

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

Ербол Еламан Серікұлы

Модернизация ленточного конвейера ТОО «Темирбетон»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07101– Энергетика

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

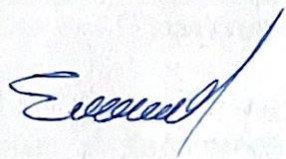
Зарегистрированный кафедрой
«Энергетика»
Допущен к защите
Д.И.Сатпаева, ассоциированный
Институт энергетики профессор
и машиностроения Е.А. Сарсенбаев
«3» 06 2025г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Модернизация ленточного конвейера ТОО «Темирбетон»

6B07101– Энергетика

Выполнил:



Ербол Е.С.

Рецензент

PhD, ассоциированный
профессор

Д.Ш. Утешкалиева
«04» 06 2025 г.

Научный руководитель

PhD, ассоциированный профессор

С.А. Минажова
«03» 06 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева
Кафедра «Энергетика»

6B07101– Энергетика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Энергетика»
PhD, ассоциированный профессор
Е.А. Сарсенбаев
«28» 01 2025г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Ербол Еламан Серікұлы

Тема: Модернизация ленточного конвейера ТОО «Темирбетон»

Утверждена приказом Проректора по академическим вопросам №26 П/Ө от 29 января 2025г.

Срок сдачи законченной работы «19» мая 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: Требуемая производительность ленточного конвейера – 1000т/час, плотность сырья – 2,15т/м³, ширина ленты – 1метр, скорость транспортирования 2 м/с, ускорение свободного падения – 9,81 м/с². Объект – цементный завод.

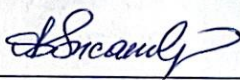
Краткое содержание дипломной работы: в ведении рассмотрена актуальность задачи и виды производственных конвейеров, далее проведен расчет параметров ленточного конвейера и ее электропривода, проведен выбор частотного преобразователя и электрооборудования, соответствующего техническим требованиям и условиям эксплуатации. Проведено технико-экономическое сравнение двух вариантов электропривода, по результатам которого обоснован выбор наиболее рационального решения.

Графические материалы дипломной работы представлены в 10 слайдах.

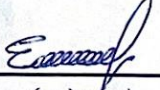
ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретическая часть	10.02 - 19.03. 2025	—
Расчетная часть	10.03 - 21.04. 2025	—
Экономическая часть	07.04 - 30.04. 2025	—

Подписи
консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Расчетная часть	С.А. Минажова, PhD, ассоциированный профессор	21.04. 2025	
Экономическая часть	С.А. Минажова, PhD, ассоциированный профессор	30.04. 2025	
Нормаконтроль	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель	03.06. 2025	

Научный руководитель  С.А. Минажова
(подпись)

Задание принял к исполнению обучающийся  Е.С. Ербол
(подпись)

Дата " 19 " мая 2025г.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа посвящена актуальной задаче повышения эффективности работы конвейерных систем за счёт внедрения современных средств управления. В работе рассмотрены вопросы расчёта параметров ленточного конвейера и ее электропривода, проведён выбор частотного преобразователя и электрооборудования, соответствующего техническим требованиям и условиям эксплуатации. Проведено технико-экономическое сравнение двух вариантов электропривода, по результатам которого обоснован выбор наиболее рационального решения. Работа включает анализ ключевых технических характеристик, подбор оборудования с учетом специфики производственного процесса, а также обобщает результаты в форме выводов и практических рекомендаций по применению модернизированного электропривода в промышленности.

АНДАТПА

Дипломдық жұмыс конвейерлік жүйелердің тиімділігін арттыру мақсатында заманауи басқару құралдарын енгізу арқылы өзекті мәселені шешуге арналған. Жұмыста ленталық конвейер мен оның электр жетегінің параметрлерін есептеу мәселелері қарастырылып, техникалық талаптар мен пайдалану жағдайларына сәйкес келетін жиілік түрлендіргіші мен электр жабдықтары таңдалды. Электр жетегінің екі нұсқасының техникалық-экономикалық салыстырмалы талдауы жүргізіліп, оның нәтижелері бойынша ең тиімді шешім негізделді. Жұмыс өндірістік процестің ерекшеліктерін ескере отырып, негізгі техникалық сипаттамаларға талдау жасап, жабдықтарды таңдауды қамтиды, сондай-ақ жаңғыртылған электр жетегін өнеркәсіпте қолдану бойынша қорытындылар мен практикалық ұсынымдар келтірілген.

ANNOTATION

This diploma thesis addresses the relevant issue of improving the efficiency of conveyor systems through the implementation of modern control technologies. The study includes calculations of the parameters of a belt conveyor and its electric drive, as well as the selection of a frequency converter and electrical equipment that meet the technical requirements and operating conditions. A techno-economic analysis of two electric drive options was carried out, resulting in a justified choice of the most effective solution. The work includes an analysis of key technical characteristics, selection of equipment with consideration of the production process specifics, and provides conclusions and practical recommendations for the application of the modernized electric drive in industrial settings.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Основные виды конвейеров, классификация, конструкция и электропривод. Постановка задания на проектирование	8
1.1 Виды конвейеров	8
1.2 Конструкция различных видов конвейеров	8
1.3 Примеры выполнения электроприводов конвейера	12
1.4 Расположение электроприводов на конвейерных линиях	16
1.5 Статические и динамические параметры работы электропривода	17
1.6 Основные требования, предъявляемые к электроприводу конвейерного транспорта и постановка задания на проектирование	26
2 Модернизация электропривода конвейера. Вычисления модернизированного ленточного конвейера	30
2.1 Вычисления мощности и выбор двигателя, управляемого преобразования	40
2.2 Выбор частотного преобразователя в соответствии с мощностью двигателя	46
2.3 Вычисления и выбор понижающего трансформатора	51
2.4 Вычисления индуктивности LC фильтра	53
2.5 Вычисления структурной схемы электропривода в абсолютных единицах	54
2.6 Синтез регуляторов системы управления электроприводом	56
2.7 Вычисления структурной схемы электропривода в относительных единицах	57
2.8 Анализ системы управления	59
3 Техничко-экономическая часть	62
Заклучение	65
Список литературы	66

ВВЕДЕНИЕ

С развитием промышленности и увеличением объёмов выпуска продукции стали предъявляться более строгие технические требования к конвейерным системам. Это связано с необходимостью поддержания различных скоростей транспортировки и адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации, как в течение одной смены, так и в рамках отдельных производственных циклов. Возникает потребность в гибких системах электроприводов, способных адаптироваться к текущим задачам и производственным условиям.

Совершенствование автоматизации конвейерных линий направлено на расширение централизованного управления на основе применения специализированных вычислительных комплексов и микроконтроллеров. Это позволяет обрабатывать большой объём информации о работе оборудования, быстро выявлять причины неисправностей, поддерживать оптимальные режимы функционирования, синхронизированные с другими элементами производственной системы.

Автоматизированная конвейерная линия – это интегрированная система, в которой транспортирующие устройства управляются единым логическим контроллером. Такая организация обеспечивает выполнение блокировок, защит и запусков в заданной логике без участия человека.

Факторами, оказывающими наибольшее влияние на разработку систем управления для таких линий, являются: разнообразие конфигураций конвейерных участков, различия в длине и структуре линий, специфика приводных механизмов, а также эксплуатационные параметры – производительность, динамика движения и особенности конструкции. В условиях современной промышленности это требует применения комплексных решений с учётом всех переменных.

Целью данной дипломной работы является модернизация электропривода ленточного конвейера цементного завода ТОО «Темирбетон».

Задачи дипломной работы:

- обзор теоретических основ функционирования ленточного конвейера;
- расчет параметров ленточного конвейера;
- модернизация электропривода;
- выбор преобразователя и электрооборудования;
- расчет структурной схемы электропривода;
- технико-экономический расчет.

электропривод. Постановка задания на проектирование

1.1 Виды конвейеров

Конвейерные системы классифицируются по различным признакам в зависимости от характера выполняемых задач, особенностей транспортируемого груза и конструктивных решений. По направлению движения объектов транспортировки конвейеры подразделяются на горизонтальные, наклонные и вертикальные, что позволяет применять их в различных условиях размещения и организации производственных потоков.

С точки зрения типа перемещаемого груза различают установки, предназначенные для транспортировки насыпных материалов и штучной продукции. Для каждой из этих категорий характерны свои требования к конструкции транспортирующих элементов и тяговых механизмов.

По функциональному назначению конвейеры могут выполнять исключительно транспортировочную функцию либо участвовать в сборочных операциях, интегрируясь в автоматизированные производственные линии. Размещение самой системы также служит критерием классификации: различают напольные и подвесные конструкции, каждая из которых применяется в зависимости от архитектуры производственных помещений и логистики перемещения.

Важным критерием является тип тягового органа. Здесь можно выделить ленточные, цепные и канатные конвейеры, в которых движение осуществляется за счёт непрерывного замкнутого тягового элемента. Наряду с этим существуют безтяговые системы, работающие на принципах гравитационного скатывания, инерционного перемещения либо винтового механического движения.

Конструктивные особенности грузонесущей части также служат основанием для дальнейшего деления: в зависимости от геометрии и формы транспортирующих элементов выделяют гладкие, профилированные, карманные, пластинчатые, люлечные, скребковые и ковшовые модификации. Каждая из этих конструкций оптимизирована под конкретный тип груза и условия эксплуатации – от порошкообразных материалов до крупногабаритных деталей [2].

Таким образом, многообразие конвейерных систем позволяет гибко адаптировать производственные процессы под задачи любого уровня сложности, обеспечивая высокую производительность, автоматизацию и снижение трудозатрат.

1.2 Конструкция различных видов конвейеров

Винтовой (или шнековый) тип конвейера представляет собой устройство, в котором в жёлобе установлен винт архимедового типа, вращение которого позволяет транспортировать сыпучие материалы. Конвейер канатного типа

включает в себя жёлоб и закреплённый внутри него проволочный или кольцевой канат, к которому прикреплены металлические диски. Эти диски обеспечивают поступательное движение слабонасыпных материалов, таких как уголь, вдоль жёлоба.

Качающийся конвейер используется для транспортировки мелкогазмерных гаегаей, которые могут катиться или скользить по наклонной, колеблющейся поверхности. Ковшовые устройства перемещают материалы с помощью прикрепленных ковшей, ось которых проходит через их центр тяжести. Такая конструкция позволяет ковшам свободно качаться. Для перемещения сыпучих материалов, например, угля или щебня, ковша размещаются с перекрытием и без зазоров, в отличие от устройств, использующих самотечную разгрузку, аналогично нориям.

Пластинчатый тип транспортирующего устройства базируется на принципе использования жёстких пластин, соединённых между собой двумя параллельными цепями. Такие конструкции, как правило, изготавливаются из нержавеющей сплавов или износостойкого пластика, и применяются в технологических линиях с повышенными требованиями к надёжности.

Скребковый конвейер предназначен для транспортировки сыпучих материалов, перемещение которых обеспечивается за счёт скребков, закреплённых на тяговой цепи. Выгрузка может осуществляться как в конце магистрали, так и через специальные окна в жёлобе.

Тележечные и шаговые типы транспортных систем применяются в сборочных или сварочных потоках. При этом использование монтажных платформ на тележках позволяет размещать необходимую оснастку для различных производственных операций [3, 4].

Ленточные конвейеры широко применяются для перемещения сыпучих масс на агломерационных фабриках, в доменных и энергетических цехах металлургических предприятий, а также на тепловых электростанциях (см. рисунок 1.1). Между натяжной (1) и приводной (6) станциями расположена гибкая лента (5), натянутая с помощью регулируемого барабана (2). Ось этого барабана может перемещаться в направляющих (12), создавая предварительное натяжение от груза (13), что исключает проскальзывание при передаче тягового усилия от приводной станции.

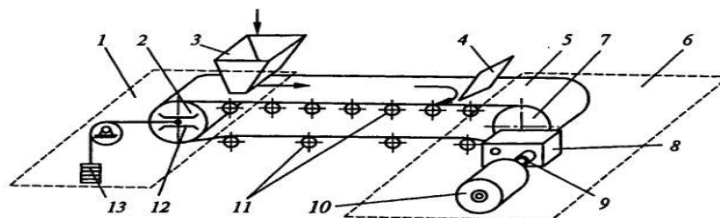


Рисунок 1.1 - Ленточный конвейер

Во избежание провисания верхней (рабочей) и нижней (холостой) ветвей

транспортирующей ленты вдоль всей трассы конвейера монтируются поддерживающие роликовые опоры (поз. 11). Приводной барабан соединяется с электродвигателем (поз. 10) через редуктор (поз. 8), что обеспечивает передачу крутящего момента.

Для смягчения динамических нагрузок, возникающих в моменты пуска и остановки механизма, вал электродвигателя и вал редуктора соединяются при помощи эластичной муфты (поз. 9), что позволяет гасить ударные колебания. Транспортируемый материал поступает на движущуюся ленту через загрузочную воронку (поз. 3), а разгрузка осуществляется посредством специального направляющего устройства – отводящего плужка (поз. 4).

Длина ленточного конвейера может достигать 2–3 км при скорости движения ленты в пределах 1,5–3 м/с и ширине полотна до 2 метров. При таких параметрах обеспечивается производительность до 700 тонн в час. Ленточные конвейеры, как правило, используются для горизонтальной транспортировки сыпучих грузов. При необходимости перемещения по наклонной поверхности с углом более 20°, когда существует высокий риск соскальзывания материала, применяются ленточные скребковые конвейеры.

В тех случаях, когда транспортировка касается перемещения людей, применяется особый тип конвейеров – эскалаторы. Их тяговый элемент представляет собой замкнутую цепь с закреплёнными на ней ступенями, проходящей через звездочки приводной и натяжной станций.

