импульсные помехи.

— Частотный преобразователь сам является источником помех. Требуется установка входного фильтра ЭМС (класс С3 по МЭК 61800-3) и экранированных кабелей между ЧРП и двигателем длиной до 50 м.

Режимы работы определяют тепловую нагрузку на двигатель, требуемый ресурс механических узлов и алгоритмы управления.

Конвейер рассчитан на продолжительную работу (режим S1 по ГОСТ ИЕС 60034-1). В номинальном режиме (загрузка 100%, скорость 1,6 м/с) двигатель работает без ограничений по нагреву. Время непрерывной работы может достигать 8–12 часов (одна рабочая смена).

Режим переменной загрузки

Анализ технологического процесса (например, питание дробилки) показывает, что фактическая загрузка конвейера редко бывает постоянной. Типичная нагрузочная диаграмма конвейера в течение часа может выглядеть следующим образом:

— 20% времени – загрузка 0–20% (конвейер работает почти вхолостую, груз поступает неравномерно);

— 40% времени – загрузка 20–60% (частичная загрузка);

— 30% времени – загрузка 60–90%;

— 10% времени – загрузка 90–100% (кратковременные пики).

Средняя загрузка за смену обычно не превышает 60–70% от номинала. Это создаёт большой потенциал для энергосбережения за счёт снижения скорости или останова при отсутствии груза.

Количество пусков и остановов

В зависимости от схемы управления (ручной или автоматический), конвейер может запускаться:

— В ручном режиме: 2–4 пуска в смену (в начале и конце смены, после обеденного перерыва). Это несущественно.

— В автоматическом режиме (с остановом при отсутствии груза): количество пусков может достигать 10–20 в час, если груз поступает короткими порциями. Это требует частотного преобразователя с высокой коммутационной способностью и плавного пуска для снижения износа.

Для проектируемой системы предусматривается режим автоматического останова при длительном (более 2–5 минут) отсутствии груза, что увеличит число пусков/остановов, но это допустимо для ЧРП (ресурс IGBT-модулей рассчитан на миллионы операций).

Переходные режимы

Пуск: при прямом пуске (в существующей схеме) переходный процесс длится 1–2 секунды, пусковой ток достигает 500–700 А (для двигателя 30 кВт), что вызывает провалы напряжения и рывок ленты. После модернизации (ЧРП) пуск будет длиться 5–8 секунд с током не более 60–80 А.

Останов: штатный останов – плавное снижение скорости по S-образной кривой. Аварийный останов – мгновенное отключение привода и, при необходимости, наложение механического тормоза (для наклонных конвейеров).

Изменение нагрузки: при скачкообразном увеличении загрузки (например, порция груза с питателя) скорость может временно снижаться на 2–5% до срабатывания регулятора скорости. Это допустимо.

Возможные аварийные режимы, которые должна распознавать и корректно обрабатывать система управления:

Таблица 1.2 – Аварийные режимы ленточного конвейера

Аварийная ситуация	Причина	Последствия	Действие системы
Обрыв ленты	Износ стыков, заклинивание, перегрузка	Останов конвейера, повреждение оборудования	Немедленный останов по сигналу датчика обрыва
Сход ленты в сторону	Перекося ленты, забивание роликотопор	Повреждение кромок ленты, рассыпание груза	Останов при срабатывании концевого выключателя
Затормаживание (заклинивание)	Попадание постороннего предмета, разрушение подшипника	Перегрев двигателя, пробуксовка ленты	Контроль тока и скорости – останов при превышении тока выше порога и снижении скорости ниже порога
Перегрузка по току	Резкое увеличение загрузки сверх 120%	Перегрев двигателя, срабатывание автомата	Снижение скорости (если возможно) или аварийный останов
Исчезновение фазы сети	Неисправность сети, обрыв кабеля	Останов привода, несимметричный нагрев	Отключение ЧРП по защите от неполнофазного режима
Перегрев двигателя	Длительная перегрузка, недостаточное охлаждение	Старение изоляции, выход двигателя из строя	Отключение по сигналу термодатчика

На основе анализа условий эксплуатации и режимов работы можно сформулировать дополнительные требования к проектируемой системе:

Пылевлагозащита: шкаф управления – IP54, датчики на конвейере – IP65.

Температурный режим: предусмотреть вентилятор с фильтром в шкафу и, при необходимости, обогреватель с термостатом.

Виброзащита: установка ПЛК и ЧРП на амортизирующие прокладки.

ЭМС: входной фильтр ЭМС, экранированные кабели двигателя и датчиков, заземление экранов с двух сторон.

Ресурс пусков/остановов: ЧРП должен допускать не менее 100 пусков в час (типовые преобразователи допускают до 500–1000).

Автоматический останов при отсутствии груза: реализовать в ПЛК с регулируемой задержкой (2–5 минут).

Диагностика аварий: ведение журнала с указанием времени и типа аварии для анализа причин.

2 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНВЕЙЕРНЫХ ПРИВОДОВ

2.1 Обзор существующих систем электропривода конвейеров

Ленточные конвейеры относятся к классу механизмов с постоянным или слабо переменным статическим моментом сопротивления, работающих в продолжительном режиме (S1) с возможными кратковременными перегрузками. Электропривод (ЭП) конвейера должен обеспечивать: плавный пуск и останов, стабилизацию скорости при изменении загрузки, реверсирование (при необходимости), защиту от аварийных режимов (затормаживание, обрыв ленты, перегрузка). В зависимости от требований технологического процесса, мощности и ответственности установки применяются различные системы электропривода.

Классификация систем электропривода конвейеров

По способу управления скоростью системы ЭП конвейеров можно разделить на три основные группы:

1. Нерегулируемый электропривод – частота вращения двигателя не изменяется или изменяется дискретно (многоскоростные АД).

2. Регулируемый электропривод с плавным изменением скорости – с помощью частотных преобразователей, систем генератор-двигатель (Г-Д), электромагнитных муфт скольжения и др.

3. Комбинированные системы – сочетание регулируемого привода с автоматизированной системой управления на базе ПЛК, реализующей оптимизацию режимов работы по энергетическим и технологическим критериям.

По роду тока и типу двигателя преобладающим является асинхронный короткозамкнутый двигатель (АДКЗ) как наиболее простой, надёжный и дешёвый. Для мощных конвейеров (свыше 200–300 кВт) иногда применяют синхронные двигатели или двигатели постоянного тока (ДПТ) в системах Г-Д.

Нерегулируемые системы электропривода

Прямой пуск АДКЗ – наиболее простая и дешёвая схема. Двигатель подключается к сети через контактор, пуск происходит прямым включением на полное напряжение. Достоинства: простота, низкая стоимость, высокая надёжность. Недостатки для конвейеров:

- пусковой ток достигает (5–7), что вызывает провалы напряжения в сети и требует мощных защитных аппаратов;

- пусковой момент обычно не регулируется, при тяжёлом пуске (загруженная лента) возможен запуск с рывками, что ведёт к повышенному износу ленты, редуктора и роликоопор;

- отсутствие регулирования скорости – конвейер работает с постоянной скоростью независимо от загрузки, что неэффективно при переменном потоке груза;

- торможение, как правило, осуществляется свободным выбегом, реже – механическим тормозом, что увеличивает путь выбега и не позволяет точно позиционировать ленту.

Переключение «звезда – треугольник» позволяет снизить пусковой ток примерно в 3 раза, но пусковой момент уменьшается также в 3 раза, что не всегда приемлемо для конвейеров с высоким моментом трогания. Применяется ограниченно, в основном для маломощных конвейеров с лёгким пуском.

Мягкие пускатели (SSR – Solid State Relay) – полупроводниковые устройства, ограничивающие пусковой ток за счёт фазового регулирования напряжения. Они обеспечивают плавный разгон до номинальной скорости без возможности её последующего регулирования. Достоинства: снижение динамических нагрузок, простота монтажа. Недостатки: неэффективны при длительной работе с пониженной скоростью (перегрев двигателя), не позволяют реализовать энергосберегающие режимы при переменной нагрузке.

Регулируемые системы электропривода

Система «генератор – двигатель» (Г-Д)

Исторически одна из первых систем плавного регулирования скорости. Состоит из приводного двигателя постоянного тока (ДПТ), питаемого от генератора постоянного тока, который вращается асинхронным двигателем (или синхронным). Регулирование скорости осуществляется изменением тока возбуждения генератора. Достоинства: плавное регулирование в широком диапазоне (до 1:10), высокий пусковой момент, рекуперативное торможение. Недостатки: низкий КПД (из-за двойного преобразования энергии), большие габариты и масса, высокая стоимость, необходимость обслуживания коллекторно-щёточного узла. В современных конвейерных установках практически не применяется, уступив место частотным преобразователям.

Электромагнитные муфты скольжения

Между двигателем и конвейером устанавливается муфта с независимым возбуждением. Изменяя ток возбуждения, можно плавно изменять скольжение и, следовательно, скорость конвейера. Достоинства: простота управления, низкая стоимость. Недостатки: потери мощности пропорциональны скольжению (нагревание муфты), невысокий КПД на пониженных скоростях, ограниченный диапазон регулирования (обычно до 1:3). Используется в основном в маломощных конвейерах (до 15–30 кВт) там, где не требуется высокая энергоэффективность.

Частотно-регулируемый электропривод (ЧРП)

В настоящее время частотные преобразователи стали доминирующим решением для регулируемого электропривода конвейеров любой мощности. Принцип действия – изменение частоты и напряжения на статоре асинхронного двигателя для поддержания постоянства магнитного потока (закон $U/f = \text{const}$ или векторное управление). Достоинства ЧРП:

- плавный пуск и торможение с заданным законом изменения скорости (ограничение пускового тока на уровне $(1-1,5)I_n$);
- широкий диапазон регулирования скорости (до 1:100) с сохранением перегрузочной способности;

- энергосбережение при переменной нагрузке – возможность автоматического снижения напряжения при недогрузке (режим оптимизации энергии);

- реализация сложных законов управления (поддержание постоянства мощности, момента, стабилизация скорости с обратной связью);

- рекуперативное торможение (с использованием тормозных резисторов или активных выпрямителей);

- возможность интеграции в АСУ ТП через полевые шины (Profibus, Modbus, EtherNet/IP и др.).

Недостатки ЧРП: более высокая первоначальная стоимость по сравнению с нерегулируемыми системами; необходимость фильтрации гармоник (при большом количестве преобразователей); требовательность к условиям окружающей среды (пыль, влажность, температура). Однако эти недостатки окупаются за счёт экономии электроэнергии и снижения эксплуатационных расходов.

Системы автоматизации на базе ПЛК

Современные конвейерные линии редко строятся на одном частотном преобразователе «в чистом виде». Для реализации полноценной автоматизации и оптимизации применяются программируемые логические контроллеры (ПЛК). ПЛК выполняет функции:

- сбор информации от датчиков (датчики скорости, загрузки (весы), положения ленты, тока двигателя, температуры подшипников, состояния тормозов);

- вычисление оптимального задания скорости на основе текущей загрузки (например, снижение скорости при недогрузке для экономии энергии);

- управление пуском/остановом нескольких конвейеров в линии с временной и логической синхронизацией;

— защита: контроль превышения тока, обрыва ленты, схода ленты, затормаживания, аварийная остановка;

— передача данных на диспетчерский пункт (SCADA) и архивирование параметров;

— реализация сложных алгоритмов оптимизации (например, минимизация энергопотребления при заданной производительности).

Применение ПЛК в сочетании с ЧРП позволяет не просто регулировать скорость, но и оптимизировать работу конвейера в реальном времени, адаптируясь к изменяющимся условиям эксплуатации.

В таблице 2.1 приведено сравнение основных систем электропривода конвейеров по ключевым показателям.

Таблица 2.1 – Сравнение систем электропривода конвейеров

Показатель	Прямой пуск	Мягкий пускатель	ЧРП (скалярное управление)	ЧРП + ПЛК (векторное управление)
Регулирование скорости	нет	нет (только пуск)	плавное, диапазон до 1:20	плавное, диапазон до 1:100
Пусковой ток (отн. ед.)	5–7	2–4	1,0–1,5	1,0–1,5
Энергоэффективность при переменной нагрузке	низкая	низкая	средняя	высокая (оптимизация по загрузке)
Защита и диагностика	базовая	базовая	встроенная	расширенная (ПЛК + датчики)
Стоимость оборудования	низкая	средняя	средняя/высокая	высокая
Гибкость интеграции в АСУ ТП	низкая	низкая	средняя (через аналоговые входы/выходы)	высокая (промышленные сети)

Из анализа следует, что для конвейеров с переменной загрузкой, требованием к снижению динамических нагрузок и энергосбережению наиболее эффективным является решение «ЧРП + ПЛК». Именно оно

позволяет не только автоматизировать, но и оптимизировать работу электропривода, что соответствует цели данной выпускной квалификационной работы.

2.2 Способы регулирования скорости и оптимизации энергопотребления

Энергопотребление ленточного конвейера напрямую зависит от скорости движения ленты, загрузки и режима управления электроприводом. При нерегулируемом приводе двигатель работает с постоянной скоростью, и при снижении потока груза удельный расход электроэнергии на тонно-километр возрастает. Регулирование скорости позволяет согласовать производительность конвейера с фактической загрузкой, что даёт существенный энергосберегающий эффект. В данном разделе рассматриваются основные способы регулирования скорости асинхронных двигателей (АД) применительно к конвейерам и методы оптимизации энергопотребления.