На предприятиях машиностроения и автомобилестроения распространены подвесные конвейеры, включающие грузозахватные элементы, соединённые с роликами, передвигающимися по монорельсу. Передача тягового усилия осуществляется от электродвигателя через цепную передачу и звездочку приводной станции. Одной из разновидностей подвесных систем является канатная дорога, используемая как для грузовых, так и пассажирских перевозок. Здесь роль направляющего рельса выполняет канат, закреплённый на опорах, а тяговое усилие передаётся посредством дополнительного каната, соединённого с приводной и натяжной станциями.

В промышленных производствах нередко задействуются группы конвейеров, объединённые в единую поточно-транспортную систему (ПТС), обслуживающую единый технологический процесс, например, этапы подготовки шихты в металлургии (см. рисунок 1.2). В таких системах возможно формирование как параллельных линий (конвейеры 2 и 3, 6 и 7, 9 и 10), так и последовательных цепочек (5, 4, 1). Для сохранения согласованности технологического процесса крайне важно обеспечить синхронизацию работы всех приводов.

Во избежание технологических нарушений при запуске или остановке ПТС необходимо соблюдать определённую последовательность включения и отключения двигателей. Так, согласно схеме на рисунке 1.2, а, запуск должен происходить в следующем порядке: сначала М1, затем М4, М8, М2, М3, М5, М9, М10, М6, М7. Обратная последовательность отключения обеспечивает предотвращение завалов и позволяет сохранить равномерное распределение

компонентов внутри системы: M3, M5, M2, M4, M9, M10, M8, M6, M7, M1.

Для транспортировки на значительные расстояния применяются поточно-транспортные системы с последовательным расположением конвейеров, как показано на рисунке 1.2, б).

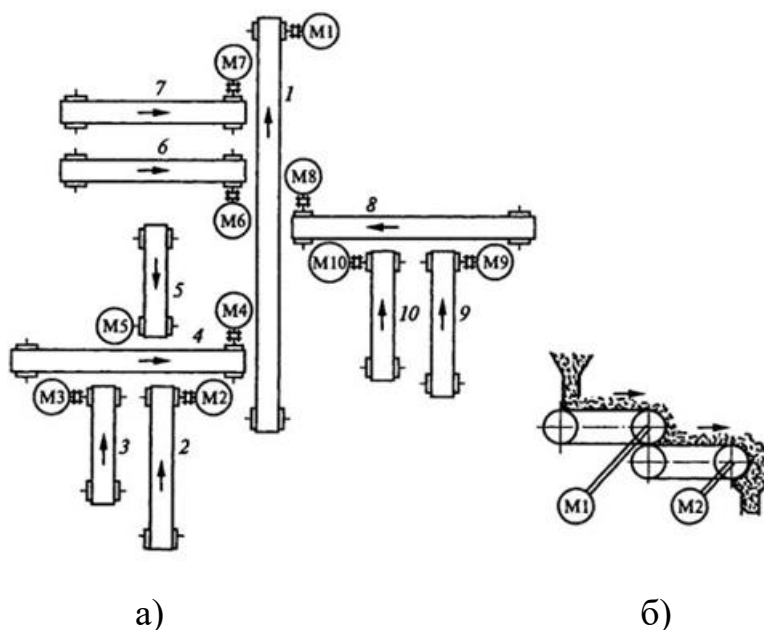


Рисунок 1.2 - Технологический процесс смешивания сырьевых компонентов в металлургическом производстве

Эксплуатация конвейерных систем может осуществляться в различных производственных условиях, включая экстремальные. В частности, оборудование нередко используется на открытых участках, в том числе в районах, расположенных на высоте более 1000 метров над уровнем моря (например, в горнодобывающей промышленности и на высокогорных канатных линиях). Также конвейеры могут применяться в помещениях с агрессивной средой, характеризующейся повышенной влажностью, загрязнённостью, наличием химически активных веществ и высокой температурой воздуха, как, например, в покрасочных, сушильных и термических участках.

Такие условия эксплуатации предъявляют повышенные требования к комплектации электрооборудования, включая типы и модели установленных механизмов. Оно должно обеспечивать высокий уровень надёжности, энергоэффективности и безопасности. Особенно это касается приводных электродвигателей, которые должны быть защищены от внешних воздействий (выполнены в герметичном корпусе) и иметь высокий пусковой момент.

Режим работы электроприводов конвейеров, как правило, непрерывный с редкими запусками и остановками. Регулирование скорости привода допускается в пределах не более 1:2 или 1:3 [2].

1.3 Примеры выполнения электропривода конвейеров

Существуют такие механизмы, в конструкцию которых входит два и более электродвигателя, работа которых требует синхронного вращения с одинаковыми угловыми скоростями. К примеру, это характерно для поворотных устройств башенных кранов, механизмов разводных мостов, заслонок шлюзов или конвейерных систем, где необходимо синхронизировать вращение двигателей, при этом их прямое механическое соединение посредством вала невозможно. В подобных ситуациях реализуется управление на основе так называемой электрической связи между роторами, известной как «электрический вал» [8].

Для таких целей применяются специальные схемные решения, основанные на принципе электрического вала. Один из примеров реализации подобной схемы с применением вспомогательного асинхронного двигателя представлен на рисунке 1.3.

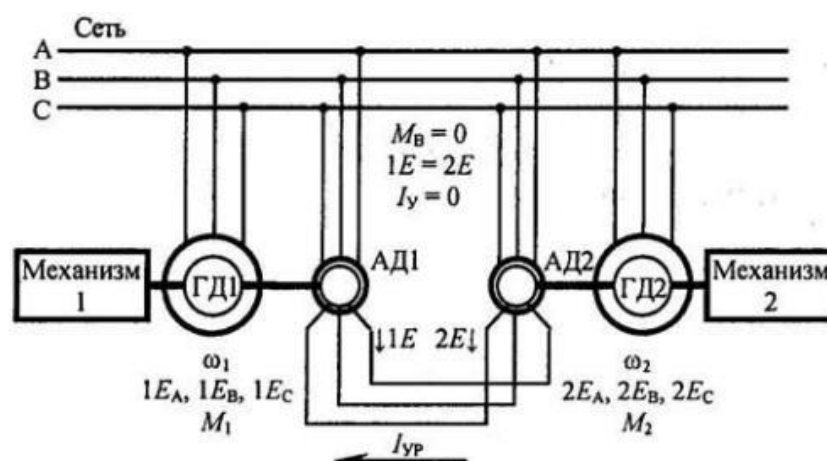


Рисунок 1.3 - Схема синхронизации вращения с применением вспомогательного асинхронного двигателя

В состав приводной цепи входят два главных электродвигателя (ГД1 и ГД2), предназначенные для приведения в движение соответственно механизмов 1 и 2. Оба двигателя характеризуются сходными электромеханическими параметрами. На валах ГД1 и ГД2 дополнительно установлены вспомогательные асинхронные электродвигатели (АД1 и АД2), между роторами которых предусмотрена электрическая связь. Мощность данных вспомогательных машин значительно ниже мощности основных двигателей, что позволяет использовать их преимущественно для согласования работы приводов.

Статорные обмотки главных двигателей подключаются к питающей сети с прямым чередованием фаз, тогда как у вспомогательных АД применяется противоположная последовательность. В случае неравномерного распределения нагрузки между механизмами возникает различие в скоростях вращения ω_1 и ω_2 . Это приводит к появлению ЭДС в роторной цепи, вызывающей выравнивающие

токи, которые, в свою очередь, создают уравнивающие моменты M_1 и M_2 , стремящиеся устранить возникшее расхождение в скоростях (в соответствии с законом Ленца).

Подобная схема обеспечивает высокую точность согласования приводов и характеризуется высокой устойчивостью и жесткой механической характеристикой. Вариант реализации схемы электрической связи между двигателями с включением резистивных элементов приведён на рисунке 1.4.

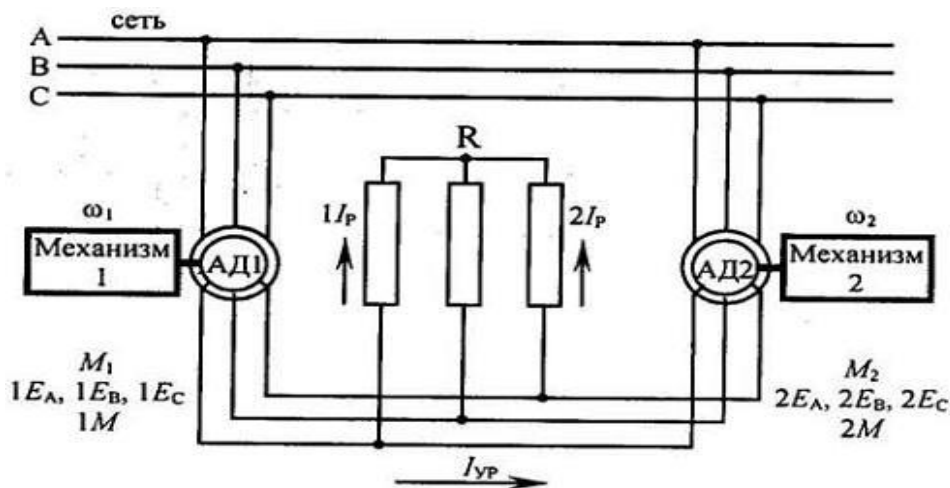


Рисунок 1.4 - Схема согласования электродвигателей через резистивную электрическую связь

Конструктивно данная схема включает в себя два асинхронных электродвигателя с фазными роторами (АД1 и АД2), а также резистивный элемент (R), подключённый в цепь. По принципу действия она аналогична схеме, использующей вспомогательные двигатели, но отличается по ряду характеристик.

К числу недостатков данной топологии, по сравнению с предыдущим вариантом, относится сниженная энергетическая эффективность. Это объясняется тем, что уравнивающие моменты (M_1 и M_2), создаваемые за счёт резистора, значительно меньше, а включение резистора в цепь ротора уменьшает жёсткость вольт-амперной характеристики, одновременно повышая уровень потерь электрической энергии.

Тем не менее, схема обладает определёнными преимуществами. За счёт отсутствия дополнительного вспомогательного электропривода она становится конструктивно проще, имеет меньшую стоимость и габаритные размеры.

Решение с двойным питанием, как вариант реализации принципа электрического вала, представлено на рисунке 1.5.

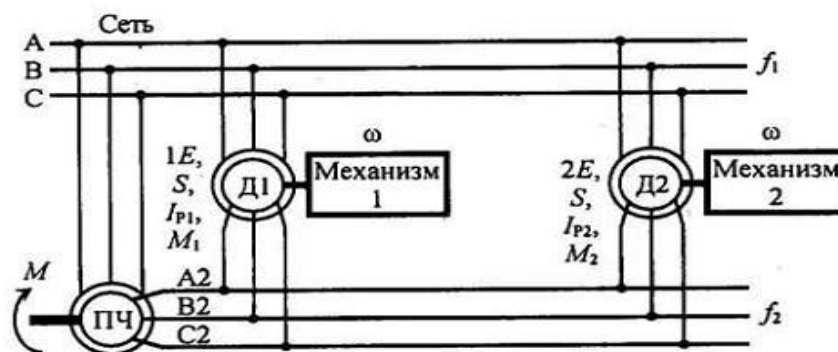


Рисунок 1.5 - Схема синхронизации на базе электродвигателей с независимыми источниками питания

В состав схемы входят два асинхронных электродвигателя с фазным ротором (Д1 и Д2), а также преобразователь частоты (ПЧ). Обмотки статора ПЧ, Д1 и Д2 подключаются к питающей сети, в то время как роторные цепи электродвигателей находятся во взаимном электрическом взаимодействии.

При вращении преобразователя частоты частота напряжения в роторных обмотках будет пропорциональна величине скольжения, обеспечивая тем самым одинаковую скорость вращения всех машин, равную заданной синхронной скорости.

$$\omega = \frac{2\pi}{p}(f_1 - f_2) \quad (1.1)$$

Это действительно при одинаковых нагрузках на механизмах.

Учитывая возможное увеличение нагрузки на один из приводимых механизмов (например, первый), величина скольжения возрастает, что приводит к снижению скорости вращения. При этом в роторе двигателя Д1 возникает увеличение ЭДС, провоцирующее рост тока ротора и, соответственно, возрастание электромагнитного момента. Такая обратная связь обеспечивает восстановление системы в исходное сбалансированное состояние с согласованной работой агрегатов.

Для расширения диапазона рабочих скоростей механизмов может быть предусмотрено применение устройств регулирования частоты, таких как механические вариаторы, которые позволяют выбрать необходимую согласованную скорость без изменения оборотов асинхронных двигателей.

Описанные электрические схемы синхронного управления приводами могут быть применены к различному количеству механизмов, работающих в согласованном режиме. При этом принцип функционирования схемы остаётся неизменным.

Наиболее эффективным решением в вопросах управления скоростью электроприводов считается система, основанная на применении асинхронных двигателей с частотными преобразователями (ППЧ-АД), поскольку она

демонстрирует наилучшее соотношение экономичности и производительности в сравнении с альтернативными методами регулирования.

Частотный преобразователь представляет собой устройство, состоящее из выпрямительного моста, преобразующего переменное напряжение промышленной частоты в постоянное, и инвертора (часто с ШИМ-модуляцией), преобразующего это постоянное напряжение в переменное требуемой частоты и амплитуды. Используемые на выходе GTO- или IGBT-компоненты обеспечивают необходимую мощность для питания двигателя. Для уменьшения перегрузок преобразователя на длинных фидерах устанавливаются дроссели, а для снижения электромагнитных помех применяются ЕМС-фильтры.