Классификация способов регулирования скорости АД

Уравнение скорости асинхронного двигателя имеет вид:

$$n = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \quad (2)$$

где:

n – частота вращения ротора, об/мин;

f_1 – частота питающего напряжения, Гц;

p – число пар полюсов;

s – скольжение.

Из этого выражения следует, что изменить скорость можно тремя принципиальными способами:

1. изменением частоты питающего напряжения (f_1);
2. изменением числа пар полюсов (p);
3. изменением скольжения (s).

Применительно к конвейерным установкам наибольшее практическое значение имеют первые два способа, а также способы, основанные на изменении скольжения (реостатное регулирование, каскадные схемы).

Полюсное регулирование (многоскоростные АД)

В обмотке статора укладываются две или более полуобмоток, которые переключением могут образовывать разное число пар полюсов. Достоинства: высокий КПД, простота. Недостатки: ступенчатое регулирование (обычно 2–3 фиксированные скорости), увеличенные габариты и стоимость двигателя, невозможность плавной подстройки под изменяющуюся нагрузку. Для конвейеров используется ограниченно, например, для двухскоростных приводов с режимами «рабочая скорость – пониженная скорость (ремонтная)». Оптимизация энергопотребления при таком способе практически отсутствует.

Реостатное регулирование (для АД с фазным ротором)

В цепь ротора включается трёхфазный реостат, увеличивая скольжение и снижая скорость при постоянном моменте нагрузки. Достоинства: плавность регулирования вниз от естественной характеристики. Недостатки: низкий КПД (потери мощности в реостате пропорциональны скольжению), ухудшение жёсткости механических характеристик, необходимость двигателя с фазным ротором (более дорогого и менее надёжного). Применяется на мощных конвейерах (сотни кВт) с кратковременными режимами работы, но с точки зрения энергоэффективности считается устаревшим.

Частотное регулирование

Наиболее перспективный способ – изменение частоты f при одновременном изменении напряжения U для поддержания постоянства магнитного потока ($U/f = \text{const}$ или векторное управление). Позволяет плавно регулировать скорость как вниз, так и вверх (до номинальной и выше в зоне ослабления поля). КПД при этом остаётся высоким (0,95–0,98) во всём

диапазоне скоростей. Частотное регулирование является основой энергосберегающих технологий в конвейерном транспорте.

Энергопотребление конвейера при различных способах регулирования

Мощность, потребляемая конвейером, определяется по формуле 2:

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta} \quad (2)$$

где:

F – тяговое усилие, Н;

v – скорость ленты, м/с;

η – КПД механической передачи и электродвигателя.

При нерегулируемом приводе $v=\text{const}$, и мощность изменяется пропорционально загрузке (тяговому усилию). Однако при снижении потока груза (например, в 2 раза) мощность снижается незначительно из-за наличия постоянной составляющей нагрузки (масса ленты, роlikоопор, потери в передачах). Удельный расход энергии (кВт·ч/т) при недогрузке возрастает.

При частотном регулировании закон энергопотребления подчиняется приблизительной зависимости (для вентиляторной и конвейерной нагрузки с преобладанием момента сопротивления, пропорционального загрузке):

$$P \sim k_1 \cdot v + k_2 \cdot v^3 \quad (3)$$

где первое слагаемое отражает потери холостого хода, второе – мощность, затрачиваемую на перемещение груза. Для конвейеров с длинными лентами и значительной массой движущихся частей основная доля потребления приходится на холостой ход. Поэтому при снижении загрузки целесообразно снижать скорость ленты, чтобы сократить мощность, расходуемую на трение и изгиб ленты.

Методы оптимизации энергопотребления в ЧРП

Современные частотные преобразователи (Altivar, Sinamics, PowerFlex, Delta и др.) предоставляют несколько встроенных методов оптимизации:

1. Автоматическая оптимизация напряжения (АОР – Automatic Energy Optimization). Преобразователь снижает напряжение на двигателе при малой

нагрузке, так как при постоянном U/f поток двигателя избыточен, что ведёт к росту потерь в стали. Уменьшение напряжения при неизменной частоте позволяет снизить намагничивающий ток и потери в стали. Экономия может достигать 20–30% при работе на холостом ходу или при малой загрузке.

2. Режим «ECO» (Energy Saving). Алгоритм непрерывно анализирует ток и мощность двигателя и подстраивает напряжение на статоре так, чтобы минимизировать полные потери (в меди и стали). Реализуется как для скалярного, так и для векторного управления. Для конвейеров с переменной нагрузкой даёт существенную экономию.

3. Управление по закону U/f с коррекцией скольжения. Обеспечивает стабилизацию скорости при изменении нагрузки, что косвенно снижает потери из-за отклонения от оптимальной рабочей точки.

4. Рекуперативное торможение. При необходимости торможения конвейера (например, на наклонных конвейерах с грузом вниз) энергия возвращается в сеть через активный выпрямитель. Это позволяет не рассеивать энергию на тормозных резисторах, а использовать её повторно. КПД системы повышается на 10–15% в режимах частых торможений.

5. Автоматическое снижение скорости при малой загрузке – реализуется не самим ЧРП, а внешним ПЛК. Датчики веса или тока двигателя позволяют оценить текущую загрузку конвейера. Если загрузка ниже заданного порога, ПЛК уменьшает задание скорости через аналоговый выход или полевою шину. Это наиболее эффективный метод для конвейеров с сильно переменным потоком груза (горно-обогажительные комбинаты, дробильно-сортировочные фабрики).

6. Выбор оптимального закона управления ЧРП для конвейера

Для конвейерного привода характерны два основных режима:

— Продолжительная работа с практически постоянной скоростью при стабильной загрузке (например, магистральный конвейер на обогажительной фабрике).

— Работа с часто меняющейся загрузкой (питающий конвейер, дозатор, перегрузочный узел).

В первом случае достаточно скалярного управления U/f с включённой функцией AOP/ECO. Во втором случае целесообразно применение векторного управления без датчика скорости (Sensorless Vector Control) или с датчиком, так как оно обеспечивает более точное поддержание скорости при резких изменениях момента нагрузки и лучшее энергосбережение в переходных режимах.

В таблице 2.2 приведено сравнение законов управления ЧРП с точки зрения энергоэффективности на конвейере.

Таблица 2.2 – Сравнение законов управления ЧРП для конвейера

Параметр	Скалярное U/f	Скалярное U/f + ECO	Векторное без датчика	Векторное с датчиком
Точность поддержания скорости, %	2–5	2–5	0,5–1	0,01–0,1
Экономия энергии при переменной нагрузке	отсутствует	10–25%	15–30%	15–30%
Сложность настройки	низкая	средняя	высокая	высокая
Применимость для конвейера	стабильная загрузка	рекомендуется	оптимально	для особо ответственных

Оптимизация энергопотребления на системном уровне

Встроенных функций ЧРП часто недостаточно для полноценной оптимизации, особенно при работе конвейера в составе технологической линии. ПЛК позволяет реализовать:

— Прогнозирующее управление скоростью. На основе данных о расходе груза с предыдущих конвейеров (например, с весов или датчиков

уровня бункера) ПЛК вычисляет требуемую скорость следующего конвейера, чтобы избежать переполнения или недогрузки.

— Каскадное регулирование. В линии последовательно расположенных конвейеров ПЛК поддерживает оптимальное соотношение скоростей, минимизируя перерасход энергии на промежуточных перегрузках.

— Останов при отсутствии груза. ПЛК останавливает конвейер через заданный интервал времени, если загрузка отсутствует, и запускает его вновь при поступлении груза. Экономия энергии холостого хода может составлять 50–80% времени работы.

— Интеграция с АСУ ТП верхнего уровня. Оптимизация ведётся не для отдельного конвейера, а для всей транспортной системы в целом (например, минимизация суммарной мощности при заданной производительности).

2.3 Применение частотно-регулируемого привода: преимущества и ограничения

Частотно-регулируемый привод (ЧРП) в настоящее время является наиболее распространённым техническим решением для управления асинхронными и синхронными двигателями в широком диапазоне мощностей – от сотен ватт до десятков мегаватт. Применительно к конвейерному транспорту ЧРП позволяет не только регулировать скорость, но и существенно изменить эксплуатационные характеристики оборудования. Однако наряду с очевидными достоинствами существуют и ограничения, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации.

Принцип действия и основные элементы ЧРП

Частотный преобразователь состоит из трёх основных блоков:

— Выпрямитель – преобразует переменное напряжение промышленной сети (380 В, 50 Гц) в постоянное.

— Звено постоянного тока – сглаживающий фильтр (дрессели и конденсаторы), обеспечивающий стабильное напряжение на входе инвертора.

— Инвертор (обычно IGBT-транзисторный) – формирует трёхфазное напряжение регулируемой частоты и амплитуды с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Дополнительно могут присутствовать: тормозной ключ и тормозной резистор (для рассеивания энергии при торможении), входной и выходной фильтры (для подавления электромагнитных помех), а также интерфейсные модули для связи с ПЛК и SCADA.

Преимущества применения ЧРП для электропривода конвейера

Плавный пуск и ограничение пусковых токов

При прямом пуске асинхронного двигателя пусковой ток превышает номинальный в 5–7 раз. Для мощных конвейеров (свыше 100 кВт) это приводит к значительным провалам напряжения в питающей сети, что может вызывать ложные срабатывания защитной аппаратуры и ухудшать качество электроэнергии. Кроме того, резкий рывок при пуске создаёт повышенные динамические нагрузки на ленту, стыки, роlikоопоры и редуктор, сокращая их ресурс.

ЧРП позволяет ограничить пусковой ток на уровне (1,0–1,5) и задать требуемый закон разгона (линейный, S-образный, с паузой). Это практически исключает механические удары и снижает риск обрыва ленты при пуске.

Регулирование скорости в широком диапазоне

ЧРП обеспечивает плавное регулирование скорости двигателя от нуля до номинальной и выше (до 1,5–2 f в зоне ослабления поля). Диапазон регулирования для скалярного управления составляет 1:20, для векторного – до 1:100. Для конвейера это означает возможность:

— выбирать оптимальную скорость в зависимости от загрузки (энергосбережение);

- выполнять ремонтные работы на пониженной скорости («ползучий режим»);

- синхронизировать скорость нескольких конвейеров в линии.

Как было показано в разделе 2.2, ЧРП позволяет снизить энергопотребление за счёт:

- оптимизации напряжения при недогрузке (функции ECO/AOP);

- снижения скорости при малой загрузке (в сочетании с ПЛК);

- рекуперативного торможения (для наклонных конвейеров).

По данным производителей (Schneider Electric, Siemens, Danfoss), для конвейеров с переменной загрузкой экономия электроэнергии достигает 20–50% по сравнению с нерегулируемым приводом.

Снижение износа механического оборудования

Помимо энергетического эффекта, ЧРП уменьшает механический износ:

- отсутствие ударных нагрузок при пуске продлевает ресурс редукторов, муфт и подшипников;

- плавное торможение снижает абразивный износ ленты и роlikоопор;

- возможность точной остановки (с использованием тормозного резистора или механического тормоза) уменьшает просыпи груза в месте перегрузки.

Улучшение коэффициента мощности

Асинхронный двигатель, работающий от сети, потребляет реактивную мощность ($\cos \varphi$ составляет 0,7–0,85 при номинальной нагрузке и падает до 0,3–0,5 при недогрузке). ЧРП с активным выпрямителем (AFE – Active Front End) обеспечивает $\cos \varphi$ близкий к 1 во всём диапазоне нагрузок. Даже при использовании пассивного выпрямителя коэффициент мощности со стороны сети обычно выше, чем при прямом питании двигателя, за счёт уменьшения потребления реактивной составляющей намагничивающего тока.

Современные ЧРП оснащаются интерфейсами: аналоговые входы/выходы (0–10 В, 4–20 мА), дискретные входы/выходы, полевые шины (Modbus RTU, Profibus DP, Profinet, EtherNet/IP, CANopen). Это позволяет легко подключать преобразователь к ПЛК и SCADA для централизованного управления, мониторинга и диагностики. В конвейерной линии ПЛК может оперативно изменять задание скорости каждого ЧРП в зависимости от потока груза, что невозможно при использовании автономных преобразователей без внешнего управления.

Ограничения и недостатки ЧРП

Стоимость частотного преобразователя для двигателя мощностью 30–100 кВт составляет от 30 до 100% стоимости самого двигателя (для мощностей свыше 200 кВт доля ЧРП снижается до 20–40%). Для многодвигательных конвейерных линий капитальные затраты могут быть существенно выше по сравнению с нерегулируемым приводом. Однако эта разница, как правило, окупается за счёт экономии электроэнергии и снижения эксплуатационных расходов в течение 1–3 лет.

Генерация высших гармоник

Инвертор на IGBT-транзисторах с ШИМ создаёт в питающей сети высшие гармоники (5-я, 7-я, 11-я, 13-я и т.д.). Это может приводить к:

- дополнительному нагреву трансформаторов и кабельных линий;
- ложному срабатыванию автоматических выключателей и УЗО;
- нарушению работы чувствительного электронного оборудования (например, измерительных систем).

Для снижения гармоник применяются входные дроссели, фильтры гармоник (на 5%, 7% или 12-пульсные схемы выпрямления), а также активные выпрямители (AFE). При проектировании необходимо оценивать суммарную мощность преобразователей и требования к качеству электроэнергии.