При скалярном управлении в фазах двигателя возникают гармонические токи. Векторное управление представляет собой более продвинутый метод регулирования асинхронных и синхронных двигателей, позволяющий формировать токи и напряжения с необходимыми характеристиками, а также управлять магнитным потоком ротора и создаваемым на валу моментом.

В системах с непосредственной связью, преобразователь частоты действует как управляемый выпрямитель. Система управления открывает тиристоры, подключая обмотки статора, формируя на выходе напряжение, изменяемое по принципу отсечения части синусоиды. В таких системах выходная частота ограничена диапазоном 0–30 Гц, что не позволяет их использование в современных широкодиапазонных приводах.

Промежуточное звено постоянного тока в преобразователе частоты позволяет избежать недостатков прямой связи. Энергия преобразуется сначала в постоянное напряжение, затем инвертируется обратно в переменное с нужными параметрами. Такой двойной процесс несколько снижает КПД и ухудшает массо-габаритные показатели по сравнению с системами прямой связи, но обеспечивает высокую стабильность и качество регулирования.



Рисунок 1.6 - Привод с частотным регулированием для конвейерной установки

Увеличение протяжённости и эксплуатационных возможностей конвейерных установок приводит к росту необходимой мощности электроприводов. В таких условиях применение промежуточных муфт (гидродинамических, электромагнитных и др.) становится неэффективным как в техническом, так и в экономическом плане. По этой причине в качестве привода для подобных транспортных систем целесообразно использование асинхронных электродвигателей с фазным ротором. Повышение пускового момента в таких системах достигается посредством включения дополнительных резисторов в роторную цепь, а плавность пуска обеспечивается за счёт многоступенчатого регулирования (до 24 ступеней включительно).

Продолжительное время пуска не оказывает существенного влияния на производительность установки, однако позволяет снизить величину динамического момента, уменьшая тем самым нагрузку на тяговый орган и увеличивая его эксплуатационный ресурс. Для обеспечения полной загрузки конвейерных систем при неравномерном поступлении материала необходимо регулирование скорости движения ленты. Поддержание стабильной нагрузки обеспечивает постоянное сопротивление транспортировке, а следовательно – стабильную мощность на валу электродвигателя.

Таким образом, приводы должны обеспечивать управление скоростью движения при постоянной нагрузке, вне зависимости от диапазона регулирования. Одновременно со снижением скорости транспортировки, вызванным уменьшением производительности добывающего оборудования, увеличивается срок службы механических элементов, особенно ленты. Это связано с уменьшением частоты изгибов на барабанах, что снижает её износ. Стоимость ленты составляет от 40 до 75 % всей стоимости конвейерной установки, в зависимости от длины транспортной линии, что подчёркивает важность продления её службы.

Дополнительно снижается уровень износа механической части всего комплекса. В связи с этим, применение регулируемых приводов, в частности на базе частотных преобразователей, представляется наиболее обоснованным и эффективным решением при проектировании и эксплуатации ленточных конвейеров.

1.4 Расположение электроприводов на конвейерных линиях

При распространённом виде конвейерной трассы со сложной структурой вычислить заранее однозначно оптимальное месторасположение привода не удастся. Поэтому рассматривают несколько вариантов расположения приводной станции.

При необходимости выбора исходят из следующих условия. Привод должен монтироваться в конце рабочего участка, что помогает разгрузить затем дующую холостую ветвь конвейера от больших натяжений рабочего участка.

Если в конвейере есть несколько рабочих участков, то для рассмотрения выбирают самый тяжелый, на котором происходит максимальный рост натяжения, а также участок, предшествующий самой длинной холостой ветви. Устанавливая привод в конце самого тяжелого участка, можно существенно уменьшить максимальные натяжения на затем рабочих участках. Размещение привода перед самой длинной холостой ветвью ведет к снижению среднего по трассе натяжения. Для конвейеров, работающих на спуск грузов при тормозном режиме работы привода, затем устанавливается в начале рабочего участка по ходу тягового элемента.

Для значительной длины конвейерных линий и с большим количеством тяжелой работы площадь конвейерной линии, вероятно, потому, что даже лучшее место, чтобы остановиться на максимальной напряженности трек диска не снижается до приемлемого уровня. В таком случае конвейер односекционного исполнения заменяют многосекционным конвейером или на тяговом элементе монтируют несколько приводных станций. Отчего при необходимости уточнить места расположения приводов следует выполнить вычисления диаграммы натяжений с учетом сопротивлений на участках изгиба. Решение рассмотренной задачи часто корректируется по конструктивным соображениям.

По производственным условиям размещения конвейерной линии не всегда удастся расположить приводы в местах, определенных вычисления. Расположение приводов в середине участков нуждается установки дополнительных звездочек. Отчего обычно места расположения приводных станций заранее определяют по производственно-конструктивным соображениям и, обычно, увязывают с предусмотренными на трассе поворотными звездочками. Вычисления диаграммы натяжения при этом носит поверочный характер для определения максимального натяжения и выбора необходимого типа тягового элемента [6].

1.5 Статические и динамические параметры работы электропривода

Основным фактором, оказывающим влияние на величину статической нагрузки, приходящейся на приводную систему конвейера, выступает сила трения, возникающая между тяговым элементом (например, лентой или цепью) и опорными конструкциями (ролики, монорельсы, канаты и т. д.). Эти силы проявляются в подшипниковых узлах вращающихся деталей, на участках контакта роликов и направляющих, а также в точках изгиба тягового органа. Из-за протяжённости трассы и большого количества движущихся частей, суммарные потери на трение составляют значительную часть всей статической нагрузки, а для горизонтальных транспортёров именно они определяют общее сопротивление движению.

Масса и конструкция тягового устройства (определяемая передаваемым моментом) также существенно влияют на уровень статической нагрузки.

Поэтому при проектировании конвейерного оборудования расчет мощности электродвигателя осуществляется с учётом этих факторов.

При пуске возникают динамические нагрузки, которые обусловлены инерцией подвижных масс как самого конвейера, так и элементов приводной станции. В случае тяжёлых машин инерционные силы могут значительно превышать величину статического сопротивления, особенно если масса движущихся частей велика – в таких условиях доля этих сил может достигать 90 % от общего динамического воздействия [1].

Наличие упругих соединений в конструкции может вызывать колебательные процессы, которые в неблагоприятных условиях способствуют увеличению усилий, передаваемых на рабочее оборудование. Такие механические системы с распределёнными параметрами описываются дифференциальными уравнениями, решение которых в общем случае затруднено. Однако для анализа физической сути процессов достаточно применять упрощённые динамические модели с сосредоточенными параметрами, эквивалентно описывающие массу, упругость и прочность системы.

Колебательный режим при пуске вызывает скачки нагрузок на тяговые элементы. Эти колебания частично гасятся за счёт вязкого трения в подвижных узлах, особенно внутри самого тягового органа. По мере выхода на устойчивый режим вращения, соответствующий жёсткой механической характеристике двигателя, остаточные колебания эффективно подавляются самим приводом.

Для конвейеров характерны короткие подвески и высокие частоты свободных колебаний, что приводит к формированию нескольких периодов вибраций в течение плавного запуска. В некоторых случаях используется метод подавления раскачивания с помощью интерференции колебаний, направленных в противофазе.

Плавный пуск реализуется в два этапа: сначала подаётся половина требуемого пускового момента, а через половину периода собственных колебаний усилие доводится до номинального. Благодаря этому достигается суммирование средних ускорений и компенсация колебательных составляющих. Выход из пуска также производится ступенчато, что позволяет удерживать допустимые уровни ускорений без возбуждения вибраций [2,3].

Несмотря на многообразие типов конвейеров, для выбора электропривода их можно сгруппировать по основным признакам. Как правило, конвейеры не требуют широкого диапазона регулирования скорости, лишь малая часть нуждается в её изменении в пределах до 2:1. Приводы часто работают в тяжёлых условиях: в запылённой, влажной среде, при экстремальных температурах, на открытых площадках и в агрессивной атмосфере.

Характерной особенностью работы конвейера является высокий момент сопротивления при старте, нередко превышающий номинальный из-за загустевшей смазки или других факторов. Поэтому от электропривода требуется высокая надёжность, простота обслуживания и способность развивать значительный момент на старте. В ряде случаев необходима реализация

плавного разгона, предотвращение проскальзывания ленты, а также синхронная работа нескольких приводов.

Этим требованиям в полной мере удовлетворяют асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым или фазным ротором.

Выбор мощности двигателя осуществляется итерационным способом – сначала выполняется приближённая оценка на основе расчёта тягового усилия и напряжённости ленты, затем уточняются потери в зависимости от длины трассы. На заключительном этапе строятся характеристики привода и механической части в выбранных контрольных точках для анализа устойчивости и напряжённого состояния..

Для предварительного расчета тягового усилия и натяжения ленты применяются различные расчетные выражения, выведенные в результате анализа эксплуатационных данных и проектной практики. Ниже представлена одна из наиболее распространённых формул:

$$T = T_0 + F_n + \Delta F = T_0 + F \quad (1.2)$$

где T – натяжение конвейера, Н;

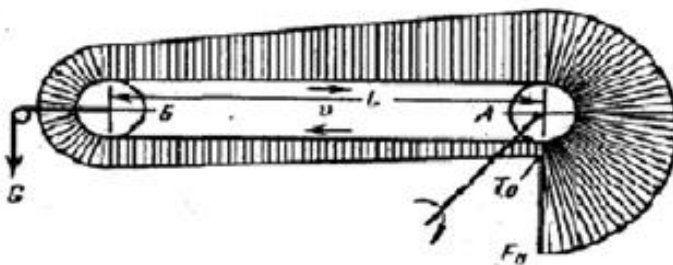
P – усилие, которое должен преодолевать электродвигатель, Н;

T_0 – предварительное натяжение, Н;

F_n – усилие, обусловленное подъемом груза, Н;

ΔF – суммарное усилие, вызванное силами трения на участках трассы конвейера, Н.

Исходя из расчётных значений тягового усилия и натяжения в рабочем элементе конвейера, осуществляется предварительный подбор электродвигателя и соответствующего механического оборудования. Формулы для определения потерь энергии в элементах системы – таких как барабаны, звёздочки, блоки и другие узлы – подробно изложены в специализированных источниках, посвящённых механике конвейерных установок.



а)



б)

а) – приводная станция; б) – натяжная станция.

Рисунок 1.7 - Диаграмма тяговых усилий в ленточном (а) и (б) конвейере

Для построения графика распределения тяговых усилий необходимо выполнить схематическое изображение трассы конвейера, включая все участки с подъёмами, спусками, перегибами, а также расположение приводных и натяжных станций, блоков направления и барабанов. Далее, начиная с участка, на который приходится наименьшая нагрузка, поэтапно учитываются потери в каждом конструктивном элементе. В результате этого анализа определяется распределение натяжения тягового элемента вдоль всей линии. На рисунке 1.7 приведены соответствующие диаграммы тяговых усилий для ленточного и цепного конвейеров, оснащённых однодвигательным электроприводом.

Мощность приводного двигателя конвейера определяется по формуле:

$$P = \frac{F_n + v}{N} * 10^{-3} \quad (1.3)$$

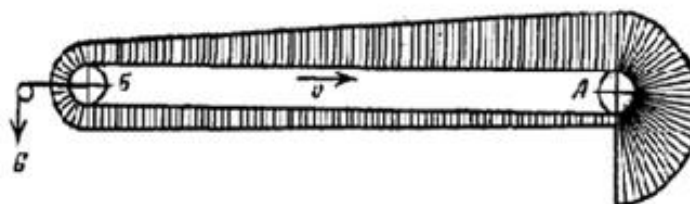
где P - мощность двигателя, кВт;

F_n - усилие на набегающем участке тягового органа, Н;

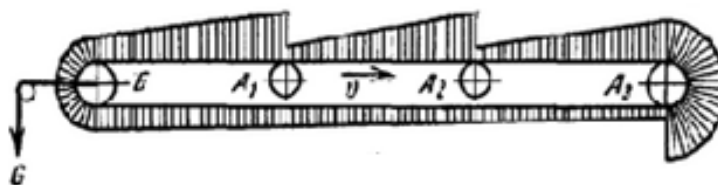
v - скорость перемещения тягового органа, м/с;

N - КПД приводного механизма.

При проектировании ленточных конвейеров затем построения диаграммы тяговых усилий определяется место установки приводной станции на трассе конвейера.



а)



б)

а) - при однодвигательном электроприводе; б) - при многодвигательном электроприводе

Рисунок 1.8 - Диаграмма тяговых усилий ленточного конвейера

Электропривод конвейеров значительной длины, таких как крупные поточно-транспортные системы, нецелесообразно реализовывать с применением одного электродвигателя. Это связано с тем, что в механических элементах, находящихся в непосредственной близости от приводной станции, возникают чрезмерные нагрузки. Перегрузка этих участков приводит к резкому увеличению габаритов механической части, в частности тягового органа. Чтобы избежать чрезмерного возрастания тяговых усилий, такие конвейеры оснащаются несколькими приводными станциями. При этом тяговое усилие, создаваемое на участке привода, пропорционально только сопротивлению одного сегмента, и нагрузка не распространяется на весь конвейер.

В системах с несколькими приводами, как, например, на ленточных конвейерах, оптимальное расположение приводных станций определяется по диаграмме тяговых усилий. Их размещение выбирается так, чтобы создаваемое каждым двигателем усилие приближалось к значению, характерному для одного привода (см. рисунок 1.8). Однако окончательный выбор мощности каждого электродвигателя требует построения уточнённых диаграмм усилий для всех ветвей. Это необходимо, поскольку общее усилие от всех приводов не может быть сосредоточено в одном месте без перераспределения напряжения в тяговом органе, что снижает потери на трение и повышает эффективность многоприводного электропривода.

Для мощных ленточных систем, где суммарная мощность электродвигателей достигает сотен киловатт, расстояние между приводными станциями, как правило, составляет около 100–200 м. Следует учитывать, что интеграция нескольких приводных узлов в конструкцию конвейера сопряжена с определёнными техническими трудностями, особенно при проектировании ленточных систем. Поэтому на практике такие станции чаще всего размещают на концах трассы. На некоторых предприятиях длина подобных конвейеров достигает 1000–1500 м.

Использование нескольких приводов обычно улучшает эксплуатационные характеристики системы по сравнению с одним двигателем. Например, при холостом запуске может работать только один мотор, а при возрастании нагрузки подключаются дополнительные. При снижении нагрузки часть двигателей может быть отключена. Такая последовательная активация снижает работу

двигателей в режиме низкой загрузки и повышает их общий ресурс. При возникновении завалов, увеличении сопротивления из-за затвердевшей смазки и т.п. допускается одновременный запуск всех двигателей для создания повышенного пускового момента.

Корректный выбор системы управления электроприводом требует точного расчёта упругих деформаций тягового органа и возможных ускорений в переходных режимах. На рисунке 1.9 показаны графики изменения скоростей при запуске на нагруженной и холостой ветвях ленты. Привод реализован на асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором при условии постоянного момента на его валу.

В случае запуска конвейеров большой протяжённости (сотни метров), движение холостой ветви может начаться лишь после того, как приводной двигатель достигнет установившейся скорости. На практике наблюдается запаздывание движения участков ленты, удалённых на 70–100 м от ведущей станции, даже при выходе двигателя на рабочую частоту.

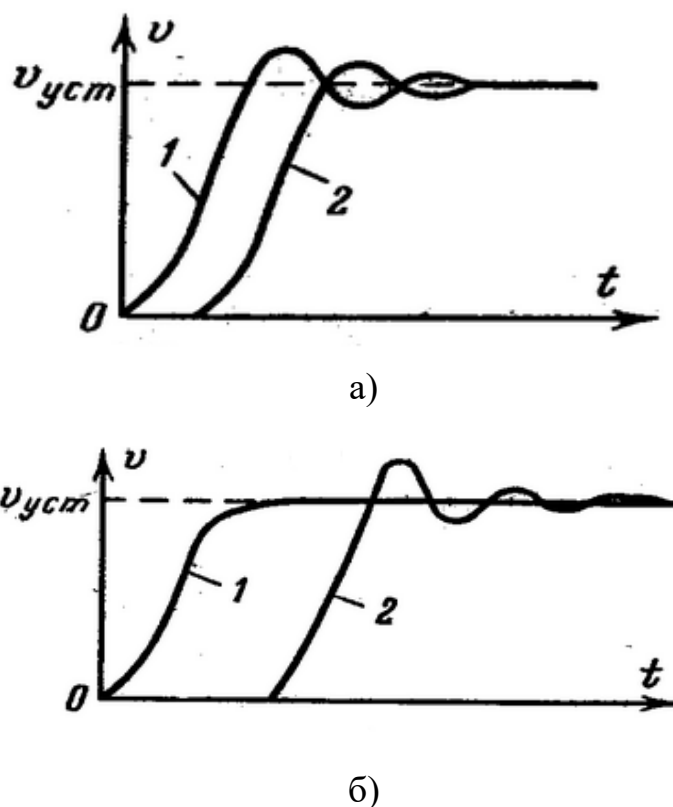


Рисунок 1.9 - Графики изменения скорости отдельных сегментов ленты в момент запуска конвейера

После достижения установившегося режима движения по всей длине конвейерной трассы, упругое натяжение ленты постепенно уменьшается. Это может привести к тому, что высвобождающаяся накопленная энергия вызовет увеличение скорости движения ленты по сравнению с её установившимся значением, а также приведёт к её колебаниям (см. рисунок 1.9, б). Подобные

переходные процессы в тяговом элементе крайне нежелательны, поскольку могут способствовать ускоренному износу ленты или, в отдельных случаях, её разрыву.

В связи с этим при проектировании систем электропривода ленточных конвейеров к режимам пуска и другим нестационарным процессам предъявляются жёсткие требования, ограничивающие ускорения системы. Соблюдение этих требований, как правило, влечёт за собой усложнение конструкции электропривода. В частности, это выражается в необходимости применения многоступенчатых панелей управления для асинхронных электродвигателей с фазным ротором, а также дополнительного пускового и нагрузочного оборудования.

Одним из наиболее простых решений для снижения ускорений при запуске является применение реостатного управления (см. рисунок 1.10, а). Переход между различными пусковыми характеристиками позволяет обеспечить плавное ускорение системы. Такой подход часто реализуется на ленточных конвейерах, однако он имеет недостаток в виде значительного увеличения габаритных размеров панелей управления и пусковых реостатов.

В ряде случаев более рациональным методом ограничения ускорения системы электропривода является создание дополнительного тормозного момента на валу двигателя во время запуска. Это достигается посредством искусственного увеличения момента сопротивления, что позволяет снизить динамический момент в системе (см. рисунок 1.10, б). Анализ представленных графиков показывает, что торможение на этапе пуска эффективно уменьшает ускорение системы, благодаря чему снижаются колебания скорости в участках натяжения ленты – как на набегающей, так и на сбегаящей ветвях. После завершения пускового этапа источник дополнительного тормозного момента должен быть отключён от вала электродвигателя.

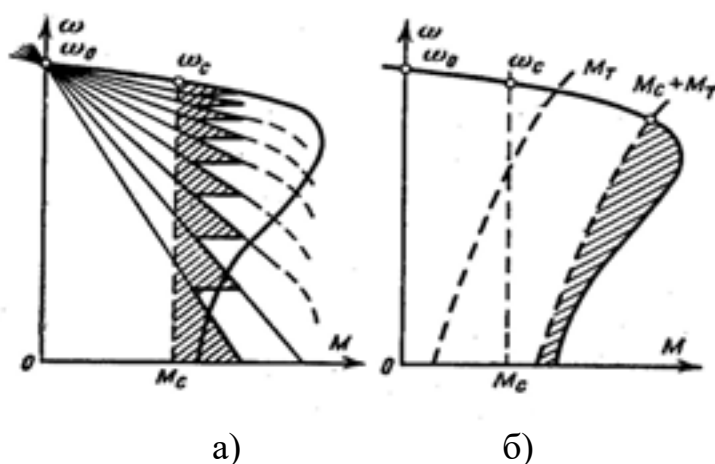


Рисунок 1.10 - Методы пуска ленточных конвейеров

Следует отметить, что ограничение ускорений в системе электропривода может быть достигнуто при использовании сразу нескольких методов.

Например, реостатный способ пуска может быть совмещён с подключением источника дополнительного тормозного момента. Подобный комбинированный подход находит применение на длинных односекционных ленточных конвейерах, где стоимость ленты составляет значительную часть общих капитальных вложений в установку.

Реализация плавного пуска с искусственным созданием нагрузочного момента на валу двигателя, как правило, осуществляется за счёт применения колодочных тормозов с электрическим или гидравлическим управлением, подключения к валу индукционных либо фрикционных муфт, а также использования дополнительных тормозных машин и других аналогичных устройств. В некоторых случаях системы реостатного регулирования асинхронных электродвигателей дополняются тиристорными или дроссельными регуляторами напряжения в цепи статора, что позволяет более точно контролировать режимы пуска.

Электропривод должен обеспечивать необходимую величину тягового усилия, достаточного для преодоления сопротивления движению конвейера. Если принять, к примеру, что в системе используются три приводные станции, и каждая из них должна создавать одинаковое тяговое усилие, тогда электродвигатели целесообразно размещать в точке 0 и на участках, отстоящих от неё на расстояния 0–1 и 0–2 (см. рисунок 1.11). При условии, что механические характеристики всех двигателей идентичны, каждый из них будет развивать примерно равное тяговое усилие, численно выражаемое как $(F_{\text{п}} - T_0)/3$.

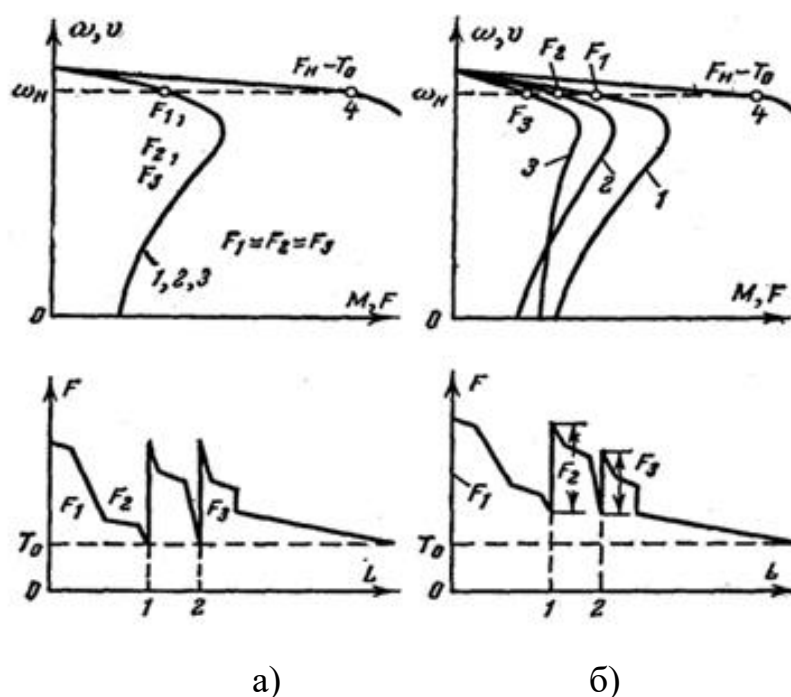


Рисунок 1.11 - Диаграммы нагрузки на тяговый элемент цепного конвейера

Применение многоприводных систем на цепных конвейерах способствует значительному снижению нагрузки на тяговый элемент, что, в свою очередь, позволяет использовать более лёгкие конструкции механических компонентов. Количество приводных станций на конвейере подбирается на основании технико-экономического анализа различных вариантов, при котором одновременно учитываются как затраты на электропривод, так и стоимость механического оборудования.

Если параметры электродвигателей в системе немного различаются, то создаваемое каждым из них тяговое усилие также может отличаться от расчетного. На рисунке 1.11, а приведены механические характеристики трёх электродвигателей одинаковой мощности и идентичных параметров. В то же время на рисунке 1.11, б представлены характеристики двигателей с различными параметрами. Реальные тяговые усилия, развиваемые каждым приводом, определяются на основе совокупной характеристики всех машин, так как они механически объединены через жёсткий ротор и кинематически связаны посредством согласующей цепи передачи. При этом учитываются суммарная сила $P-T_0$ и соответствующая скорость системы.

Тяговое усилие, развиваемое каждым электродвигателем, может быть определено графическим способом – проведением горизонтальной линии, соответствующей номинальной скорости, через характеристики всех машин (1, 2, 3 и 4).

На рисунках 1.12, а и б представлены не только механические характеристики двигателей, но и диаграммы тяговых усилий. В случае различий в характеристиках приводов в тяговом элементе может возникать дополнительное натяжение, вызванное неодинаковыми значениями тяговых сил, развиваемых разными электродвигателями, работающими на одном конвейере.

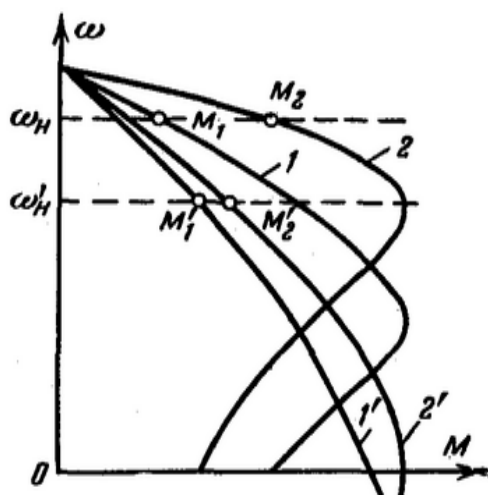


Рисунок 1.12 - Разделение тяговых усилий между приводами конвейера с неодинаковой жёсткостью характеристик двигателей

При выборе двигателей приводных станций конвейера следует проверять их характеристики и по возможности добиваться полного их совпадения. Исходя из этих условий, целесообразно применять асинхронные двигатели с фазным ротором, где соответствие характеристик может быть получено введением дополнительных сопротивлений в роторную цепь.

1.6 Основные требования, предъявляемые к электроприводу конвейерного транспорта и постановка задания на проектирование

В различных сферах промышленности активно применяется централизованное автоматизированное управление пуском и остановкой конвейерных линий, обеспечивающее надёжную защиту от аварийных ситуаций. В основу построения централизованных систем заложен принцип автоматического последовательного включения конвейеров в направлении, противоположном движению грузопотока. Управление осуществляется с контролем пускового момента каждого механизма, с учетом скорости предыдущего, а остановка всей линии – с синхронным отключением вышедшего из строя конвейера и всех, подающих груз на него.

Перспективным направлением дальнейшего развития автоматизации таких систем является повышение уровня централизации управления за счёт применения специализированных вычислительных комплексов и микропроцессорной техники. Это решение позволяет оперативно обрабатывать большие объёмы информации, касающейся текущего состояния оборудования, причин сбоев, а также настраивать работу всей линии в оптимальных режимах, синхронизированных с производственными участками, например, с очистными забоями или другими источниками поступления груза.