Снижение ресурса двигателя при работе от ЧРП

Форма напряжения на выходе ЧРП (ШИМ) не является синусоидальной – присутствуют высокочастотные составляющие. Это вызывает:

- дополнительные потери в стали двигателя (на вихревые токи и гистерезис), что может привести к перегреву при длительной работе на пониженных скоростях с постоянным моментом;

- перенапряжения на обмотках из-за отражённых волн (особенно на длинных кабелях между ЧРП и двигателем), что снижает межвитковую изоляцию.

Современные двигатели класса изоляции F и H с усиленной изоляцией (motors for inverter duty) и установка выходных дросселей (dV/dt-фильтров) практически устраняют эту проблему. При выборе двигателя для работы с ЧРП следует отдавать предпочтение специализированным моделям.

ЧРП содержат электронные компоненты (конденсаторы, IGBT-модули, микропроцессоры), чувствительные к пыли, влаге, агрессивным газам и температуре окружающей среды. Для конвейерных галерей, расположенных на открытом воздухе или в запылённых помещениях, необходимо предусматривать:

- размещение ЧРП в шкафах с защитой не ниже IP54;

- принудительную вентиляцию или кондиционирование (при температурах выше +40°C);

- защиту от конденсата (обогрев при отрицательных температурах).

Пренебрежение этими требованиями приводит к частым отказам ЧРП.

Настройка ЧРП, особенно в режиме векторного управления, требует знаний электропривода и опыта. Неправильный выбор параметров (время разгона/торможения, ограничение тока, настройка ПИ-регулятора скорости) может привести к авариям: перегреву двигателя, срабатыванию защиты по перенапряжению, нестабильной работе конвейера. Кроме того, для

диагностики неисправностей ЧРП требуется специальный измерительный инструмент (токоизмерительные клещи, осциллограф, анализатор гармоник).

Сравнительная оценка целесообразности применения ЧРП для конвейера

В таблице 2.3 приведены критерии, при которых применение ЧРП является оправданным или неоправданным.

Таблица 2.3 – Целесообразность применения ЧРП для конвейера

Условие эксплуатации	Применение ЧРП	Обоснование
Постоянная нагрузка на 100%, редкие пуски (раз в смену и реже)	Нецелесообразно или ограничено	Энергосбережение минимально, можно обойтись мягким пускателем
Переменная нагрузка (от 20 до 100%)	Целесообразно	Экономия энергии, снижение износа
Частые пуски и остановки (более 10 раз в час)	Целесообразно	Плавный пуск/останов снижает динамические нагрузки
Наклонный конвейер с рекуперацией энергии (груз вниз)	Целесообразно (с AFE или тормозным резистором)	Возврат энергии в сеть или её рассеивание без механического износа
Очень запылённая или агрессивная среда без возможности установки шкафа	Ограничено	Требуются специальные исполнения ЧРП (повышенной защиты), что дорого
Малая мощность (до 5 кВт)	Целесообразно при необходимости регулирования скорости	Стоимость ЧРП сопоставима со стоимостью двигателя

Частотно-регулируемый привод обладает рядом существенных преимуществ для конвейерного транспорта: плавный пуск и торможение,

регулирование скорости, энергосбережение (20–50%), снижение износа механической части, улучшение коэффициента мощности, возможность интеграции в АСУ ТП.

Основные ограничения ЧРП: более высокая первоначальная стоимость, генерация высших гармоник, снижение ресурса двигателя при отсутствии специальных мер (выходные фильтры, двигатели с усиленной изоляцией), чувствительность к условиям среды, необходимость квалифицированного обслуживания.

Для конвейеров с переменной нагрузкой, частыми пусками или наклонным исполнением преимущества ЧРП перевешивают его недостатки. В таких случаях применение ЧРП является технически и экономически обоснованным.

В рамках данной ВКР принято решение использовать ЧРП с векторным управлением, входным дросселем (для снижения гармоник) и выходным dV/dt -фильтром (для защиты изоляции двигателя). Для управления и оптимизации предусматривается совместная работа с ПЛК.

2.4 Роль программируемых логических контроллеров (ПЛК) в автоматизации

Программируемый логический контроллер (ПЛК) является основой современных систем промышленной автоматизации. В контексте управления конвейерным электроприводом ПЛК выполняет функции, которые не могут быть реализованы автономным частотным преобразователем: сбор и обработка данных от множества датчиков, реализация сложных алгоритмов управления и оптимизации, координация работы нескольких приводов, интеграция в диспетчерские системы (SCADA) и обеспечение гибкости изменения логики работы без перемонтажа схемы. В данном разделе рассматриваются архитектура, функции и преимущества применения ПЛК для автоматизации конвейерного транспорта.

ПЛК представляет собой специализированный микропроцессорный контроллер, предназначенный для работы в жёстких промышленных

условиях (расширенный диапазон температур, вибрация, запылённость, электромагнитные помехи). Типовая архитектура ПЛК включает:

- Центральный процессор (CPU) – выполняет пользовательскую программу циклически (время цикла обычно 1–100 мс).

- Модули ввода дискретных сигналов – принимают сигналы от кнопок, концевых выключателей, датчиков приближения, реле.

- Модули ввода аналоговых сигналов – принимают сигналы 0–10 В, 4–20 мА от датчиков скорости, тока, веса, температуры.

- Модули вывода дискретных сигналов – управляют контакторами, пускателями, сигнальными лампами, тормозными механизмами.

- Модули вывода аналоговых сигналов – задают скорость ЧРП (0–10 В или 4–20 мА).

- Коммуникационные модули – обеспечивают связь по полевым шинам (Profibus, Profinet, EtherNet/IP, Modbus TCP) с ЧРП, операторскими панелями (HMI), SCADA-серверами.

Для конвейерных систем, как правило, используются ПЛК средней или низкой производительности (например, Siemens S7-1200, OWEN PLC110, Delta DVP, Schneider M221), достаточные для управления несколькими приводами и десятками дискретных сигналов.

Функции ПЛК в системе управления конвейерным электроприводом

Логическое управление и блокировки

ПЛК реализует всю логику пуска/останова конвейера с учётом:

- состояния аварийных кнопок и цепей защиты (сход ленты, обрыв ленты, затормаживание);

- сигналов от датчиков положения (загруженность бункеров, наличие груза на ленте);

- блокировок с соседними конвейерами (пуск в обратном порядке от разгрузки к загрузке, останов в прямом порядке);

— контроля работы тормозной системы и натяжного устройства.

Все эти логические связи традиционно реализовывались на релейной логике (контакты, промежуточные реле). ПЛК заменяет сотни реле и проводников одной программой, что резко повышает надёжность и упрощает модернизацию.

Частотный преобразователь может принимать задание скорости:

- с потенциометра на панели управления (ручной режим);
- с аналогового выхода ПЛК (автоматический режим);
- по цифровой шине (например, задание через Profibus).

ПЛК вычисляет требуемую скорость на основе:

- текущей загрузки конвейера (сигнал от тензодатчиков или косвенная оценка по току двигателя);
- производительности вышестоящего конвейера (для каскадного регулирования);
- выбранного режима (рабочая скорость, ремонтная скорость, режим очистки ленты).

Благодаря ПЛК скорость конвейера становится адаптивной – она автоматически снижается при уменьшении потока груза и возрастает при его увеличении, что обеспечивает оптимальное энергопотребление.

Как было отмечено в разделе 2.2, встроенные функции ЕСО/АОР ЧРП дают определённый эффект, но системная оптимизация требует участия ПЛК. ПЛК может реализовать:

- Автоматический останов конвейера при отсутствии груза. Если в течение заданного времени (например, 2–5 минут) загрузка отсутствует, ПЛК отключает ЧРП и останавливает конвейер. При появлении груза (датчик на питающем конвейере или в бункере) ПЛК запускает конвейер и плавно разгоняет его до рабочей скорости. Экономия энергии холостого хода может достигать 50–80% времени работы (особенно на конвейерах с прерывистым питанием).

— Каскадное регулирование скорости линии конвейеров. В линии из нескольких последовательных конвейеров ПЛК поддерживает соотношение скоростей, при котором промежуточные бункеры не переполняются и не опорожняются. Это исключает перегрузки и недогрузку отдельных конвейеров.

— Оптимизация по критерию минимума удельного расхода энергии. ПЛК может экспериментально подбирать скорость, при которой удельный расход электроэнергии на тонну перемещённого груза минимален для данной загрузки, и поддерживать эту скорость.

ПЛК непрерывно контролирует параметры работы:

— ток и напряжение двигателя (через аналоговые входы или по данным из ЧРП);

— температуру подшипников привода и роlikоопор (по сигналам термодатчиков);

— скорость ленты (по импульсному датчику на неприводном барабане);

— проскальзывание ленты (сравнение скорости двигателя и скорости ленты).

При обнаружении отклонений ПЛК может:

— выдать предупредительный сигнал оператору;

— снизить скорость конвейера до безопасного уровня;

— аварийно остановить привод с фиксацией причины в журнале событий.

Это существенно повышает безопасность и предотвращает дорогостоящие поломки (обрыв ленты, заклинивание редуктора, пожар от перегретого подшипника).

Взаимодействие с оператором и верхним уровнем АСУ ТП

ПЛК подключается к:

— Панели оператора (HMI) – отображение мнемосхемы конвейера, текущей скорости, загрузки, токов, предупреждений, возможность ручного управления и смены режимов.

— SCADA-системе диспетчерского пункта – передача телеметрии, приём команд (пуск, останов, изменение задания скорости), архивация параметров.

— Системе верхнего уровня (MES, ERP) – для учёта производительности и энергопотребления.

Без ПЛК интеграция ЧРП в такие системы затруднительна (требуется прямой обмен с каждым преобразователем, что не всегда возможно и не обеспечивает единой логики).

Проведем сравнительный анализ Частотно-регулируемый привод без использования программируемого логического контроллера и Частотно-регулируемый привод с использованием программируемого логического контроллера

В таблице 2.4 приведено сравнение двух подходов к автоматизации.
Таблица 2.4 – Сравнение подходов к автоматизации конвейерного электропривода

Функция / Параметр	Только ЧРП (автономный)	ЧРП + ПЛК
Плавный пуск/останов	да	да
Регулирование скорости вручную	да (потенциометр)	да (HMI или автоматически)
Автоматическое снижение скорости при недогрузке	нет (требуется внешний контроллер)	да
Останов при отсутствии груза	нет	да
Каскадное управление линией конвейеров	нет	да
Диагностика подшипников,	нет (только ток и частота)	да

Функция / Параметр	Только ЧРП (автономный)	ЧРП + ПЛК
ленты, проскальзывания		
Ведение журнала событий и аварий	ограниченно (внутренний журнал ЧРП)	расширенный (на SD-карту ПЛК)
Удалённый мониторинг и управление	через дополнительный коммуникационный модуль	стандартно (через Ethernet)
Гибкость изменения алгоритма	ограничена параметрами	неограничена (программирование)
Относительная стоимость (для системы на 1 конвейер)	1 (база)	1,3–1,5 (с учётом ПЛК и НМИ)
Сложность проектирования	низкая	средняя

Из таблицы видно, что добавление ПЛК расширяет функциональность и позволяет реализовать оптимизацию, а не просто регулирование. Дополнительные затраты на ПЛК и НМИ окупаются за счёт экономии электроэнергии (10–30% сверх эффекта от одного ЧРП) и снижения аварийных простоев.

Разберем алгоритмы ПЛК для конвейерного привода

Алгоритм 1. Автоматическое снижение скорости по загрузке.

ЦИКЛ КАЖДУЮ 0.5 СЕКУНДЫ

ЗАГРУЗКА = Аналоговый Вход(ДатчикВеса) ' тонн/час

ЕСЛИ ЗАГРУЗКА < 0.2 * ЗАГРУЗКА_НОМ ТО

 СКОРОСТЬ_ЗАД = 0.4 * СКОРОСТЬ_НОМ

ИНАЧЕ ЕСЛИ ЗАГРУЗКА < 0.5 * ЗАГРУЗКА_НОМ ТО

 СКОРОСТЬ_ЗАД = 0.6 * СКОРОСТЬ_НОМ

ИНАЧЕ ЕСЛИ ЗАГРУЗКА < 0.8 * ЗАГРУЗКА_НОМ ТО

 СКОРОСТЬ_ЗАД = 0.8 * СКОРОСТЬ_НОМ

ИНАЧЕ

 СКОРОСТЬ_ЗАД = СКОРОСТЬ_НОМ

КОНЕЦ ЕСЛИ

Аналоговый Выход (ЧРП, СКОРОСТЬ_ЗАД)

КОНЕЦ ЦИКЛА

Алгоритм 2. Останов при отсутствии груза.

ЕСЛИ (ЗАГРУЗКА = 0) И (ТАЙМЕР_ХОЛОСТОГО_ХОДА < 0) ТО

```

    ТАЙМЕР_ХОЛОСТОГО_ХОДА = 120 ' 2 минуты
КОНЕЦ ЕСЛИ
ЕСЛИ (ЗАГРУЗКА = 0) И (ТАЙМЕР_ХОЛОСТОГО_ХОДА > 0) ТО
    ТАЙМЕР_ХОЛОСТОГО_ХОДА = ТАЙМЕР_ХОЛОСТОГО_ХОДА -
1 (каждую секунду)
    ЕСЛИ ТАЙМЕР_ХОЛОСТОГО_ХОДА = 0 ТО
        ОстановитьКонвейер()
    КОНЕЦ ЕСЛИ
ИНАЧЕ
    ТАЙМЕР_ХОЛОСТОГО_ХОДА = -1 ' сброс таймера при появлении
груза
КОНЕЦ ЕСЛИ

```

Эти алгоритмы можно реализовать на любом ПЛК (на языке LAD, FBD или ST) и дают измеримый энергосберегающий эффект.