Модернизация конвейерного транспорта включает оснащение каждого конвейера средствами автоматического контроля, защиты, а также организацию управления как отдельными установками, так и всей системой в целом.

Автоматизированной конвейерной линией называют такую систему, в которой все транспортные механизмы объединены общей системой управления, отвечающей за реализацию алгоритмов пуска и останова, а также за соблюдение необходимых блокировок и защитных функций.

На уровень автоматизации конвейерных комплексов влияют ряд факторов, среди которых: число технологических конфигураций, протяжённость линии, ветвление по технологическим направлениям, параметры оборудования, его производительность, тип и длина конвейеров, а также их динамические особенности. Кроме того, существенное значение имеет количество и тип приводных устройств, подключаемых к двигателям.

Современные автоматизированные системы конвейерных линий должны обладать следующими функциональными возможностями:

- централизованное управление всей линией с пульта оператора;
- автоматический запуск конвейеров по направлению, противоположному

движению груза, с помощью пусковых устройств;

- возможность выбора и отдельного запуска любого маршрута в разветвлённой линии;
- автоматическая подача звукового сигнала предупреждения перед включением всей линии;
- подача предупредительного звукового сигнала только по активируемому маршруту при запуске отдельных ветвей;
- реализация частичного запуска линии при работающих остальных участках.

Во время пуска, а также при снижении скорости движения ленты или тяговой цепи до 75 % от номинального значения, особенно в случае неисправности приводной части конвейера, могут возникнуть критические условия. К ним относятся перегрев редукторов и приводных барабанов, повышение температуры масла в турбомуфтах, уход ленты в сторону, засорение перегрузочных узлов, а также сбои в работе цепей управления и контроля. Для предотвращения таких ситуаций системы автоматизации должны обеспечивать:

- включение тормозных устройств при аварийном или экстренном отключении ленточного конвейера допускается только в случае, если скорость ленты ниже 0,5 м/с;
- при наличии автоматической станции натяжения – включение её в режим усиленного натяжения, если скорость ленты падает до 75 % от номинального значения;
- немедленное отключение конвейера с активацией тормозов в момент его отключения, при разрыве ленты или цепи, аварийном останове на любом участке трассы, при засорении узлов перегрузки и при превышении скорости на 8 % от нормы (для конвейеров, установленных на наклонных участках выработок);
- одновременное автоматическое выключение всех конвейеров, подающих материал на остановившийся агрегат;
- прекращение работы системы орошения при остановке транспортного оборудования;
- блокировку повторного включения остановленного по аварийной причине конвейера без ручного возврата защитной схемы в исходное положение;
- блокирующее устройство, препятствующее передаче грузов в разгрузочном пункте при неготовности участка к приёму;
- возможность перехода к местному управлению на отдельных участках энергоснабжения, без нарушения функционирования автоматической системы всей конвейерной линии;
- подачу управляющих сигналов на маршруты конвейеров с использованием дистанционного управления;
- индикацию неисправных участков и передачу данных о сбое в соответствующий управляющий блок;
- двустороннюю звуковую телефонную связь с системой адресного вызова;
- передачу информации о текущем состоянии всей конвейерной линии в

оперативную диспетчерскую службу шахтного управления.

Для обеспечения перевозки людей при помощи конвейерных установок предъявляются дополнительные требования к системам безопасности. В частности, должна быть реализована подача предупредительного звукового сигнала при сходе людей с ленты, а также снижение скорости конвейера в зонах посадки. В случае аварийной остановки предусмотрено экстренное торможение с ограничением ускорения. Работа конвейера блокируется при отсутствии или неисправности аварийного отключающего устройства. Повторное включение возможно только после ручного возврата системы защиты в исходное положение. Также запрещается подача груза на стоящий конвейер, автоматически отключается система пылеподавления, а движение площадок схода подлежит постоянному контролю.

В настоящее время в промышленности для управления конвейерными линиями используются как отдельные устройства контроля технологических параметров, так и интегрированные системы автоматизации. Для реализации требований, предъявляемых к автоматизации пассажирских транспортных систем (ПТС), разработан ряд специализированных датчиков и устройств [7].

Автоматизированные электроприводы, устанавливаемые на конвейерные установки, должны соответствовать условиям эксплуатации и обеспечивать:

- стабильную работу в продолжительном режиме без перерывов;
- ограниченное число включений и фиксированное направление вращения;
- уверенный запуск под нагрузкой, в том числе после экстренной остановки;
- устойчивость к внешним воздействиям, включая перепады температур, агрессивную среду и пыльность;
- высокий пусковой момент (отношение $M_{п}/M_{ном}$ в пределах 1,6–1,8);
- плавный пуск и торможение для предотвращения пробуксовки ленты и раскачивания груза на подвесных участках;
- возможность регулирования скорости в диапазоне до 1:2, что важно при адаптации темпа работы в поточных линиях;
- синхронную работу нескольких электроприводов при необходимости объединения нескольких конвейеров в одну систему.

В системах привода конвейеров применяются асинхронные электродвигатели (АД) с короткозамкнутым ротором, обладающие повышенным пусковым моментом. Такие двигатели могут быть как односкоростными, так и многоскоростными, в последнем случае переключение осуществляется за счёт изменения числа пар полюсов.

Примечание: для изменения скорости вращения привода с одним электродвигателем дополнительно могут применяться механические вариаторы, а также регулируемые электрические или гидравлические муфты.

Асинхронные двигатели с фазным ротором находят применение в следующих случаях:

- при необходимости получения повышенного пускового момента;

- в многомоторных приводах конвейеров, где требуется уравнивание нагрузки между различными двигателями;
- в системах, обеспечивающих согласованное движение нескольких конвейерных участков.

На длинных конвейерных трассах, использующих несколько моторных приводов, широкое распространение получили схемы с распределением привода по длине линии. Это позволяет избежать избыточных нагрузок на механизмы в наиболее загруженных зонах и уменьшает как габариты, так и тяговые усилия.

Тяговый орган в таких системах воспринимает внешние сопротивления, возникающие на каждом диске приводной станции, и передаёт их пропорционально по участкам. Однако такое распределение не охватывает всю конвейерную трассу равномерно, и для повышения эффективности выбираются участки установки приводных станций на основе анализа диаграммы изменения натяжных усилий вдоль трассы.

Оптимальное количество приводных станций подбирается по результатам технико-экономических расчётов.

При использовании АД с короткозамкнутыми роторами необходимо, чтобы их параметры были одинаковыми, что обеспечивает синхронную работу. В случае применения двигателей с фазными роторами согласование их характеристик достигается путём введения дополнительных резисторов в цепь ротора, позволяющих выровнять нагрузочные характеристики между приводами.

2 Модернизация электропривода конвейера. Вычисления модернизированного ленточного конвейера

Предприятие предоставило техническое задание на модернизацию ленточного конвейера, расположенного на цементном заводе, где конвейерная линия используется для транспортировки сырьевых материалов, таких как

известняк и глина, была произведена расчётная проверка ленточного конвейера, обеспечивающего подачу сырья к технологическому оборудованию.

Производительность конвейера:

$$Q = \frac{Q_{mp}}{\gamma} \quad (2.1)$$

где Q_{mp} - требуемая производительность, $Q_{mp}=1000$ (т/час) - по данным предприятия;

γ - плотность сырья, $\gamma=2,15$ (т/м³) - по данным предприятия.

$$Q = \frac{1000}{2,15} = 465,1 \text{ , (м}^3\text{/час)} \quad (2.2)$$

Ширина ленты:

$B=1000$ (мм) = 1,0 (м)

$C=1$ - поправочный коэффициент, учитывающий угол наклона конвейера, при угле наклона $\beta =0^\circ$.

$\vartheta=2$ (м/с) - скорость транспортирования - по данным предприятия.

Весовые характеристики.

Линейная сила тяжести груза:

$$q = \frac{g \times Q_{mp}}{3,6 \times \vartheta} \quad (2.3)$$

где g – ускорение свободного падения, $g=9,81$ (м/с²);

Q_{mp} - требуемая производительность, $Q_{mp}=1000$ (т/час);

ϑ - скорость транспортирования, $\vartheta=2$ (м/с).

$$q = \frac{9,81 \times 1000}{3,6 \times 2} = 1362,5 \text{ , (Н/м)} \quad (2.4)$$

Линейная сила тяжести ленты типа РТЛ-1500 массой 29 (кг/м²) при ширине 1,0 (м) определяется:

$$q'_l = g * m * B \quad (2.5)$$

где m - масса 1 (м²) ленты, $m=29$ (кг/м²) [10].

$$q'_l = 9,81 \times 29 \times 1,0 = 284,49 \text{ (Н/м)}$$

Линейная сила тяжести вращающихся частей роликов грузовой ветви:

$$q_p' = \frac{G_p' \cdot g}{l'} \quad (2.6)$$

где G_p' - масса ролика в тяжелом исполнении для 3х роликовой опоры,

$G_p' = 50$ (кг) [10];

l' - расстояние между роlikоопорами на грузовой ветви, $l' = 1100$ (мм) = 1,1 (м) [10].

$$q_p' = \frac{50 \cdot 9,81}{1,1} = 445,9 \text{ (Н/м)} \quad (2.7)$$

Линейная сила тяжести вращающихся частей роликов порожняковой ветви:

$$q_p'' = \frac{G_p'' \cdot g}{l''} \quad (2.8)$$

где G_p'' - масса ролика для однораликовой опоры, $G_p'' = 21,5$ (кг) [10];

l'' - расстояние между роlikоопорами порожняковой ветви, увязывая с длиной секции конвейера и величиной l' , принимаем $l'' = 3$ (м).

$$q_p'' = \frac{21,5 \cdot 9,81}{3} = 70,31 \text{ (Н/м)} \quad (2.9)$$

Сопротивление движению ленты складывается из суммы распределенных (линейных) и сосредоточенных (местных) сопротивлений, возникающих по длине конвейера. Сопротивление определяется затем по ходу движения ленты, начиная с точки сбегания ленты с приводного барабана.

Сила сопротивления движению грузовой ветви:

$$W_{cp} = (q + q' + q q^{l''}) \cdot L \cdot \omega \quad (2.10)$$

где ω - удельный коэффициент сопротивления движению по роlikоопорам.

ω зависит от частоты их установки, состояния подшипниковых узлов роликов, упруговязких свойств конвейерной ленты, физико-механических свойств транспортируемого груза, скорости движения, температуры окружающей среды и многих других факторов, $\omega = 0,032$.

$$W_{cp} = (1362,5 + 284,49 + 445,9) \cdot 400 \cdot 0,032 = 26788,99 \text{ , (Н)}$$

Сила сопротивления движению порожняковой ветви:

$$W_{nop} = (q'_l + q'_p) * L * \omega \quad (2.11)$$

$$W_{nop} = (284,49 + 70,31) * 400 * 0,032 = 4541,44 \text{ , (Н)}$$

Сопротивление на погрузочном пункте обусловлено сообщением поступающему на ленту потоку груза кинетической энергии и трением его о ленту и направляющие борты:

$$W'_n = \frac{q * (g - g_0) * g}{g} * \kappa \quad (2.12)$$

где g_0 - начальная скорость груза, $g_0 = 1,5$ (м/с);

g - скорость ленты, $g = 2$ (м/с);

κ - коэффициент учитывающий сопротивление вследствие трения груза о стенки воронки, $\kappa = 1,4$.

$$W'_n = \frac{1362,5 * (2 - 1,5) * 2}{9,81} * 1,4 = 0,194 \text{ , (кН)}$$

Натяжение ленты определяем способом обхода контура конвейера по точкам. Создается схема которая является вычисленной схемой конвейера, выбирается место привода и все точки перегиба ленты нумеруются по ходу ее движения, начиная с точки сбегания с приводного барабана. Значение натяжения сбегавшей ветви с приводного барабана определяется исходя из условия передачи окружного усилия силой трения. Натяжение сбегавшей ветви обозначают S_1 и при построении диаграммы натяжения ленты принимают ее за условный нуль.

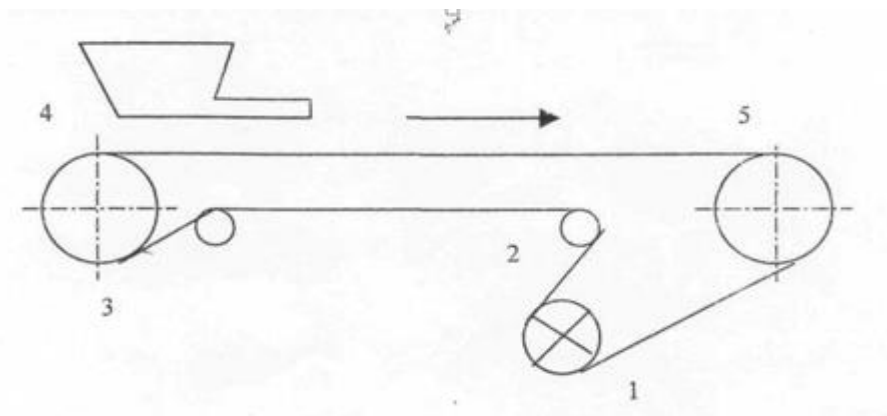


Рисунок 2.1 - Вычисленная схема конвейера

Тяговое усилие, необходимое для приведения в движение конвейера, передается при помощи сил трения:

$$W_0 = S_{нб} - S_{сб}$$

$$S_{нб} = S_{сб} * e^{\frac{\mu\alpha}{K_m}}$$

где $S_{нб}$, $S_{сб}$ - натяжение в набегающей на барабан и сбегающей с барабана ветвей ленты, (Н);
 μ - коэффициент сцепления между барабаном и лентой.