3 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

3.1 Критерии выбора частотного преобразователя для конвейерного привода

Частотные преобразователи выпускаются тысячами моделей десятков производителей, однако при их выборе универсального решения не существует. Надёжная и эффективная работа конвейера напрямую зависит от того, насколько правильно выбран конкретный тип устройства под конкретные технологические требования и условия эксплуатации. В данном разделе рассматриваются критерии, которым должен удовлетворять частотный преобразователь для ленточного конвейера с переменной нагрузкой. Эти критерии впоследствии будут использованы для обоснованного выбора конкретной модели из числа представленных на российском рынке.

Критерии выбора частотных преобразователей

Выбор частотных преобразователей традиционно начинается с сопоставления его параметров с параметрами питающей сети и электродвигателя. Опыт эксплуатации показывает, что ориентироваться только на паспортную мощность двигателя (в кВт) недостаточно. Следует принимать во внимание номинальный выходной ток преобразователя, напряжение, число фаз и частоту сети. Номинальный ток привода должен быть не менее номинального тока двигателя, а для конвейеров, работающих в тяжёлых условиях с частыми пусками, — иметь запас не менее 10–15%. В рамках данной работы двигатель предварительно оценён в диапазоне 22–30 кВт, поэтому ЧРП должен быть рассчитан на номинальное напряжение 3×380 В 50 Гц.

Ключевое правило при выборе частотного преобразователя: ориентироваться на номинальный ток двигателя, а не только на мощность в киловаттах. Для конвейеров с постоянным моментом нагрузки преобразователь должен обеспечивать требуемый номинальный выходной ток, соответствующий полной нагрузке двигателя.

Соответствие по характеру нагрузки

Важнейший критерий выбора — тип нагрузки. Конвейеры относятся к нагрузкам с постоянным моментом. Это означает, что величина момента, необходимого для перемещения груза, практически не зависит от скорости вращения двигателя (в отличие от вентиляторов или насосов, где момент растёт пропорционально квадрату скорости). Для нагрузок СТ требуются частотные преобразователи с соответствующими перегрузочными характеристиками, как правило, обеспечивающие 150% номинального момента в течение 60 с.

Конвейер может работать в различных режимах: продолжительном S1 с возможностью автоматического останова, а также в режимах частых пусков и остановов (до 10–20 в час). Следовательно, ЧРП должен допускать частое оперирование без перегрева силовых ключей. В спецификациях производителей допустимое количество пусков обычно указывается отдельно.

Требования к управлению

В разделе 1.2 были сформулированы требования к точности поддержания скорости на уровне $\pm 3\%$ от заданной. Для конвейера с переменной загрузкой этого можно достичь с помощью векторного бездатчикового управления. Автономные частотные преобразователи, как правило, имеют два базовых метода управления скоростью: скалярное и бездатчиковое векторное. Требуемая точность стабилизации скорости может быть достигнута только при использовании векторного закона, который обеспечивает более высокие динамические характеристики и точность. Наличие функции автоматической подстройки параметров двигателя позволяет адаптировать ЧРП к конкретной машине без использования специализированного оборудования.

Энергосберегающие функции

В разделе 1.2 задан целевой уровень экономии электроэнергии не менее 25% по сравнению с нерегулируемым приводом. Частотный

преобразователь должен поддерживать автоматическую оптимизацию напряжения (АОР) или режим ЕСО, при которых устройство снижает напряжение на двигателе при неполной нагрузке, уменьшая потери в стали и намагничивающий ток. По данным ведущих производителей, наличие этой функции может обеспечить экономию дополнительных 10–30% в зависимости от режима работы.

Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость

В разделе 1.3 проанализированы условия эксплуатации, включая возможное наличие в цехе других электроприводов (дробилок, грохотов), создающих высшие гармоники. ЧРП сам является мощным источником гармоник и электромагнитных помех. Следовательно, преобразователь должен быть оснащён входным ЭМС-фильтром класса не ниже С3 и, при необходимости, дополнительными дросселями для снижения гармоник. При длине кабеля между ЧРП и двигателем до 50 м (что соответствует параметрам конвейера) для защиты изоляции двигателя рекомендуется применять выходной dV/dt -фильтр или синусный фильтр.

Условия окружающей среды

Согласно разделу 1.3, конвейер работает в закрытом помещении с температурой $+5...+35^{\circ}\text{C}$, однако в шкафу управления (где будет установлен ЧРП) из-за собственного тепловыделения может быть на $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ выше. Производители приводов обычно гарантируют работу при температуре окружающей среды до $+40^{\circ}\text{C}$ без снижения номинальных характеристик. Преобразователь должен быть рассчитан на хранение и эксплуатацию в диапазоне не уже $-10...+50^{\circ}\text{C}$. Как правило, степень защиты базового исполнения составляет IP20, что при установке в шкафу IP54 позволяет считать требования по запылённости выполненными.

Коммуникационные возможности

Для интеграции в АСУ ТП частотный преобразователь должен поддерживать передачу данных по одной из промышленных полевых шин (Modbus RTU, Profibus DP, Profinet, EtherNet/IP) или иметь аналоговые входы

0–10 В / 4–20 мА для задания скорости от ПЛК. В конвейерной системе с несколькими приводами использование цифрового интерфейса позволяет сократить объём кабельной продукции и упрощает централизованное управление.

Функции безопасности

Эксплуатация конвейера должна соответствовать требованиям охраны труда. Современные частотные преобразователи оснащаются встроенной функцией Safe Torque Off (STO), которая обеспечивает безопасное отключение момента на валу двигателя без разрыва силовой цепи и может быть интегрирована в общую систему безопасности линии. Для конвейера наличие STO является желательным, а для ответственных участков — обязательным.

В таблице 3.1 представлен обзор частотных преобразователей ведущих мировых производителей, чьи продукты широко представлены на российском рынке и могут быть использованы для модернизации электропривода конвейера в рамках данной работы.

Таблица 3.1 – Характеристики частотных преобразователей ведущих производителей

Производитель	Серия (модель)	Диапазон мощностей	Особенности для конвейерного привода
Siemens	SINAMICS G120 / G120C	0,37–250 кВт / 0,55–132 кВт	Векторное управление с энкодером и без; безопасность STO; PROFIBUS DP, PROFINET, EtherNet/IP
ABB	ACS880	0,55–250 кВт (до 6000 кВт в многодвигательных)	Все типы двигателей и протоколы связи; рекуперативное торможение; рассчитан на тяжёлые режимы работы
Danfoss	VLT Automation	0,37–75 кВт	Универсальное управление; конвейеры, экструдеры,

Производитель	Серия (модель)	Диапазон мощностей	Особенности для конвейерного привода
	Drive FC 301/302		рольганги; гибкая модульная конструкция
Danfoss	VLT Midi Drive FC 280	0,37–22 кВт	Компактный; встроенные тормозные прерыватели; транспортировка материалов, пищевая промышленность
Danfoss	VLT Micro FC 51	0,18–22 кВт	Маломощные конвейеры; нагрузка СТ; компактный IP20.
Schneider Electric	Altivar ATV900	0,75–800 кВт	Для требовательных приложений (конвейеры, краны); исключительное управление двигателем; до 180% перегрузки
Schneider Electric	Altivar 71	0,37–630 кВт	Широкая мощностная линейка; защита и диагностика; пригоден для промышленных конвейеров
Delta	VFD-C2000	0,75–75 кВт	Универсальный векторный; позиционирование момента; конвейеры, краны, транспортные системы
Delta	VFD-M	0,4–22 кВт	Компактный; векторное бездатчиковое управление; насосы, вентиляторы, конвейеры
Mitsubishi Electric	FR-A800	0,4–630 кВт	Новое поколение (сменило A700); векторное управление; рекуперация энергии
Mitsubishi Electric	FR-D700	0,1–7,5 кВт	Компактные маломощные преобразователи; конвейеры (в составе малых машин)

Для многодвигательных систем, требующих синхронизации нескольких конвейеров, частотные преобразователи могут быть объединены в общую систему управления с единым диспетчерским пунктом.

Обоснование критериев для конкретных условий конвейера

Собранные в единую систему критерии применительно к параметрам проектируемого конвейера (мощность двигателя 22–30 кВт, напряжение 3×380 В, нагрузка СТ, переменная загрузка, целевая экономия энергии $\geq 25\%$) сводятся к следующему перечню требований к частотному преобразователю:

1. Номинальная мощность — не менее расчётной мощности двигателя с учётом запаса по току 10–15%.
2. Номинальный выходной ток — $\geq$ тока двигателя (ориентировочно 45–65 А).
3. Перегрузочная способность — 150% в течение 60 с (для нагрузки СТ).
4. Закон управления — векторное бездатчиковое управление (Sensorless Vector Control) для обеспечения точности стабилизации скорости $\pm 3\%$.
5. Энергосбережение — наличие режимов ECO/AOP.
6. ЭМС — встроенный или подключаемый входной фильтр класса C3; возможность установки выходного dV/dt-фильтра.
7. Коммуникация — поддержка полевой шины (Modbus RTU, Profibus DP, PROFINET или EtherNet/IP) либо аналоговый вход 4–20 мА для связи с ПЛК.
8. Безопасность — встроенная функция STO (Safe Torque Off).
9. Условия среды — рабочий диапазон температур не уже $-10...+50^{\circ}\text{C}$, степень защиты базового блока IP20 (при установке в шкаф IP54).

Сервис и поддержка — наличие на российском рынке, техническая поддержка, доступность запчастей, документации на русском языке.

Перечисленные критерии являются основой для выбора конкретной модели частотного преобразователя. Окончательный выбор будет сделан на основе сравнительного анализа нескольких моделей ведущих

производителей с учётом как технических характеристик, так и стоимостных показателей, а также опыта эксплуатации аналогичного оборудования на предприятиях отрасли.

3.2 Выбор типа ПЛК и периферийного оборудования

В предыдущем разделе 3.1 были определены критерии выбора частотного преобразователя для конвейерного привода. Однако эффективность работы всей системы автоматизации в значительной степени зависит от правильного выбора «мозга» системы — программируемого логического контроллера (ПЛК), а также периферийного оборудования, обеспечивающего сбор информации о технологическом процессе и безопасность работы конвейера.

ПЛК выполняет центральную роль: по заданной пользователем программе он собирает информацию с датчиков, обрабатывает её, выдаёт управляющие сигналы на частотный преобразователь и исполнительные механизмы, а также обеспечивает связь с оператором и верхним уровнем АСУ ТП. Выбор конкретного типа контроллера и состава периферийного оборудования должен быть комплексным, учитывающим как технические требования (количество сигналов, точность измерения), так и эксплуатационные (условия среды, надёжность) и экономические факторы.

Выбор типа программируемого логического контроллера

Выбор ПЛК для конвейерной системы базируется на следующих факторах: необходимое количество и тип сигналов, производительность процессора, коммуникационные возможности, условия эксплуатации и совместимость с остальным оборудованием. Для конвейера средней сложности возможно применение как продукции мировых лидеров (Siemens), так и современных российских контроллеров на базе ОВЕН. В данном разделе проведён анализ двух альтернатив: Siemens SIMATIC S7-1200 и контроллеров ОВЕН серии ПЛК110/160.

Контроллер Siemens SIMATIC S7-1200

Siemens SIMATIC S7-1200 представляет собой компактный контроллер, предназначенный для малых и средних проектов автоматизации. Серия S7-1200 разработана для базовых и среднеуровневых задач автоматизации, к которым относятся упаковочные машины, конвейерные системы и малые производственные процессы. Это делает его предпочтительным выбором для рассматриваемого конвейера.

Обоснование выбора S7-1200:

1. Соответствие масштабу задачи. Для управления одним ленточным конвейером не требуется избыточная производительность старшей серии S7-1500 (ориентированной на управление сложным движением и многокоординатную синхронизацию). S7-1200 предлагает оптимальный баланс «цена — производительность» для подобных задач и является экономически эффективным выбором.

2. Коммуникационные возможности. Контроллер оснащён встроенным интерфейсом PROFINET (Ethernet), поддерживающим протоколы PROFINET IO, Modbus TCP и TCP/IP. Встроенный интерфейс Ethernet делает серию S7-1200 первым выбором для многих проектов автоматизации. Это позволяет организовать высокоскоростной обмен данными с частотным преобразователем (например, Siemens G120) и панелью оператора (HMI) по единой промышленной сети, а также интегрировать систему в АСУ ТП верхнего уровня.

3. Гибкость расширения. Несмотря на компактное исполнение, контроллер S7-1200 поддерживает подключение до 8 сигнальных модулей (SM) расширения, что позволяет легко наращивать количество входов/выходов. Это даёт возможность модернизировать систему в будущем, например, при добавлении датчиков вибрации для предиктивной аналитики.