Принимаем однобарабанный привод с общим углом обхвата барабана лентой $\alpha=180^\circ$ и коэффициентом сцепления для барабана с гладкой резиновой футеровкой $\mu = 0,35$. Тяговый фактор для этих условий $e_{\mu\alpha}=3$ [14]; K_T – коэффициент запаса сил трения, $K_T = 1,15-1,2$; принимаем $K_T=1,2$; K'' - коэффициент возрастания ленты, $K''=1,04$

Сила натяжения ленты в точках 1-5.

Таблица 2.1 – Сила натяжения в конвейерах

Точки линии	Натяжение в точках конвейера	Величина, кН
$S_1=S_{сб}$	S_1	22,351
$S_2=K''*S_1$	$S_2=1,04*S_1$	23,245
$S_3=S_2+W_{пор}$	$S_3=1,04*S_1+4,541$	27,786
$S_4=K''*S_3$	$S_4=1,04*(1,04*S_1+4,541)=1,0816*S_1+4,72$	28,895
$S_5=S_4+W_{н'}+W_{зр}=S_{нб}$	$S_5=1,0816S_1+31,703$	55,878

$$S_{нб} = 1,0816 * S_{сб} + 31,703$$

$$S_{нб} = 3 * S_{нб} / 1,2 = 2,5 * S_{сб}$$

$$2,5 * S_{сб} = 1,0816 * S_{сб} + 31,703$$

$$1,4184 * S_{сб} = 31,703$$

$$S_{сб} = 22,351 \text{ (кН)}$$

$$S_{нб} = 2,5 * 22,351 = 55,878 \text{ (кН)}$$

Тяговая сила:

$$W_0 = S_{нб} - S_{сб}$$

$$W_0 = 55,878 - 22,351 = 33,527 \text{ (кН)}$$

Мощность на валу двигателя:

$$N = \frac{W_0 * g}{\eta} \quad (2.13)$$

где η - КПД редуктора, $\eta=0,9$;

g - скорость ленты, $g=2$ (м/с).

$$N = \frac{33,527 * 2}{0,9} = 74,5 \text{ (кВт)}$$

Проверка по уравнению натяжения ленты в точке наименьшего натяжения на грузовой ветви (точка 4 на рисунке конвейера $S_4=28,895$ (кН)).

$$S_{гр} = 5(q + q_l) * l \quad (2.14)$$

где q - линейная сила тяжести груза, кН;

q_l - линейная сила тяжести ленты, кН;

l - расстояние между роlikоопорами грузовой ветви, м.

$$S_{zp(min)} = 5 * (1362,5 + 284,49) * 1,1 = 9,058 \text{ , (кН)}$$

$$S_4 > S_{zp(min)}$$

$$28,895 > 9,058$$

Условие выполняется.

Пуск конвейера.

При пуске конвейера кроме статических сопротивлений движению ленты действуют силы инерции, которые увеличивают натяжение набегающей на приводной барабан ветви ленты, Отчего соотношение между $S_{нб}$ и $S_{сб}$ может оказаться больше тягового фактора и начнется пробуксовка, что недопустимо.

При включении привода ленточного конвейера движение ленты начинается неодновременно по всему контуру, т.к. лента обладает эластичностью, то сначала начнут двигаться участки, расположенные у приводного барабана, а затем более отдаленные. Помимо этого, в связи с провисанием ленты между роlikоопорами процесс вовлечения отдельных участков ленты и лежащего на ней груза в движении растянется во времени и станет продолжительнее.

Конвейерную ленту можно условно представить в виде упругого длинного стержня, замкнутого в кольцо, а процесс вовлечение масс - как процесс распространения упругой волны в стержне.

Скорость распространения упругой волны в стержне определяем по формуле:

$$C = \sqrt{E/P} \quad (2.15)$$

где, E = модуль упругости всего сечения резинотросовой ленты

$$E = Z_m * \frac{\pi * d_n^2 * Z_n * E_0}{4} \quad (2.16)$$

где d_n - диаметр проволоки троса, $d_n=1,55$ (мм);

Z_n - число проволок в тросе, $Z_n = 4$ (шт);

Z_m - число тросов, $Z_m = 46$ (шт) - исходя из ширины ленты и диаметра и шага тросов;

E_0 - модуль упругости, отнесенный к единице площади сечения проволок, $E_0=5,8*10^3$ (Н/мм²).

P - линейная плотность стержня, кг/м.

Предположим, что при пуске груз движется вместе с лентой и определим плотность из выражений:

для грузовой ветви:

$$\rho_1 = \frac{(q + q'_l + q'_p)}{g} = \frac{(1362,5 + 284,49 + 445,9)}{9,81} = 213,34 \quad (\text{кг} / \text{м})$$

для порожняковой ветви:

$$\rho_2 = \frac{(q'_l + q''_p)}{g} = \frac{(284,49 + 70,31)}{9,81} = 36,17 \quad (\text{кг} / \text{м})$$

Скорость распространения упругой волны на грузовой ветви:

$$C_1 = \sqrt{\frac{2012699}{213,34}} = 97,13 \quad , \text{ (м/с)}$$

Скорость распространения упругой волны на порожняковой ветви:

$$C_2 = \sqrt{\frac{2012699}{36,17}} = 235,89 \quad , \text{ (м/с)}$$

Время достижения максимального значения динамического натяжения:

$$t'' = \frac{L_\kappa}{C_1} + \frac{L_\kappa}{C_2}$$

где t - время прихода отраженной волны, с;
 L_κ - длина конвейера, $L_\kappa = 400$ (м).

$$t'' = \left(\frac{400}{97,13} + \frac{400}{235,89} \right) = 5,814 \quad , \text{ (с)}$$

Определяем время торможения ленточного конвейера:

$$t_m = \frac{(m_\kappa * g_n)}{W} \quad (2.17)$$

где T_κ - движущиеся массы разгоняющегося конвейера;

g_n - скорость установившегося движения ленты конвейера, $g_n = 2$ (м/с).

$$m_\kappa = m_{np} + (q_{ep} + 2q_l + q'_p + q''_p) * L_\kappa \quad (2.18)$$

где m_{np} - сосредоточенная масса привода, кг.

$$m_{np} = \frac{\kappa * (GD)^2 * i_p^2}{g * D_{\phi}^2} \quad (2.19)$$

где i_p - передаточное отношение редуктора.

$$i = \omega_{\phi\phi} / \omega_m$$

$$\omega_{\phi\phi} = (\pi * n) / 30 = (3,14 * 1500) / 30 = 157 \text{ , (с}^{-1}\text{)}$$

ω_m - угловая скорость механизма:

$$\omega_m = \frac{\vartheta}{R_{\phi}} \quad (2.20)$$

где, ϑ - скорость движения барабана, $\vartheta = 2$ (м/с);
 R_{ϕ} - радиус барабана, $R_{\phi} = 500$ (мм).

По справочнику А.Г. Шахмейстер принимаем: диаметр приводного барабана конвейера $D_{\phi} = 1000$ (мм); диаметр концевой барабана конвейера $D_k = 800$ (мм).

$$\omega_m = \frac{2}{0,5} = 4 (\text{с}^{-1})$$

$$i = \frac{157}{4} = 39,25$$

Принимаем двухступенчатый редуктор со стандартным значением передаточного числа редуктора 40.

κ - коэффициент учитывающий инерцию редуктора, соединительных муфт и барабана, $\kappa = 1,4$.

$(GD)^2_P$ - маховый момент ротора, $(GD)^2_P = 1,0$ (кг*м²).

$$m_{np} = (1,4 * 1,0 * 40^2) / (9,81 * 1^2) = 228,33 \text{ , (кг)}$$

$$m_k = 228,33 + (1362,5 + 2 * 284,49 + 445,9 + 70,31) * (400 / 9,81) = 100032,2 \text{ , (кг)}$$

W – сумма статических сопротивлений движению ленты:

$$W = W_{nop} + W_{\phi\phi} + W_n = 4,541 + 26,789 + 0,194 = 31,524 \text{ , (кН)}$$

$$t_m = (100032,2 * 2) / 31524 = 6,3 \text{ , (с)}$$

При затормаживании приводного барабана конвейерная лента не сразу останавливается по всему контуру. Более отдаленные от привода участки ленты

будут продолжать движение и набегать на передние участки, образуя продольные упругие волны, провесы между роликами, складки и т. д. Кроме того, вследствие нарушения соотношения $S_{нб}$ и $S_{сб}$ может возникнуть пробуксовка ленты по барабану. Во избежание этих нежелательных явлений, необходимо обеспечить соответствующий режим торможения.

Нормальное горизонтальное положения, для тормоза на конце маховика. Этот режим экстренного торможения является недействительным, так как долгосрочные устройство для доставки на холостом погрузчик конвейера в следующем может быть покрыта с нагрузкой. Определяем время экстренного торможения:

$$t_T'' = \frac{(m_n * g_n)}{(F_{\max} + W)} \quad (2.21)$$

где $F_{\max}$ - максимальное допустимое тяговое усилие ленты.

$$F_{\max} = (M_{\max} * i * \eta) / R_{\sigma} \quad (2.22)$$

где $M_{\max}$ - максимальный допустимый момент на валу двигателя,
 $M_{\max} = 1112,05 \text{ (Н*м)}$.

$$F_{\max} = (1112,05 * 40 * 0,9) / 0,5 = 80067,6 \text{ , (H)}$$

$$t_T'' = (100032,2 * 2) / (82833,12 + 31524) = 1,749 \text{ , (с)}$$

Определяем время разгона системы:

$$t_p = \frac{(GD)^2_{num} * \eta}{375 * (M_{n.c} - M_{cm}) * K_y}$$

где π - номинальная скорость вращения ротора двигателя,

$\pi = 1500 \text{ (об/мин)}$;

K_y - коэффициент учета упругого удлинения ленты обуславливающий неодновременность приведения в движение масс конвейера, для резинотросовых лент $K_y = 0,9-1$. Принимаем $K_y = 1$.

$M_{пс}$ - средний пусковой момент электродвигателя, Н*м.

$M_{пс} = (1,2-1,6) M_{ст}$

$M_{ст}$ – момент статических сил сопротивления при установившемся движении конвейера:

$$M_{cm} = \frac{(W * R_{\sigma})}{(i * \eta)} \quad (2.23)$$

где W — статическое сопротивление движению ленты, кН;
 R_6 — радиус барабана, м;
 i — передаточное число редуктора; η - КПД редуктора, $\eta=0,9$.

$$M_{cm} = (31524 * 0,5) / (40 * 0,9) = 437,83 \quad , (H * м)$$

$(GD)^2_{кон}$ - приведенный к валу двигателя маховый момент движущихся частей конвейера, кг*м².

$$(GD)^2_{кон} (GD)^2_p + \frac{4 * R_6^2}{i^2} * (q + 2 * q_{л} + q'_p + q''_p) * L \quad (2.24)$$

где $(GD)^2_p$ -маховый момент ротора, кг*м²;
 L_K - длина конвейера, м.

$$(GD)^2_{кон} = 1 + \frac{4 * 0,5^2}{40^2} * (1362,5 + 2 * 284,49 + 445,9 + 70,31) * 400 = 612,92$$

$$M_{nc} 1,6 * M_{cm} = 1,6 * 437,83 = 700,528 \quad , (H / м)$$

$$t_p = \frac{612,92 * 1500}{375 * (700,528 - 437,83) * 1} = 9,333 \quad , (с)$$

Определяем время пуска:

$$t_n = t_{mp} + t_p \quad (2.25)$$

где t_{mp} первая фаза пуска или фаза трогания конвейера с места,
 $t_{mp}=t''=5,814(с)$

$$t_n = 5,814 + 9,333 = 15,147 \quad , (с)$$

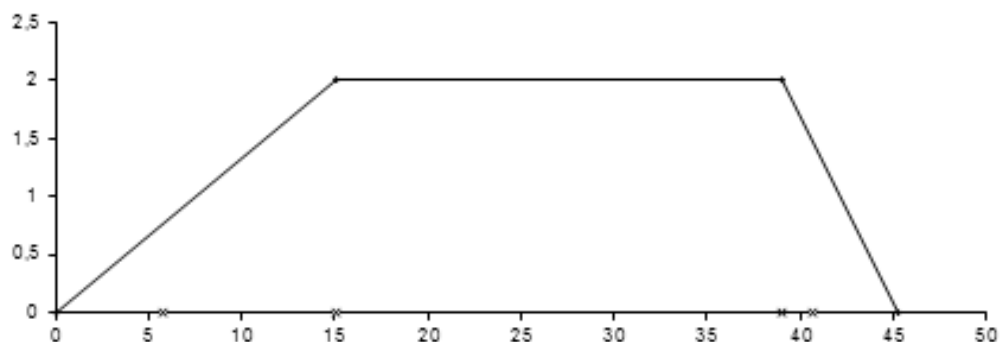


Рисунок 2.2- Тахограмма пуска и торможения ленточного конвейера

2.1 Вычисления мощности и выбор двигателя, управляемого преобразования

Требованиям, предъявляемым к электроприводу модернизированного ленточного конвейера, удовлетворяет асинхронный двигатель с фазным ротором, управляемый по системе ПЧ-АД.

Принимаем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4A250S4УЗ.