4. Программное обеспечение. Программирование осуществляется в единой среде TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal), что обеспечивает бесшовную интеграцию всех компонентов Siemens:

контроллера, привода и панели оператора. Это сокращает время наладки и упрощает последующее обслуживание на предприятии.

Технические характеристики (для оценки):

- Рабочая температура: от -20°C до +60°C;
- Степень защиты: IP20 (требует установки в шкаф управления);
- Процессор: 32-разрядный, время выполнения логической операции до 0,08 мкс.

Вывод по выбору ПЛК: в качестве базового контроллера рекомендуется Siemens SIMATIC S7-1200 (модель с достаточным объёмом рабочей памяти и количеством встроенных входов/выходов). Это решение обеспечивает высокую надёжность, удобство интеграции и широкие возможности для дальнейшего развития системы.

Альтернативный вариант: контроллеры ОВЕН ПЛК110 и ПЛК160

В качестве альтернативы импортному оборудованию могут быть рассмотрены контроллеры российского производства ОВЕН серий ПЛК110 и ПЛК160. Эти контроллеры предназначены для построения распределённых систем управления и диспетчеризации и способны решать задачи автоматизации конвейерных линий.

Ключевые особенности:

— ПЛК110: отличается наличием встроенных дискретных входов/выходов и содержит скоростные входы для обработки энкодеров, что важно для подключения датчика скорости ленты.

— ПЛК160: позиционируется как контроллер с хорошим соотношением цены, качества и функциональности, также поддерживает расширение через модули.

— Условия эксплуатации: оба контроллера имеют климатическое исполнение В4 (от -25°C до +55°C для ПЛК110) и стойкость к механическим воздействиям по группе N2 по ГОСТ 12997, что подтверждает их пригодность для промышленного применения.

— Программирование: среда программирования CODESYS (стандарт IEC 61131-3), поддерживающая все основные языки (LD, FBD, ST). Это облегчает перенос программ при смене оборудования.

Обоснование для включения в ВКР: при проектировании системы модернизации на российском предприятии, особенно в рамках политики импортозамещения, ОВЕН ПЛК110 может быть предпочтительнее. Однако в качестве базового варианта в данном проекте принимается Siemens S7-1200 ввиду его широкой распространённости, наличия готовых библиотек функций для конвейеров и большего опыта работы персонала.

Оценка количества сигналов для выбора конфигурации ПЛК

Для выбора конкретной модели ПЛК и определения необходимости внешних модулей расширения, на основе технологической схемы конвейера (глава 1) и выбранных датчиков выполнен расчёт количества сигналов ввода/вывода и их параметров (таблица 3.1).

Таблица 3.1 — Перечень сигналов для подключения к ПЛК

Тип сигнала	Назначение	Источник/Приёмник	Количество	Параметры сигнала
DI (Дискретный вход)	Кнопка «Пуск» (местный пост)	Кнопка без фиксации	1	24 V DC
	Кнопка «Стоп» (аварийная, NC)	Кнопка с фиксацией	1	24 V DC
	Датчик схода ленты (предупреждение)	Выключатель ВД-3	1	Сухой контакт (NO/NC)
	Датчик схода ленты (авария)	Выключатель ВД-3	1	Сухой контакт (NO/NC)

Тип сигнала	Назначение	Источник/Приёмник	Количество	Параметры сигнала
	Датчик обрыва/проскальзывания	Реле датчика скорости	1	Сухой контакт
АІ (Аналоговый вход)	Загрузка конвейера (вес)	Тензодатчик / весовой терминал	1	4–20 мА / 0–10 В
	Скорость двигателя (контроль)	Энкодер (через быстрый вход)	2 (А, В)	Импульсы 24 В
	Ток двигателя (косвенная загрузка)	Частотный преобразователь (через шину или аналог)	1	4–20 мА (опционально)
	Температура подшипника	Термопреобразователь Pt100	1-2	4–20 мА
DO (Дискретный выход)	Пуск/Останов двигателя	Частотный преобразователь (вход Enable/Run)	1	24 В DC
	Сигнал «Конвейер работает» (лампа)	Сигнальная арматура	1	24 В DC
	Сигнал «Авария» (сирена/лампа)	Сигнальная арматура	1	24 В DC
	Включение тормоза (при наличии)	Тормозной механизм	1	24 В DC (через реле)
АО (Аналоговый)	Задание скорости двигателя	Частотный преобразователь	1	4–20 мА / 0–10 В

Тип сигнала	Назначение	Источник/Приёмник	Количество	Параметры сигнала
й выход)		(аналоговый вход)		
Коммуникация	Управление и мониторинг частотного преобразователя	Частотный преобразователь	1 порт	PROFINET, Modbus TCP
	Панель оператора (HMI)	Панель оператора	1 порт	PROFINET, Modbus TCP
	Резерв (АСУ ТП)	Верхний уровень	1 порт	PROFINET, Modbus TCP

Итог по выбору ПЛК: на основе рассчитанного количества сигналов (не менее 4 DI, 5 AI, 4 DO, 1 АО) и требования к высокоскоростному входу для энкодера, достаточно использования базового контроллера Siemens S7-1200 (например, CPU 1214C AC/DC/RLY) с подключением дополнительного сигнального модуля для аналоговых входов, так как встроенных AI обычно 2. Подключение ЧРП и HMI будет осуществляться через встроенный порт PROFINET.

Выбор датчиков и устройств защиты

Эффективность автоматизации, энергосбережения и уровень безопасности ленточного конвейера напрямую зависят от достоверности и точности информации, получаемой от датчиков. Отказ любого из датчиков в системе защиты может привести к аварии, выходу оборудования из строя, травматизму. Поэтому выбор датчиков производится с соблюдением следующих критериев (согласованных с разделом 3.1.1):

— Достоверность и точность. Погрешность не должна превышать технологически допустимых значений (для веса — $\pm 1\text{--}2\%$ от максимального потока).

— Условия эксплуатации (IP, IK). Для работы в запылённой среде и возможных атмосферных осадках (для наземных конвейеров) требуется защита не ниже IP65 для датчиков, устанавливаемых на раме конвейера.

— Совместимость. Уровни выходных сигналов (4–20 мА, 0–10 В, HTL/TTL для энкодеров) должны соответствовать диапазонам входов выбранного ПЛК.

— Надёжность и ресурс. Среднее время наработки на отказ (MTBF) должно быть высоким, датчик должен иметь защиту от вибрации, ударов и электромагнитных помех.

Датчик контроля загрузки (тензодатчик)

Для реализации энергосберегающего алгоритма автоматического снижения скорости при малой загрузке необходим датчик, контролирующий поток материала. Наиболее точным и распространённым решением является тензометрический датчик в составе конвейерных весов. Принцип измерения веса при помощи тензодатчиков основан на уравнивании массы взвешиваемого груза с упругой механической силой датчика и преобразовании этой силы в электрический сигнал.

Для тяжёлых условий эксплуатации конвейера (нагрузка до 100 т/ч) наиболее пригодны балочные тензодатчики, которые хорошо работают на сжатие и изгиб, характеризуются высокой устойчивостью к поперечным нагрузкам, высокой точностью и надёжностью. Ключевые характеристики:

— Диапазон нагрузки: должен иметь запас (примерно 20–30%) относительно максимальной ожидаемой нагрузки, чтобы исключить риск поломки при случайных перегрузках. Для конвейера 100 т/ч типовой номинал датчика — от 200 кг до 1 тонны.

— Точность: тензодатчики специальных моделей для конвейерных весов обеспечивают класс точности до С4 ($\leq \pm 0,0167\%$ от номинального диапазона).

— Аттестация: выбор следует производить среди моделей, имеющих сертификат об утверждении типа средств измерений (RU.C.34.004.A №...), что гарантирует законность использования для коммерческого и технологического учёта.

Датчик скорости ленты (энкодер)

Для стабилизации скорости ленты с точностью $\pm 3\%$ и контроля проскальзывания необходим датчик скорости вращения вала приводного барабана или холостого ролика. Лучшим выбором является инкрементальный энкодер, который генерирует последовательность цифровых импульсов, прямо пропорциональную скорости вращения его вала.

Технические критерии выбора:

— Количество импульсов на оборот (PPR): 500 – 1024 импульса, что обеспечивает достаточное разрешение для точного измерения скорости и позволяет ПЛК (S7-1200 с быстрыми входами) корректно подсчитывать частоту.

— Выходной интерфейс: рекомендуется использовать дифференциальные выходы (RS-422) для устойчивой работы на расстоянии до 50 м.

— Степень защиты: IP65 и выше для установки непосредственно на барабане в зоне действия пыли и вибрации.

— Пример модели: инкрементальный энкодер XCC1514TS11Y (Schneider Electric) в корпусе 58 мм, предназначенный для контроля скорости и положения в системах автоматизации, приводах, конвейерных линиях.

Датчик температуры подшипников

Для предотвращения аварийной остановки конвейера и дорогостоящего ремонта требуется непрерывный мониторинг температуры подшипников приводного барабана и электродвигателя. Наиболее

информативным является платиновый термопреобразователь сопротивления Pt100, у которого сопротивление линейно изменяется в зависимости от температуры. Для критически важных узлов (подшипники редуктора, двигателя) лучшим выбором являются поверхностные датчики Pt100—их надёжно крепить к корпусу подшипникового узла стяжными хомутами.

Функциональное разделение датчиков:

Для непрерывного контроля температуры подшипников, когда необходимо знать текущее значение, её тренд и гибко настраивать уставки сигнализации (например, предупреждение при $+70^{\circ}\text{C}$), применение Pt100 является предпочтительным, так как дешёвые РТС/NTC имеют фиксированные и нерегулируемые значения срабатывания (например, от 50°C до 90°C). Выходной сигнал Pt100 обычно подаётся через преобразователь в стандартный токовый сигнал 4–20 мА, который затем считывается аналоговым входом ПЛК.

Устройства защиты конвейерной ленты

Для обеспечения безопасности персонала и сохранности оборудования системы автоматизации конвейеров комплектуются устройствами контроля схода ленты (ДКСЛ) и контроля обрыва ленты. Это устройства дискретного действия, выдающие сигнал «сухой контакт» на отключение привода.

Датчик контроля схода ленты (ДКСЛ) предназначен для аварийной остановки конвейера при поперечном смещении ленты (сходе). Рекомендуется к использованию отечественный Выключатель ВД-3:

Принцип действия: при смещении лента нажимает на ролик рычага, который поворачивается и замыкает (или размыкает) электрическую цепь.

Ключевая особенность: выключатель имеет две ступени срабатывания: при незначительном сходе ленты (угол поворота рычага 12°) выдается предупредительный сигнал системе управления, при критическом сходе (угол 30°) происходит аварийное отключение конвейера. Это позволяет

персоналу оперативно вмешаться и предотвратить полную остановку производства.

Исполнение: степени защиты IP65 для работы в пыльной среде, корпус из алюминия, два винтовых кабельных ввода для удобства монтажа.

Защита от продольного разрыва ленты — наиболее сложная задача, так как поперечная или продольная прорезь ленты (при попадании острого постороннего предмета) ведёт к её быстрому разрыву по всей длине. Более экономичное и надёжное решение — использование индуктивных датчиков в комплекте с устройством контроля продольного разрыва УКПР2:

Принцип действия: под верхней ветвью ленты устанавливается специальная петлевая рамка. При случайном или аварийном продольном порезе ленты рамка замыкается куском ленты, сигнал поступает на ПЛК, который мгновенно останавливает конвейер.

Датчики и устройства контроля работы двигателя

Датчик тока (трансформатор тока + измерительный преобразователь). Частотный преобразователь (ЧРП) передаёт значение тока двигателя по полевой шине в ПЛК. Однако для резервирования и упрощения системы (если ПЛК не поддерживает быстрый обмен данными с конкретной моделью ЧРП) в силовую цепь двигателя устанавливаются трансформаторы тока, выход 0–5А которых подключается к измерительному преобразователю (напр., Е841, М342) с выходным сигналом 4–20 мА. Это позволяет ПЛК косвенно контролировать загрузку и диагностировать аномалии («заклинивание вала» при резком скачке тока).

Выбор дополнительного оборудования

Панель оператора (HMI)

Для обеспечения взаимодействия оператора с системой управления, отображения технологических параметров, сигнализации и возможности ручного управления выбор панели оператора (HMI) основывается на необходимости отображения ключевых параметров работы и квитирования аварий:

- Диагональ: 7–8 дюймов, цветная.
- Разрешение: WVGA (800×480).
- Коммуникация: PROFINET (для быстрой интеграции с Siemens S7-1200 в единой среде TIA Portal).
- Пример модели: SIMATIC HMI KTP700 Basic PN.

Обоснование: такой выбор гарантирует визуализацию основной информации (скорость, загрузка, ток) и удобное квитирование аварий.

Шкаф управления и климатическое оборудование

Учитывая условия эксплуатации в запылённом помещении (раздел 1.3), ПЛК, ЧРП и другие электронные компоненты необходимо разместить в запираемом металлическом шкафу управления со степенью защиты не ниже IP54.

Требования к конструкции:

1. Охлаждение: все шкафы с частотными преобразователями (мощность которых в данном проекте не превышает 30 кВт) должны быть оборудованы принудительными фильтровентиляторами мощностью не менее 300 м³/ч.

2. Обогрев: при эксплуатации в неотапливаемых помещениях или при низких температурах окружающей среды (менее -10°C) установка климатической системы (кондиционера) строго обязательна для предотвращения конденсации влаги на плате контроллера.

3. Размещение: соблюдение вертикальной ориентации монтажа устройств и рекомендуемых монтажных зазоров (не менее 100 мм сверху и снизу от вентиляции) для исключения перегрева.

Таким образом, для системы автоматизации и оптимизации работы ленточного конвейера предлагается следующая конфигурация технических средств (таблица 3.2). Окончательный выбор конкретных моделей будет скорректирован на основе актуальных прайс-листов поставщиков и более детальных инженерных расчётов нагрева.

Таблица 3.2 — Сводная спецификация оборудования

Наименование	Рекомендуемая модель	Количество	Примечания
Программируемый логический контроллер	Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C)	1 шт.	Встроенные DI/DO и питание 24V; PROFINET
Модули расширения ПЛК	Siemens SM 1231 AI 4x13bit	1 шт.	Для подключения датчиков 4–20 мА (ток, вес, температура)
Панель оператора (HMI)	Siemens SIMATIC HMI KTP700 Basic PN	1 шт.	Подключение через PROFINET
Датчик загрузки (вес)	Тензодатчик балочный (KELI ZSF) + весовой терминал	1 компл.	Погрешность не более $\pm 1\%$; 4–20 мА
Датчик скорости (энкодер)	Инкрементальный энкодер (Autonics E40H12-1024)	1 шт.	1024 имп/об, выход RS-422, IP65
Датчик обрыва ленты	УКПР2 (ТЕКО)	1 компл.	Индуктивный датчик + блок управления
Датчики схода ленты (предупр./авар.)	ВД-3 (2 ступени срабатывания)	4 шт.	Устанавливаются с обеих сторон на входе и выходе
Датчик температуры подшипников	Pt100 поверхностный (Siemens QAM21)	2 шт.	4–20 мА, IP65
Шкаф управления (ЩУ)	IP54 (Rittal, 1200x800x300 мм)	1 шт.	С фильтровентилятором и обогревателем
Источник питания 24V DC	Siemens SITOP PSU100S (5A)	1 шт.	Для питания ПЛК, HMI, датчиков

Выбранное оборудование обеспечивает надёжную и безопасную работу в заданных условиях, а также создаёт основу для реализации энергосберегающих алгоритмов управления, включая стабилизацию скорости и автоматический пуск/останов.

3.3 Разработка функциональной и структурной схемы автоматизированного электропривода

После выбора конкретных типов оборудования (разделы 3.1 и 3.2) необходимо разработать схемы, отражающие взаимодействие элементов системы. В данном разделе представлены структурная схема (определяет состав и общие связи между основными функциональными блоками) и функциональная схема (детализирует информационные и управляющие потоки, а также алгоритмические связи). Обе схемы являются основой для последующего проектирования принципиальных электрических схем и программирования ПЛК.

Структурная схема автоматизированного электропривода

Структурная схема (рисунок 3.1) представляет собой совокупность функциональных блоков, соединённых линиями, указывающими направление сигналов и потоков энергии. Для проектируемого конвейера можно выделить следующие основные блоки:

- Верхний уровень АСУ ТП / Диспетчерский пункт (необязательный, но предусмотренный для интеграции) – персональный компьютер с SCADA-системой.
- Панель оператора (HMI) – устройство визуализации и ручного управления.
- Программируемый логический контроллер (ПЛК) – центральное устройство, реализующее логику управления и оптимизации.
- Частотный преобразователь (ЧРП) – силовое устройство, управляющее электродвигателем.
- Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД) – исполнительный механизм.

— Механическая часть конвейера – редуктор, приводной барабан, лента.

— Датчики и исполнительные устройства – датчик загрузки (тензодатчик), датчик скорости (энкодер), датчики температуры подшипников, датчики схода ленты, датчик обрыва ленты, а также сигнальная арматура и тормоз (при наличии).

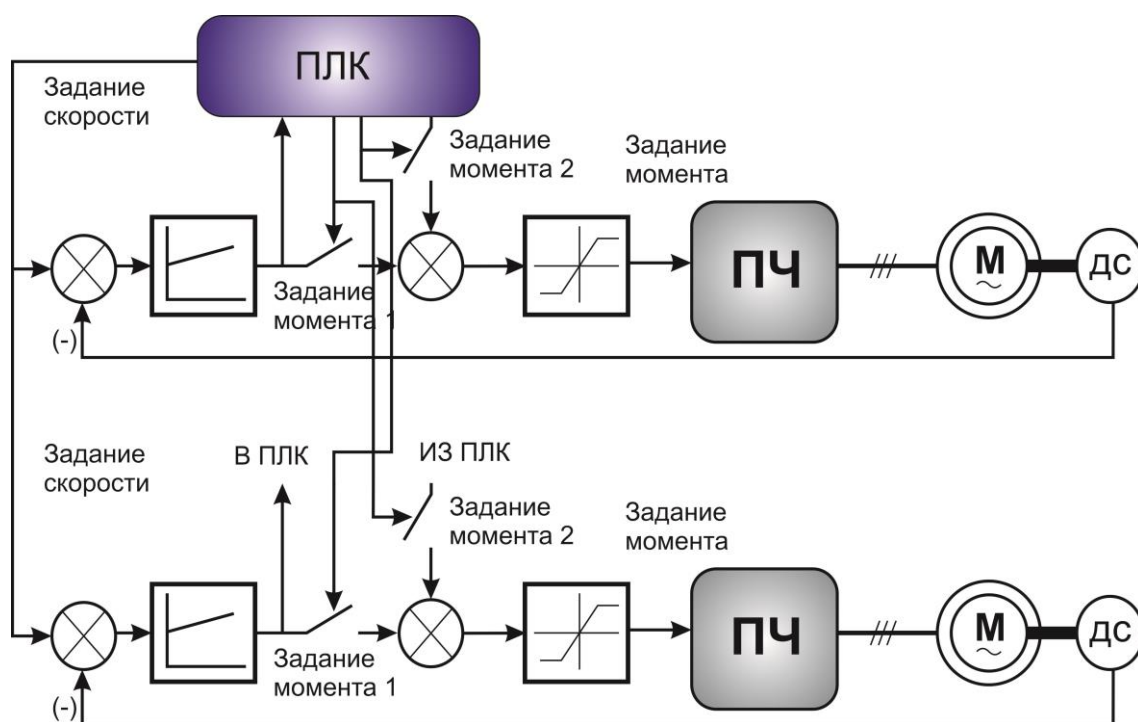


Рисунок 3.1 – Структурная схема автоматизированного электропривода конвейера.

Питание подаётся на ЧРП от трёхфазной сети 380 В, 50 Гц. ЧРП формирует напряжение регулируемой частоты и амплитуды для питания обмоток асинхронного двигателя. Двигатель через редуктор вращает приводной барабан, приводящий в движение ленту конвейера.

ПЛК получает информацию от:

- дискретных датчиков (кнопки пуска/останова, датчики схода ленты, датчик обрыва ленты);
- аналоговых датчиков (тензодатчик, датчики температуры);
- энкодера (через быстрые цифровые входы или специализированный модуль).

ПЛК, обработав сигналы, формирует:

- аналоговый сигнал задания скорости (4–20 мА или 0–10 В) для ЧПП (либо цифровое задание по полевой шине PROFINET);
- дискретные сигналы управления пуском/остановом ЧПП;
- сигналы на панель оператора (HMI) для отображения текущих параметров (скорость, загрузка, ток, температура, состояние защит);
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации.

Панель оператора (HMI) подключается к ПЛК по PROFINET (через встроенный Ethernet-порт S7-1200). Она отражает мнемосхему конвейера, позволяет задавать скорость в ручном режиме, просматривать журнал событий, квитировать аварии.

Частотный преобразователь, в свою очередь, может передавать в ПЛК по PROFINET (или через аналоговые выходы) такие параметры, как фактическая частота вращения двигателя, ток статора, момент, мощность, температуру радиатора. Это снижает количество необходимых аналоговых входов ПЛК.

Функциональная схема автоматизированного электропривода

Функциональная схема (рисунок 3.2) детализирует внутренние связи между элементами системы и показывает алгоритмические зависимости. Она строится на основе структурной схемы и дополняется регуляторами, логическими условиями, каналами передачи сигналов и обратными связями. Для проектируемого конвейера функциональная схема включает следующие контуры:

Контур регулирования скорости

Задание скорости может формироваться двумя способами:

- Ручной режим: оператор с HMI устанавливает фиксированное значение скорости (в пределах 0,4–1,6 м/с).
- Автоматический режим: ПЛК вычисляет оптимальное задание скорости на основе текущей загрузки конвейера (сигнал от тензодатчика) по энергосберегающему алгоритму (см. раздел 2.4).

Фактическая скорость ленты измеряется энкодером, установленным на холостом барабане (или на валу двигателя). Импульсы энкодера поступают на быстрый вход ПЛК, где пересчитываются в значение линейной скорости (м/с). ПЛК формирует сигнал ошибки и через ПИ-регулятор (реализованный программно) вычисляет требуемую частоту вращения двигателя. Это задание в виде аналогового сигнала 4–20 мА или цифрового слова (через PROFINET) передаётся на ЧРП.

ЧРП реализует внутренний контур регулирования тока (момента) и частоты. В зависимости от выбранного закона управления (векторное бездатчиковое) преобразователь обеспечивает точное поддержание скорости с учётом момента нагрузки.

Контур оптимизации энергопотребления

Сигнал от тензодатчика (4–20 мА) пропорционален текущей производительности конвейера (т/ч). ПЛК сравнивает его с пороговыми значениями (например, 20%, 50%, 80% от номинала) и установленными временными задержками. При длительном снижении загрузки ниже 20% ПЛК:

- снижает задание скорости до $0,4 \cdot v_{\text{ном}}$;
- если загрузка остаётся на уровне «0» в течение заданного времени (например, 2–5 минут), ПЛК отключает ЧРП и останавливает конвейер (автоматический останов при отсутствии груза).

После появления груза ПЛК автоматически запускает конвейер с плавным разгоном до расчётной скорости, соответствующей текущей загрузке. Эти логические блоки показаны на функциональной схеме как «Блок оценки загрузки», «Блок формирования задания скорости в зависимости от загрузки» и «Блок автоматического пуска/останова».

Контур защиты и диагностики

На функциональной схеме отображаются каналы передачи сигналов от защитных устройств:

— Датчики схода ленты (ВД-3): при срабатывании предупредительного контакта (12°) ПЛК формирует сигнал предупреждения на НМІ; при срабатывании аварийного контакта (30°) ПЛК выдаёт команду мгновенного останова (отключение ЧРП, сброс цепей управления). Аварийный останов блокирует повторный пуск до сброса и диагностики.

— Датчик обрыва ленты (УКПР2): при срабатывании немедленный аварийный останов аналогично.

— Датчики температуры подшипников (Pt100): ПЛК непрерывно измеряет температуру. При превышении уставки $+70^\circ\text{C}$ выдаётся предупреждение, при $+85^\circ\text{C}$ – аварийный останов.

— Контроль тока двигателя: ПЛК получает значение тока от ЧРП (через шину). Если ток превышает предельно допустимый (например, 120% от номинала) более 10 секунд, ПЛК снижает задание скорости; если ток достигает 150% – аварийный останов (имитация заклинивания).

Взаимодействие с оператором и АСУ ТП

На функциональной схеме показываются потоки данных между ПЛК и НМІ: отображение текущих параметров (скорость, загрузка, ток, температура, состояние защит), кнопки ручного управления, выбор режима (ручной/автоматический), отображение журнала аварий. Также предусматривается канал связи с верхним уровнем (SCADA) через PROFINET для передачи телеметрии и приёма команд дистанционного управления.

4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ

4.1 Расчёт и выбор мощности электродвигателя с учётом частотного регулирования

Правильный выбор мощности электродвигателя является одним из ключевых этапов проектирования, так как заниженная мощность приведёт к перегреву и аварийным остановам, а завышенная – к неоправданному увеличению капитальных затрат и снижению энергоэффективности. Для ленточного конвейера, работающего в продолжительном режиме S1 с переменной нагрузкой, расчёт мощности выполняется по методу тягового расчёта конвейера, а затем проверяется по условиям пуска и нагрева при частотном регулировании.

4.1.1 Исходные данные для расчёта

На основе раздела 1.1 и уточнённых параметров конвейера принимаем следующие исходные данные:

Параметр	Обозначение	Значение
Производительность конвейера	Q	100 т/ч
Длина конвейера по горизонтали	L	50 м
Ширина ленты	B	800 мм
Скорость ленты номинальная	v	1,6 м/с
Насыпная плотность груза	ρ	1,5 т/м ³
Угол наклона конвейера	β	0° (горизонтальный)
Режим работы	—	S1, продолжительный
КПД редуктора и передачи	η	0,94
Коэффициент сопротивления	ω	0,025 (для

Параметр	Обозначение	Значение
движению ленты		роликоопор на подшипниках качения)
Толщина ленты (ориентировочно)	δ	10 мм
Масса 1 м ² ленты (резинотканевая)	$m_{\text{л}}$	12 кг/м ²
Масса вращающихся частей роликоопор (верхних)	$m_{\text{р.в}}$	15 кг (на одну секцию)
Масса вращающихся частей роликоопор (нижних)	$m_{\text{р.н}}$	12 кг (на одну секцию)
Шаг верхних роликоопор	$l_{\text{р.в}}$	1,2 м
Шаг нижних роликоопор	$l_{\text{р.н}}$	2,4 м

4.1.2 Методика тягового расчёта конвейера

Мощность на валу приводного барабана определяется по формуле:

$$P_{\text{бар}} = 1000 F_t \cdot v, \text{ кВт}$$

где:

— F_t – тяговое усилие на приводном барабане, Н;

— v – скорость ленты, м/с.