Таблица 2.2 Паспортные данные асинхронного двигателя 4A250S4УЗ

Синхронная частота	$n=1500$ (об/мин)
Номинальная мощность	$P_n=75$ (кВт)
Номинальное напряжение питания	$U=380$ (В)
Номинальный КПД	$\eta=93(\%)$
Номинальный коэффициент мощности	$\cos \varphi=0,9$
Ток статора	$I_n=78$ (А)
Максимальная перегрузочная способность	$M_{\max}/M_n=2,3$
Номинальное скольжение	$S_n=0,012$
Критическое скольжение	$S_k=0,095$
Маховый момент ротора	$(GD)^2=1,0$

Номинальная скорость вращения двигателя:

$$\omega_n = \frac{(\pi * n_n)}{30} \quad (2.26)$$

где n_n – номинальная частота вращения, об/мин.

$$n_n = n_0(1 - S_n) = 1500 * (1 - 0,012) = 1482 \text{ , (об/мин)}$$

$$\omega_n = \frac{3,14 * 1482}{30} = 155,1$$

Номинальный момент на валу двигателя:

$$M_{ном} = (P_{ном} * 10^3) / \omega_n \quad (2.27)$$

$$M_{ном} = (75 * 10^3) / 155,1 = 483,5 \text{ , (Н / м)}$$

Максимальный допустимый момент на валу двигателя:

$$M_{\max} = \lambda * M_n \quad (2.28)$$

$$M_{\max} = 2,3 * 483,5 = 1112,05 \text{ , (H / м)}$$

Суммарный момент инерции:

$$J_{\Sigma} = \frac{((GD)_{\text{дв}}^2 + (GD)_{\text{кон}}^2)}{4} = \frac{(1,0 + 612,92)}{4} = 153,48 \text{ , (кг * м}^2\text{)}$$

Пусковой момент двигателя:

$$M_n = K_n * M_H = 1,2 * 483,5 = 580,2 \text{ , (Нм)}$$

Пусковой ток двигателя:

$$I_n = K_I * I_H = 7 * 78 = 546 \text{ , (А)}$$

Для двигателя мощностью более 15 кВт сопротивление r_1 невелико и при частоте 50Гц значительно меньше X_K . Отчего величиной r_1 в следующих выражениях можно пренебречь [16].

$$M_K = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_K} \Rightarrow X_K = \frac{3 * 380^2}{2 * 157 * 1112,05} = 1,24 \text{ , (Ом)}$$

Учитывая, что в асинхронных двигателях общепромышленного исполнения $r_1 = (0,1-12) X_K$, а $c_1 = 1,02 - 1,06$, ими можно пренебречь и получить Выражения для приближённого вычисления значения критического скольжения [1].

$$S_{KP} = \frac{c_1 r'_2}{X_K} \Rightarrow r'_2 = \frac{S_{KP} X_K}{c_1} = \frac{0,095 * 1,24}{1,06} = 0,111 \text{ , (Ом)}$$

$$r_1 = 0,1 * X_K = 0,1 * 1,24 = 0,124 \text{ , (Ом)}$$

$$r_K = r_1 + c_1 r'_2 = 0,124 + 1,06 * 0,111 = 0,241 \text{ , (Ом)}$$

$$a = \frac{r_1}{r'_2} = \frac{0,124}{0,111} = 1,11 \neq 0$$

Построение механической характеристики двигателя при различной частоте питающей сети выполняется следующим образом:

Выражение для механических характеристик при переменных значениях величины частоты и напряжения питания [16]:

$$M = \frac{3U_{1j}^2 r'_{2}}{\omega_{0j} s_j \left[X_{KH}^2 f_{1*}^2 + \left(r_1 + \frac{r'_{2}}{s_j} \right)^2 + \frac{r_1 r'_{2}}{s_j X_{\mu H} f_{1*}} \right]} \quad (2.29)$$

Реактивные сопротивления двигателя зависят от частоты питающего напряжения и изменяются с изменением частоты.

$$X_{\mu j} = X_{\mu H} * f_{1*} \quad (2.30)$$

$$X_K = X_{KH} * f_{1*}$$

Для того чтобы регулировать скорость двигателя, сохраняя максимальный момент двигателя постоянным, нужно величину напряжения уменьшать в меньшей степени, чем уменьшается частота, приблизительно в соотношении:

$$U_1 = U_{1H} f_{1*} + I_{1H} r_1 * (1 - f_{1*}). \quad (2.31)$$

При частотном регулировании величина относительного скольжения s_j зависит как от разности скоростей вращающегося электромагнитного поля и ротора, так и от относительного значения частоты питающего напряжения

$$f_{1*} = \frac{f_{1j}}{f_{1H}}. \quad (2.32)$$

$$s_j = 1 - \frac{\omega}{\omega_{0H} * f_{1*}}, \quad (2.33)$$

где f_{1j}, s_j - регулируемые значения частоты напряжения статора и скольжения.

ω_{0H}, f_{1H} - номинальные значения частоты статора и скорости поля.

Ниже на рисунке 2.3 изображены механические характеристики двигателя при различных значениях частоты питающего напряжения.

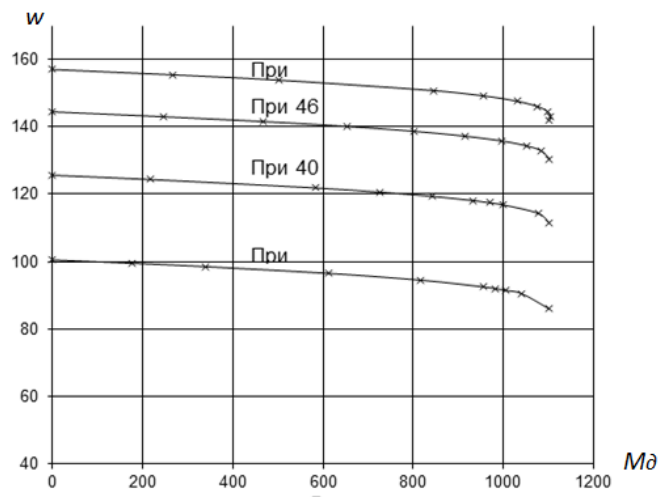


Рисунок 2.3 - Механические характеристики двигателя при различных значениях частот питающего напряжения

По мощности двигателя выбираем преобразователь частоты АТ04-100. Электропривод АТ04 – универсальный электропривод, предназначенный для автоматического управления частотой вращения и моментом производственных машин и механизмов с приводными трёхфазными асинхронными электродвигателями мощностью от 5,5 кВт до 315 кВт класса напряжения 0,4 кВ.

Таблица 2.3 – Расчет механических характеристик двигателя

При 50 Гц										
Скр	0,095									
S	0	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,095
ω	157	155,43	153,86	150,72	149,15	147,58	146,01	144,44	142,87	142,085
M	0	265,482	500,708	846,713	956,693	1030,92	1076,049	1098,594	1104,252	1102,245
При 46 Гц										
Скр	0,0968									
S	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,0968
ω	144,44	142,995	141,5512	140,1068	138,6624	137,218	135,7736	134,3292	132,8848	130,4617
M	0	245,699	465,832	652,1837	801,6633	915,3357	996,9286	1051,422	1084,015	1102,42
При 40 Гц										
Скр	0,113									
S	0	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,065	0,07	0,09	0,113
ω	125,6	124,344	121,832	120,576	119,32	118,064	117,436	116,808	114,296	111,4075
M	0	215,866	583,5895	727,2571	843,1779	933,1137	969,206	999,9238	1077,54	1101,939
При 32 Гц										
Скр	0,145									
S	0	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,085	0,09	0,1	0,145
ω	100,48	99,4752	98,4704	96,4608	94,4512	92,4416	91,9392	91,4368	90,432	85,90741
M	0	175,648	337,9875	613,1633	817,4236	956,121	981,8903	1004,515	1041,171	1101,981

Этот электропривод применяется для управления широким спектром машин, механизмов и технических комплексов с различными режимами работы и высокими требованиями к статическим и динамическим характеристикам. Электроприводы АТ04 имеют развитый внешний интерфейс, что позволяет адаптировать их к существующим системам автоматики, а также создавать на базе электроприводов АТ04 автоматизированные системы управления различными механизмами. Это возможно благодаря:

- широким функциональным возможностям (до 500 программируемых параметров);
- программируемой частоте ШИМ 0,4_16 кГц;
- встроенному и дистанционному пультам управления с ЖКИ дисплеем;
- шести программируемым дискретным входам (10 мА, Rнагр. _ 2 кОм);
- шести программируемым дискретным (релейным) выходам (250 В, 3 А);
- четырем гальванически не связанным, программируемым аналоговым входам (0-5 мА, 0(4)-20мА, 0-10 В);
- четырем гальванически связанным программируемым аналоговым входам (0-5 мА, 0(4)-20 мА, 0-10 В);
- двум программируемым аналоговым выходам (0-5 мА, 0(4)-20 мА, 0-10 В);
- двум каналам последовательной связи RS485;
- последовательному каналу связи RS232 (поставляется внешний преобразователь RS485/232).

Электропривод АТ04 обеспечен защитой от аварийных и нештатных режимов

- от токов недопустимой перегрузки и короткого замыкания, в т.ч. от замыкания на “землю”;
- от недопустимых перенапряжений на силовых элементах;
- от недопустимых отклонений и исчезновения напряжения питающей сети;
- от неполнофазного режима работы сети и электродвигателя;
- от недопустимых отклонений технологического параметра;
- от неисправностей в узлах и блоках электропривода;
- от несанкционированного доступа к программируемым параметрам (пароль).

Электропривод АТ04 выполнен на основе двухзвенного преобразователя частоты с транзисторным (IGBT) автономным инвертором напряжения (АИН) с широтно-импульсным (ШИМ) управлением и многофункциональной микропроцессорной системой управления с развитым интерфейсом. Принцип действия и устройство электропривода АТ04 поясняет функциональная схема, представленная на рисунке 2.4.

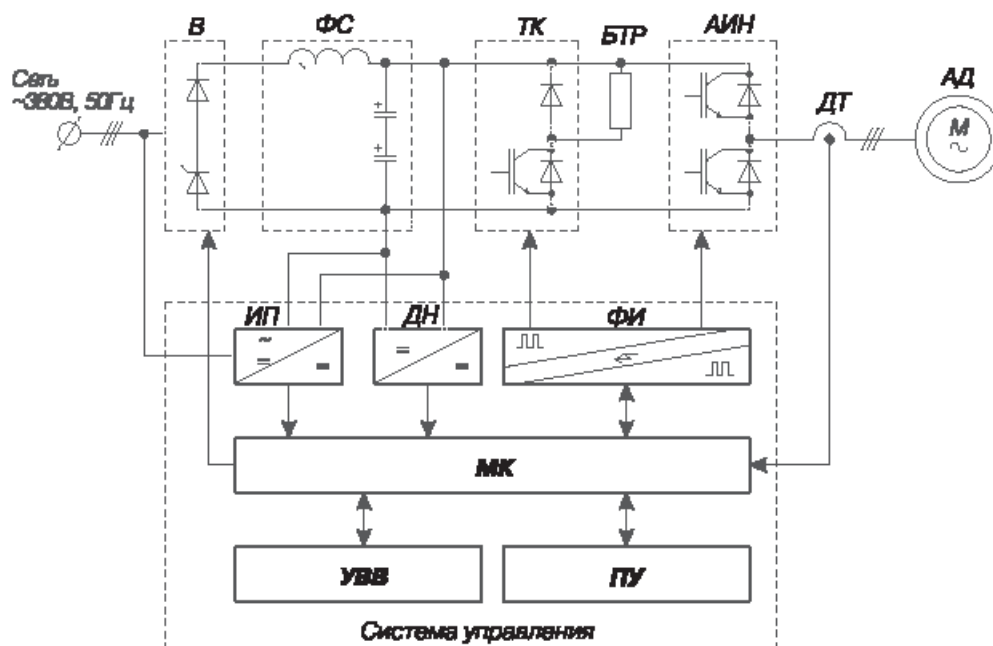


Рисунок 2.4 - функциональная схема

На схеме обозначены:

АД – приводной асинхронный электродвигатель;

ИП – источник питания (конвертор);

ДН – датчик напряжения;

ФИ – формирователь управляющих сигналов транзисторов (драйвер);

МК – микропроцессорный контроллер;

УВВ – устройство ввода/вывода (внешний интерфейс);

ПУ – пульт управления.

В – силовой полу управляемый (диодно-тиристорный) выпрямитель;

ФС – силовой LC - фильтр звена постоянного напряжения;

ТК – транзисторный (IGBT) ключ реостатного торможения (тормозной ключ), устанавливается в АТ04;

БТР – внешний блок тормозного резистора;

АИН – транзисторный (IGBT) автономный инвертор напряжения;

ДТ – датчик тока.

2.2 Выбор частотного преобразователя в соответствии с мощностью двигателя

В качестве преобразователя частоты для управления трехфазными асинхронными электродвигателями (мощностью от 132 до 320 кВт при напряжении 0,4 кВ) был выбран Triol АТ04. Это устройство предназначено для работы в составе различных типов машин и механизмов, применяемых в промышленности. Срок его эксплуатации достигает 15 лет, чему способствуют:

- использование современной элементной базы;

- наличие широкого набора встроенных защитных функций;
- полное многоуровневое тестирование на этапе производства.

Конструктивно система управления ПЧ Triol AT04 реализована в виде базового модуля с тремя слотами для подключения дополнительных субмодулей, что позволяет гибко адаптировать конфигурацию устройства под конкретные задачи.

Устройство комплектуется встроенным пультом управления, обеспечивающим удобное взаимодействие с оборудованием – все параметры и диагностические сообщения выводятся на дисплей. Также предусмотрена возможность дистанционного управления при помощи выносного пульта.

Функциональные возможности ПЧ включают:

- до 6 дискретных входов, до 6 аналоговых входов и 2 интерфейса RS-485 с поддержкой протокола Modbus – для приёма команд управления и задания параметров;
- до 6 релейных выходов и 2 аналоговых выхода – для взаимодействия с внешним оборудованием.