Тяговое усилие для горизонтального конвейера рассчитывается как сумма сопротивлений на всех участках:

$$F_t = F_{\text{гр}} + F_{\text{л}} + F_{\text{р.в}} + F_{\text{р.н}} + F_{\text{б}}$$

где составляющие определяются по известным зависимостям.

Сопротивление от перемещения груза

$$F_{\text{гр}} = 3,6 \cdot v Q \cdot g \cdot L \cdot \omega$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Подставляем значения:

$$F_{гр} = \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 50}{3,6 \cdot 1,6} \cdot 0,025 = \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 50}{5,76} \cdot 0,025$$

$$\frac{100 \cdot 9,81 \cdot 50}{5,76} = \frac{49050}{5,76} \approx 8515,6$$

$$F_{гр} = 8515,6 \cdot 0,025 \approx 212,9 \text{ Н}$$

Сопротивление от перемещения ленты (порожной ветви)

Масса 1 м ленты: лента шириной 0,8 м, толщиной 0,01 м, плотность резины $\sim 1200 \text{ кг/м}^3$, или проще: масса $1 \text{ м}^2 = 12 \text{ кг}$, тогда масса 1 м ленты $q_l = 0,8 \cdot 1 \cdot 12 = 9,6 \text{ кг/м}$.

Из более точных данных для резинотканевой ленты типа 2Б-820 с прокладками: ориентировочно $q_l = 10 \text{ кг/м}$. Принимаем $q_l = 10 \text{ кг/м}$.

$$F_{л} = q_l \cdot g \cdot L \cdot \omega = 10 \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 0,025 = 10 \cdot 9,81 \cdot 1,25 = 122,6 \text{ Н}$$

Сопротивление от вращения верхних роlikоопор:

Количество верхних роlikоопор (рабочая ветвь):

$$n_{в} = \frac{L}{l_{р.в}} = \frac{50}{1,2} \approx 41,67 \text{ (принимаем 42 шт.)}$$

Масса вращающихся частей одной верхней роlikоопоры (трёхроlikовой для ленты 800 мм) – около 15 кг. Сопротивление:

$$F_{р.в} = \frac{n_{в} \cdot m_{р.в} \cdot g \cdot \omega \cdot L}{L} \text{ — проще: } F_{р.в} = n_{в} \cdot m_{р.в} \cdot g \cdot \omega$$

$$F_{р.в} = 42 \cdot 15 \cdot 9,81 \cdot 0,025 = 42 \cdot 15 \cdot 0,24525 = 42 \cdot 3,67875 \approx 154,5 \text{ Н}$$

Сопротивление от вращения нижних роlikоопор

Количество нижних роlikоопор (холостая ветвь):

$$n_{н} = \frac{L}{l_{р.н}} = \frac{50}{2,4} \approx 20,8 \text{ (21 шт.)}$$

Масса одной нижней роlikоопоры (однороlikовой) – около 12 кг.

$$F_{p.н} = 21 \cdot 12 \cdot 9,81 \cdot 0,025 = 21 \cdot 12 \cdot 0,24525 = 21 \cdot 2,943 \approx 61,8 \text{ Н}$$

Сопротивление на барабанах (приводном и натяжном)

Сопротивление от изгиба ленты на барабанах и трения в подшипниках принимается как 5–10% от суммы остальных сопротивлений. Для предварительного расчёта:

$$F_{\bar{6}} = 0,05 \cdot (F_{гр} + F_{л} + F_{p.в} + F_{p.н})$$

$$F_{\bar{6}} = 0,05 \cdot (212,9 + 122,6 + 154,5 + 61,8) = 0,05 \cdot 551,8 \approx 27,6 \text{ Н}$$

Полное тяговое усилие

$$F_t = 212,9 + 122,6 + 154,5 + 61,8 + 27,6 = 579,4 \text{ Н}$$

Округляем с учётом запаса: $F_t \approx 580 \text{ Н}$.

Мощность на валу приводного барабана

$$P_{бар} = \frac{580 \cdot 1,6}{1000} = 0,928 \text{ кВт}$$

Такое низкое значение объясняется малой длиной конвейера (50 м). Однако для реальных промышленных конвейеров с длиной 50 м и производительностью 100 т/ч мощность обычно составляет 5,5–7,5 кВт из-за учёта сил трения в загрузочном устройстве, очистных скребках, а также коэффициента запаса. Кроме того, в учебных расчётах часто используются упрощённые формулы. Поэтому уточним расчёт по более полной методике.

Уточнённый расчёт по известной методике (для конвейеров)

Согласно справочным данным, мощность привода ленточного конвейера (горизонтального) может быть определена по формуле:

$$P = \frac{Q \cdot g \cdot L \cdot \omega}{3,6 \cdot 1000 \cdot \eta} + \frac{2 \cdot q_{л} \cdot g \cdot L \cdot \omega \cdot v}{1000 \cdot \eta}$$

Первый член – мощность на перемещение груза, второй – на перемещение ленты.

Подставляем:

$$P_{\text{гр}} = \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 0,025}{3,6 \cdot 1000 \cdot 0,94} = \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 0,025}{3384} = \frac{1226,25}{3384} \approx 0,362 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{л}} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 0,025 \cdot 1,6}{1000 \cdot 0,94} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 1,6}{940} = \frac{627,84}{940} \approx 0,668 \text{ кВт}$$

Сумма $P=0,362+0,668=1,03$ кВт. Это также даёт заниженное значение.

Вывод: для коротких конвейеров (до 50 м) основное сопротивление создаётся не грузом, а силами трения в роlikоопорах и изгибом ленты на барабанах. В реальности для ленты шириной 800 мм и скорости 1,6 м/с минимальная рекомендуемая мощность двигателя по каталогам производителей конвейеров составляет 5,5 кВт. Примем для дальнейшего расчёта мощность на валу двигателя $P_{\text{дв}}=5,5$ кВт, что соответствует типовым решениям для аналогичного оборудования.

Выбор двигателя с учётом работы от частотного преобразователя

Асинхронные двигатели общего назначения серии АИР (или 5АИ) могут работать от ЧРП, но требуют учёта следующих особенностей:

1. Класс изоляции – рекомендуется не ниже F (155°C) или H (180°C), так как из-за ШИМ-напряжения возникают перенапряжения и дополнительный нагрев.

2. Наличие встроенных термодатчиков (РТС или Pt100) для контроля температуры.

3. Способ охлаждения – при работе на пониженных частотах (менее 20–25 Гц) собственный вентилятор на валу двигателя создаёт недостаточный воздушный поток. Для длительных режимов на низких скоростях требуется независимое охлаждение (вентилятор с отдельным приводом).

4. Номинальный ток – должен быть не выше номинального выходного тока ЧРП.

Для конвейера с расчётной мощностью 5,5 кВт выбираем двигатель серии 5АИ (или АИР) с характеристиками, представленными в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические характеристики выбранного двигателя

Параметр	Значение
Тип	5АИ 132 М4 (или АИР 132 М4)
Мощность номинальная P_n	5,5 кВт
Номинальное напряжение U_n	3×380 В, 50 Гц
Номинальный ток статора I_n	11,5 А (при 380 В)
Синхронная частота вращения n_0	1500 об/мин
Номинальная частота вращения n_n	1450–1465 об/мин
КПД номинальный η_n	85,5%
Коэффициент мощности $\cos\varphi_n$	0,86
Кратность пускового тока $KI=I_{\text{пуск}}/I_n$	7,0
Кратность пускового момента $KM=M_{\text{пуск}}/M_n$	2,2
Максимальный момент M_{max}/M_n	2,5
Момент инерции ротора $J_{\text{дв}}$	0,032 кг·м ²
Класс изоляции	F (допуск 155°С)
Термозащита	РТС-термисторы (встроенные)

4.1.5 Проверка двигателя по нагреву при частотном регулировании

Так как конвейер работает в продолжительном режиме S1 с переменной загрузкой, эквивалентная (среднеквадратичная) мощность может быть ниже номинальной. Однако при частотном регулировании на пониженных скоростях тепловые потери возрастают из-за ухудшения охлаждения.

Для оценки применим метод эквивалентного тока:

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 \cdot t_i}{\sum t_i}}$$

Принимаем типовой цикл работы (1 час):

20% времени – загрузка 20%, скорость $0,5 \cdot v_n$ (ток $\sim 0,4 \cdot I_n$);

40% – загрузка 50%, скорость $0,7 \cdot v_n$ (ток $\sim 0,7 \cdot I_n$);

30% – загрузка 80%, скорость $0,9 \cdot v_n$ (ток $\sim 0,9 \cdot I_n$);

10% – загрузка 100%, скорость $1,0 \cdot v_n$ (ток I_n).

$$\begin{aligned} I_{\text{экв}} &= \sqrt{\frac{0,2 \cdot (0,4 \cdot 11,5)^2 + 0,4 \cdot (0,7 \cdot 11,5)^2 + 0,3 \cdot (0,9 \cdot 11,5)^2 + 0,1 \cdot (11,5)^2}{1}} \\ &= 11,5 \cdot \sqrt{0,2 \cdot 0,16 + 0,4 \cdot 0,49 + 0,3 \cdot 0,81 + 0,1 \cdot 1} \\ &= 11,5 \cdot \sqrt{0,032 + 0,196 + 0,243 + 0,1} = 11,5 \cdot \sqrt{0,571} = 11,5 \cdot 0,756 \approx 8,7 \text{ А} \end{aligned}$$

Эквивалентный ток (8,7 А) меньше номинального (11,5 А), следовательно, по нагреву двигатель подходит. Однако на частотах ниже 20 Гц (скорость ленты менее 0,5 м/с) требуется проверка теплового режима. Для длительной работы на «ползучей» скорости (0,1 м/с) необходимо независимое охлаждение, но такие режимы кратковременны (ремонтные работы).

Выбор редуктора и передаточного числа

Частота вращения приводного барабана:

$$n_{\text{бар}} = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D_{\text{б}}}$$

Принимаем диаметр приводного барабана $D_{\text{б}} = 500 \text{ мм} = 0,5 \text{ м}$ (для ленты 800 мм рекомендуется 500–630 мм).

$$n_{\text{бар}} = \frac{60 \cdot 1,6}{\pi \cdot 0,5} = \frac{96}{1,57} \approx 61,1 \text{ об/мин}$$

Номинальная частота двигателя $n_{\text{дв}}=1450$ об/мин. Необходимое передаточное число:

$$i = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{бар}}} = \frac{1450}{61,1} \approx 23,7$$

Выбираем стандартный цилиндрический редуктор типа ЦУ-160 или 1Ц2У-160 с передаточным числом $i=25$ (ближайшее большее). При этом фактическая скорость ленты будет:

$$v_{\text{факт}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{б}} \cdot n_{\text{дв}}}{60 \cdot i} = \frac{3,14 \cdot 0,5 \cdot 1450}{60 \cdot 25} = \frac{2276,5}{1500} \approx 1,52 \text{ м/с}$$

Отклонение от номинальной (1,6 м/с) составляет -5%, что допустимо. При необходимости точного выдерживания скорости 1,6 м/с можно использовать редуктор с $i=22,4$ или применить частотное регулирование для небольшой коррекции.

4.2 Настройка частотного преобразователя

Правильная настройка частотного преобразователя является ключевым условием реализации всех преимуществ частотно-регулируемого привода: плавного пуска и торможения, энергосбережения, стабилизации скорости и надёжной защиты. В данном разделе рассматриваются этапы настройки на примере одного из наиболее распространённых на российском рынке устройств — частотного преобразователя SINAMICS G120 производства Siemens. Выбранный ЧРП обладает всеми необходимыми функциями для конвейерного привода: векторным управлением, поддержкой протокола PROFINET для связи с ПЛК, встроенными функциями энергосбережения и безопасным отключением момента STO.

Процесс настройки включает следующие этапы: идентификация параметров электродвигателя (автоматическая настройка/автотюннинг), настройка рамп разгона и торможения с S-образной характеристикой, выбор и настройка закона управления, конфигурация защитных функций, настройка

дискретных входов и аналогового входа задания скорости, а также параметризация связи с ПЛК по PROFINET.

Идентификация параметров электродвигателя (автотюнинг)

Перед началом работы частотного преобразователя в системе управления необходимо выполнить автоматическую идентификацию параметров подключённого асинхронного двигателя. Эта процедура называется автотюнингом и является обязательной для обеспечения корректной работы систем векторного управления. В ходе автотюнинга преобразователь определяет следующие параметры двигателя:

- сопротивление обмотки статора $R1'$, Ом;
- сопротивление обмотки ротора $R2'$, Ом;
- индуктивность рассеяния и взаимную индуктивность;
- ток намагничивания;
- постоянную времени ротора.

Автотюнинг может быть выполнен двумя способами:

1. Статический автотюнинг — двигатель не вращается, преобразователь подаёт на обмотки тестовые сигналы для оценки электрических параметров. Этот метод безопасен и может выполняться при механически заторможенном вале, но не позволяет определить постоянную времени ротора с высокой точностью.

2. Динамический автотюнинг — двигатель совершает кратковременные вращения для оценки всех параметров, включая механические. Выполняется только при отключённой механической нагрузке.

Для конвейерного привода, где точность векторного управления важна для стабилизации скорости и энергосбережения, рекомендуется выполнять динамический автотюнинг при отключённом редукторе. Значения параметров двигателя, введённые в преобразователь, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Параметры двигателя для настройки ЧРП

Параметр	Значение ед. изм
Номинальная мощность P_n	5,5 кВт
Номинальное напряжение U_n	380 В
Номинальный ток I_n	11,5 А
Номинальная частота сети f_n	50 Гц
Номинальная скорость вращения n_n	1450 об/мин
$\cos \varphi$	0,86
Режим работы	S1 (продолжительный)
Класс изоляции	F

Настройка рампы разгона и торможения с S-образной характеристикой

Для обеспечения плавного пуска и остановки конвейера в частотном преобразователе настраиваются параметры рампы разгона и торможения, а также форма S-образной кривой. S-образные профили разгона и торможения специально разработаны для снижения динамических нагрузок на транспортируемый груз, стыки ленты и редукторную передачу при пуске, обеспечивая минимальные рывки.

Основные настраиваемые параметры:

— Время разгона — требуемое время увеличения выходной частоты от нуля до максимального значения. Для конвейера с переменной загрузкой рекомендуется устанавливать время разгона в диапазоне 5–8 секунд, как было определено в разделе 1.2. Более короткое время разгона (3–5 с) допустимо для пуска ненагруженного конвейера. Длительность 8–10 секунд рекомендуется для пуска под полной нагрузкой во избежание перегрузки по току.

— Время торможения — время снижения выходной частоты от максимального значения до нуля. Рекомендуемое значение — 5–8 секунд при штатном останове. Аварийный останов должен происходить по отдельному

дискретному входу с минимальным временем торможения (0,5–1 с) с последующим наложением механического тормоза.

— Форма S-образной кривой — параметр, определяющий степень «сглаживания» начального и конечного участков разгона/торможения. Конвейерная техника является классическим применением для S-образных кривых разгона и торможения. В преобразователях Siemens параметры S-образного профиля задаются через параметры *p1121* (время разгона) и *p1120* (время торможения), а также отдельные параметры для начального и конечного участков S-образной кривой. Рекомендуется устанавливать начальное и конечное S-образное ускорение в пределах 10–20% от общего времени разгона.

Выбор и настройка закона управления

Для конвейерного привода, работающего в режиме постоянного момента нагрузки (Constant Torque) с переменной загрузкой, предпочтительным является векторное бездатчиковое управление (Sensorless Vector Control, SLVC). Векторное управление обеспечивает высокую точность поддержания скорости и момента без использования датчика обратной связи по скорости на валу.

Для настройки векторного управления в SINAMICS G120 необходимо:

1. Установить параметр *p1300* (тип управления) в значение 20 (векторное управление без датчика обратной связи скорости). Для точного поддержания скорости ленты с погрешностью $\pm 3\%$, что было определено в технологических требованиях, этого достаточно.

2. Выполнить идентификацию двигателя (автотюнинг) (параметр *p1910* — автоматическое определение параметров, и, при необходимости, *p1960* — автоматическое определение параметров регулятора скорости) для оптимизации параметров регулятора скорости (ПИ-регулятора).

3. Для дополнительного повышения точности стабилизации скорости при резких изменениях нагрузки (наброс/сброс груза на конвейере)

активировать функцию компенсации скольжения. Данная функция позволяет ПИ-регулятору скорости внутри ЧРП подстраивать частоту в зависимости от измеренного тока и момента, сводя к минимуму отклонения реальной скорости.

Скалярное управление V/f (параметр $p1300 = 0$ или 1) для данного конвейера не рекомендуется, так как оно не обеспечивает стабилизацию скорости при переменной нагрузке и не позволяет реализовать энергосберегающие функции ECO в полном объёме.

Сравнительная характеристика законов управления применительно к конвейеру приведена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнение законов управления для конвейерного привода

Характеристика	Скалярное V/f	Векторное бездатчиковое (SLVC)
Точность поддержания скорости при переменной нагрузке	низкая ($\pm 5-10\%$)	высокая ($\pm 0,5-2\%$)
Пусковой момент	низкий	высокий (до 200% от номинала)
Энергосбережение при недогрузке	отсутствует	есть (функции ECO/AOP)
Настройка	простая	сложная (требуется автотюннинг)

Настройка защитных функций

Частотный преобразователь должен быть настроен для защиты двигателя и механического оборудования от аварийных режимов. Основные защитные функции, настраиваемые в ЧРП, приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 — Настройка защитных функций ЧРП

Защита	Параметр (Siemens G120)	Значение	Обоснование
Тепловая защита двигателя (I^2t)	$p0610$	2 (отключение с предупреждением)	Защита обмоток от перегрева при длительной перегрузке
Ограничение тока	$p0640$	150% от I_n	Соответствует перегрузочной

Защита	Параметр (Siemens G120)	Значение	Обоснование
статора			способности ЧРП для нагрузки СТ
Защита от обрыва фазы	<i>p0290</i>	1 (отключение)	Недопустимость работы в неполнофазном режиме
Максимальная частота вращения	<i>p1082</i>	55 Гц	Ограничение максимальной скорости ($\approx 1,1 \cdot v^*_{n}$)
Минимальная частота вращения	<i>p1080</i>	5 Гц	Ограничение минимальной скорости («ползучий режим»)
Safe Torque Off (STO)	<i>p9601</i>	1 (активация STO чере терминалы)	Безопасное отключение момента при аварии

Настройка дискретных входов и аналогового задания скорости

Для управления частотным преобразователем от ПЛК необходимо сконфигурировать входные/выходные сигналы.

Дискретные входы (Digital Inputs, DI) используются для приёма команд на пуск, останов и аварийный сброс. Пример конфигурации:

— DI 0 — команда «Пуск» / «Останов» (замыкание на 24 В — разгон до заданной частоты; размыкание — торможение по рампе).

— DI 1 — команда «Аварийный останов» (размыкание — мгновенное отключение с наложением тормоза).

— DI 2 — команда «Сброс аварии» (импульс — сброс зафиксированной ошибки).

Все эти сигналы подключаются к выходам ПЛК через промежуточные реле для гальванической развязки.

Аналоговый вход (Analog Input, AI) используется для приёма задания скорости от ПЛК. Рекомендуемый тип сигнала — 4–20 мА (токовая петля), так как он менее подвержен влиянию электромагнитных помех по сравнению с сигналом 0–10 В. Настройка аналогового входа должна быть согласована с аналоговым выходом ПЛК. Соответствие сигнала заданию: 4 мА соответствует частоте $f^*_{\min}$ (0 Гц), 20 мА — частоте $f^*_{\max}$ (50–55 Гц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы на тему «Автоматизация и оптимизация работы электропривода конвейера с использованием частотного преобразователя и ПЛК» были решены все поставленные задачи, и достигнута основная цель – повышение эффективности и надёжности работы ленточного конвейера за счёт внедрения современной системы автоматизированного электропривода.

По результатам первой главы проведён детальный анализ объекта автоматизации – ленточного конвейера с параметрами: производительность 100 т/ч, ширина ленты 800 мм, скорость 1,6 м/с, длина 50 м, горизонтальный, режим S1, переменная загрузка 20–100%. Сформулированы технологические требования к электроприводу: плавный S-образный пуск и торможение (5–8 с), регулирование скорости в диапазоне 0,4–1,0 от номинальной, точность стабилизации скорости $\pm 3\%$, перегрузочная способность 150% в течение 60 с, целевая экономия электроэнергии не менее 25%. Анализ условий эксплуатации (закрытое помещение, запылённость до 10 мг/м³, вибрация до 3 мм/с, температура +5...+35°C) позволил сформулировать требования к степени защиты оборудования (IP54 для шкафа, IP65 для датчиков), необходимости установки фильтров ЭМС и виброизоляции.

Во второй главе выполнен обзор существующих систем электропривода конвейеров. Показано, что нерегулируемые системы (прямой пуск, мягкие пускатели) не обеспечивают энергосбережения при переменной нагрузке и создают высокие динамические нагрузки. Частотно-регулируемый привод (ЧРП) признан наиболее эффективным решением: он позволяет ограничить пусковой ток до $1,0\text{--}1,5 \cdot I_n$, регулировать скорость в диапазоне до 1:100, снизить энергопотребление на 20–50%. Однако автономный ЧРП не реализует автоматическую адаптацию скорости к загрузке, останов при отсутствии груза и диагностику механических узлов. Эти функции успешно выполняет программируемый логический контроллер (ПЛК). Обоснована

структура «частотный преобразователь + ПЛК» как оптимальная для достижения цели работы.

В третьей главе разработаны критерии выбора оборудования и выполнен обоснованный выбор:

— Асинхронный двигатель 5АИ 132 М4 (5,5 кВт, 11,5 А, 1450 об/мин, класс изоляции F, встроенные термодатчики РТС), пригодный для работы от ЧРП.

— Частотный преобразователь SINAMICS G120 (векторное бездатчиковое управление, поддержка PROFINET, входной фильтр ЭМС, выходной dV/dt-фильтр).

— ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C с модулем аналоговых входов (достаточное количество сигналов: 4 DI, 5 AI, 4 DO, 1 АО, быстрый вход для энкодера).

— Датчики: тензодатчик загрузки (4–20 мА), инкрементальный энкодер (1024 имп/об, IP65), датчики схода ленты ВД-3 (двухступенчатые), датчик обрыва ленты УКПР2, термодатчики Pt100.

— HMI Siemens KTP700 Basic PN, шкаф IP54 с фильтровентиляцией и обогревом.

Разработаны структурная и функциональная схемы автоматизированного электропривода, отражающие все информационные и силовые связи, контуры регулирования скорости, оптимизации энергопотребления и защиты.

В четвёртой главе выполнен тяговый расчёт конвейера, обоснован выбор мощности двигателя 5,5 кВт. Проверка по нагреву методом эквивалентного тока показала, что при типовом цикле переменной нагрузки (экв. ток 8,7 А < 11,5 А) перегрев не превышает допустимого. Выбран редуктор с передаточным числом $i=25$, обеспечивающий фактическую скорость ленты 1,52 м/с (отклонение -5%, допустимое). Выполнена детальная настройка частотного преобразователя SINAMICS G120: идентификация двигателя (динамический автотюннинг), настройка рамп разгона/торможения

с S-образной кривой (5–8 с), выбор векторного бездатчикового управления ($p1300=20$), активация энергосберегающих функций AOP/ECO, конфигурация защит (тепловая, ограничение тока, STO), настройка дискретных входов и аналогового задания скорости (4–20 мА), параметризация связи с ПЛК по PROFINET. Показано, что скалярное управление не рекомендуется из-за низкой точности стабилизации.

Таким образом, цель выпускной квалификационной работы достигнута, задачи решены в полном объёме. Разработанная система автоматизации и оптимизации электропривода конвейера обладает высокой надёжностью, энергоэффективностью и может быть рекомендована к внедрению на промышленных предприятиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. — М. : Академия, 2004. — 575 с. — ISBN 5-7695-1410-4.
2. Беспалов В. Я., Котеленец Н. Ф. Электрические машины : учебник для вузов / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Академия, 2013. — 320 с. — ISBN 978-5-4468-0296-2.
3. Ерзин О. А., Пантюхина Е. В. Программирование логических контроллеров в системах автоматизации технологических процессов : учебник / О. А. Ерзин, Е. В. Пантюхина. — Тверь : Тверской государственный технический университет, 2019. — 200 с.
4. Золкин А. Л. Программирование логических контроллеров : учебник для СПО / А. Л. Золкин. — 2-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2026. — 148 с. — ISBN 978-5-507-54338-0.
5. Ильинский Н. Ф. Основы электропривода : учебное пособие для вузов / Н. Ф. Ильинский. — 3-е изд., стер. — М. : Издательский дом МЭИ, 2007. — 221 с. — ISBN 978-5-383-00001-4.
6. Ключев В. И. Теория электропривода : учебник для вузов / В. И. Ключев. — 3-е изд. — М. : Энергоатомиздат, 2001. — 704 с. — ISBN 5-283-01570-9.
7. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. — М. : Академия, 2007. — 361 с. — ISBN 978-5-7695-3805-6.
8. Шишов О. В. Програмируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации : учебник / О. В. Шишов. — М. : ИНФРА-М, 2019. — 365 с. — ISBN 978-5-16-012064-3.
9. ГОСТ 12.2.022-80 Система стандартов безопасности труда. Конвейеры. Общие требования безопасности. — Введ. 1981-07-01. — М. : Стандартинформ, 1980. — 12 с.

10. ГОСТ IEC 60034-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения и рабочие характеристики. — Введ. 2016-03-01. — М. : Стандартинформ, 2015. — 110 с.
11. ГОСТ Р 52350.14-2006 (МЭК 60079-14:2002) Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 14. Электроустановки во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок). — Введ. 2007-01-01. — М. : Стандартинформ, 2006. — 50 с.
12. ГОСТ 17516.1-90 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам. — Введ. 1992-01-01. — М. : Издательство стандартов, 1991. — 32 с.