Для настройки и мониторинга используется фирменное программное обеспечение Triol Универсальный Помощник, функционирующее на платформе Windows. Через интерфейс RS-485 можно одновременно управлять до пяти преобразователями в одной сети: запускать и останавливать приводы, отслеживать их состояние в реальном времени, изменять параметры, управлять релейными выходами и логическими коммутаторами, работать с дискретными и аналоговыми входами, а также с кодовыми регистрами.

Преобразователь поддерживает расширенные функции:

- энергосбережение;
- управление группой электродвигателей от одного ПЧ;
- функция «подхвата» вращающегося двигателя;
- встроенный ПИД-регулятор для автоматического регулирования процессов и пр.

Модельный ряд Triol AT04 включает исполнения с различной степенью защиты:

- IP21 – базовая версия;
- IP54 – для эксплуатации в тяжёлых условиях.

Корпуса выполнены в виде навесных шкафов одностороннего обслуживания с легко снимаемыми передними панелями. Охлаждение – воздушное, с принудительной циркуляцией. Шкаф в исполнении IP54 изготовлен с цельносварным каркасом, оборудован герметизированной дверью и вентиляционной камерой. Защита реализована за счёт разделения шкафа на отсеки: силовой и управляющий блоки – в одном отсеке, а система вентиляции – в другом. Дополнительно применяются гермовводы и вентиляторы с защитой уровня IP54, что гарантирует надёжную работу оборудования даже в сложных условиях.

Таблица 2.4 - Технические характеристики

Шкала мощностей	132...320 кВт
Питающая сеть	3х380 В, +10%, -15%, 50 (60) Гц $\pm 2\%$
Выходное напряжение	3х (0...380 В) $\pm 2\%$, максимальное значение программируется
Выходная частота	0...400 Гц $\pm 0,05\%$, значения максимальной и минимальной частоты программируются
Ток перегрузки	120% номинального значения в течении 60 с
Коэффициент полезного действия	не менее 0,95 (без двигателя)
Коэффициент мощности (сети)	не менее 0,95
Сопротивление изоляции гальванически не связанных цепей и относительно корпуса	не менее 10 МОм
Электрическая прочность изоляции	2500 В, 50 Гц, в течении 1 мин.

Из представленных вариантов частотных преобразователей выбираем Триол АТ4 (рисунок 2.5), так как он отвечает всем техническим требованиям, а так-же является экономически выгодным.



Рисунок 2.5 —Преобразователь частоты Триол АТ4

Схема подключения ПЧ к двигателю показана на рисунке 2.6.

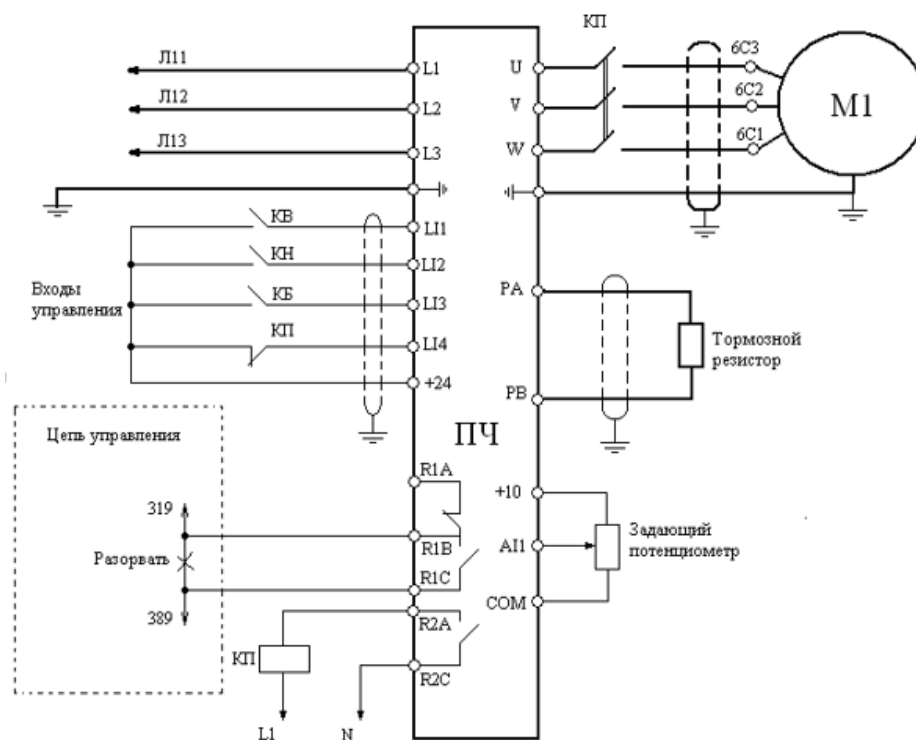


Рисунок 2.6 - Схема подключения ПЧ к сети и к двигателю

Применение частотного преобразователя, подключённого к высокочастотной обмотке электродвигателя, позволяет организовать перемещение конвейерной ленты с различными скоростями: как с повышенной (рабочей), так и с пониженной (режим дотяжки), а также в режиме технического осмотра (ревизии). При этом движение осуществляется с плавным запуском и остановкой, с контролем ускорений и минимизацией динамических рывков.

Рабочий цикл главного привода конвейера в штатном режиме выглядит следующим образом: в начальном состоянии лента неподвижна. При необходимости начала транспортировки с панели управления на ПЧ подаётся команда задания скорости, после чего при замыкании контактов пускателя обмотка двигателя подключается к преобразователю. Сигнал о готовности к работе формируется встроенной системой управления на базе релейных контактов.

Для запуска двигателя требуется задание напряжения, соответствующего необходимым условиям по времени и скорости перемещения груза. После этого, с помощью встроенного блока ПЧ формируется сигнал, инициирующий снятие тормоза и подачу напряжения на обмотку электродвигателя, соответствующего заданной (рабочей) скорости. Движение ленты начинается с заданным плавным ускорением.

При пересечении датчика зоны замедления на ПЧ поступает новое значение скорости, соответствующее сниженной. После завершения транспортировки на блок управления передаётся сигнал завершения цикла,

активирующий тормоз, отключение двигателя от ПЧ и сброс всех командных сигналов. Таким образом, цикл главного привода считается завершённым.

Любой преобразователь частоты конструктивно состоит из двух основных компонентов: силового блока и управляющей части. В большинстве случаев силовая часть реализуется на тиристорах или транзисторах IGBT, работающих в режиме электронного ключа. Микропроцессорный цифровой контроллер управляет этими ключами, а также выполняет задачи диагностики, мониторинга и защиты оборудования.

В регулируемых электроприводах ПЧ классифицируются в зависимости от принципа построения силовой части:

- с промежуточным звеном постоянного тока (ярко выраженным);
- с прямым преобразованием, без выделенного звена постоянного тока.

На сегодняшний день тиристорные преобразователи занимают лидирующее положение в области высоковольтных электроприводов, охватывая диапазон мощностей от сотен киловатт до десятков мегаватт и рабочие напряжения от 3 до 10 кВ и выше.

Электропривод Triol AT включает базовый шкаф с частотным преобразователем, систему управления и комплект внешних подключаемых модулей. Состав низковольтных (напряжением 0,4 кВ) и высоковольтных (с трансформаторным питанием 6 кВ) электроприводов Triol AT представлен на функциональных схемах, приведённых на рисунке 2.7.

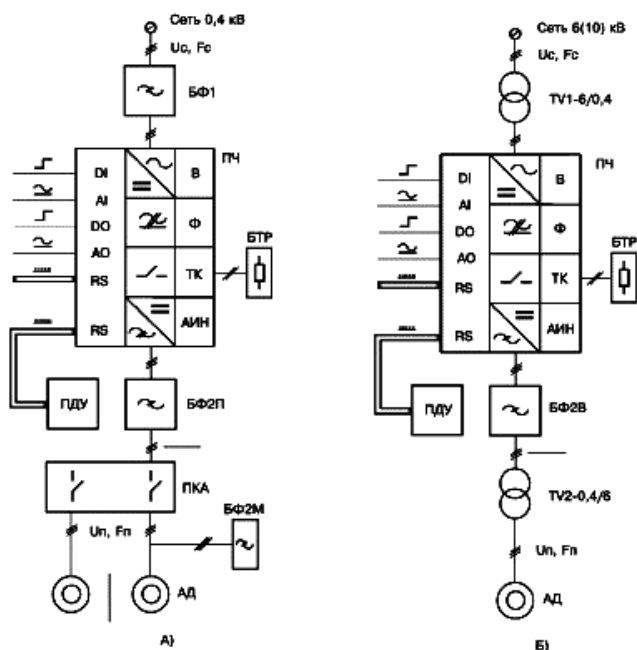


Рисунок 2.7 - Функциональные схемы

Алгоритм управления на основе широтно-импульсной модуляции позволяет производить регулирование частоты вращения двигателя (F_n) и скорости (n) в соответствии с заданным программным законом, при этом

формируется токовая кривая, близкая по форме к синусоиде на всём диапазоне регулирования.

Частота работы ШИМ может быть установлена в широком диапазоне – от 0,6 до 16 кГц. При выборе частоты переключения необходимо учитывать компромисс между двумя основными критериями:

- чем выше частота ШИМ, тем более приближённой к синусоиде становится форма тока, что снижает уровень электромагнитных помех и вибраций;
- однако повышение частоты приводит к увеличению динамических потерь энергии в выходных фильтрующих элементах и активных компонентах (например, в блоке AES).

В зависимости от мощности асинхронного двигателя и типа привода, выпрямляющий блок в преобразователе частоты может быть:

- неуправляемым диодным – в системах с небольшой установленной мощностью;
- управляемым на основе диодно-тиристорной схемы – для электроприводов средней и высокой мощности;
- диодно-транзисторным – в приводах с функцией рекуперативного торможения.

Согласованное взаимодействие всех элементов силовой части привода – выпрямителя, инвертора и тормозного модуля – обеспечивается системой управления, которая координирует их работу и поддерживает требуемые параметры в процессе эксплуатации.

2.3 Вычисления и выбор понижающего трансформатора

Понижающий трансформатор нужен для согласования питания преобразователя частоты АТ04-100 с питающей сетью $U_C=6000V$. Необходимо учесть следующие условия.

1. Напряжение обмотки высшего напряжения трансформатора должно совпадать с напряжением питающей сети:

$$U_C = U_{BH} = 6000(V)$$

2. Вторичное номинальное фазное напряжение трансформатора:

$$U_{HH} = U_{ПЧ} = 400(V)$$

3. Номинальный вторичный фазный ток трансформатора:

$I_{HH} = I_{ПЧ} = 150(A)$ рекомендовано из каталога продукции и применений 2003г Корпорация Триол [11].

Фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора:

$$U_{\phi.HH} = \frac{U_{HH}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230 \text{ ,}(B)$$

Требуемое выпрямленное напряжение:

$$U_d = U_{2\phi.HH} * K_U = 230 * 2,34 = 538,2 \text{ ,}(B).$$

где KU=2.34 – коэффициент трёхфазной мостовой схемы.

Линейный ток трансформатора обмотки высокого напряжения:

$$I_{BH} = \frac{I_{HH} * U_{HH}}{U_C} = \frac{150 * 400}{6000} = 10 \text{ ,}(A)$$

Расчётная мощность трансформатора:

$$S = 3 * U_{\phi.BH} * I_{\phi.BH} = 3 * 6000 * \frac{10}{\sqrt{3}} = 103 \text{ ,}(кВА)$$

Так как трансформатор мощностью S=103кВА найти не удалось, воспользуемся данными кратными трансформатора ТМ-100 [10].

Таблица 2.5 –Технические характеристики трансформатора

ТМ-100	
Номинальная мощность:	S _н =100кВА
Напряжение ВН	U _{ВН} =6000В
Напряжение НН	U _{НН} =400В
Схема и группа соединения обмоток	Δ/У _н -11
Напряжение КЗ %	U _{кз} %= 4,5
Потери ХХ	P _{хх} =305Вт
Потери КЗ	P _{кз} =1970Вт

Определим кратность величин:

$$\kappa = \frac{S_p}{S_H} = \frac{103}{100} = 1,03$$

$$P_{XX} = 305 * 1,03 = 314,15 \text{ ,}(Вт)$$

$$P_{KЗ} = 1970 * 1,03 = 2029,1 \text{ ,}(Вт)$$

Определим активное сопротивление фазы трансформатора:

$$R_{\phi.TP} = \frac{\Delta P_{K3}}{K * I_{\phi.BH}^2 * K_{TP}^2} = \frac{2029,1}{3 * 5,77^2 * 15^2} = 0,09 \text{ , (Ом)}$$

$$I_{\phi.BH} = \frac{I_{BH}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ , (А)}$$

$$K_{TP} = \frac{U_C}{U_{HH}} = \frac{6000}{400} = 15$$

Суммарное активное сопротивления трансформатора, приведённое к виткам вторичной обмотки:

$$X_{\phi.TP} = \frac{U_{K3\%} * U_{\phi.HH}}{100 * I_{\phi.HH}} = \frac{4,5 * 230}{100 * 150} = 0,69 \text{ , (Ом)}$$

Индуктивность фазы трансформатора:

$$L_{\phi.TP} = \frac{a * X_{\phi.TP}}{2 * \pi * f_C} = \frac{2 * 0,69}{2 * 3,14 * 50} = 4,39 * 10^{-3} \text{ , (Гн)}$$

2.4 Вычисления индуктивности LC фильтра

В преобразователе частоты в цепи между выпрямителем и автономного инвертора напряжения ставится силовой LC – фильтр звена постоянного напряжения.

$$S_{LC} = \frac{q_{BX}}{q_{BbIX}} = \frac{0,057}{0,01} = 5,71$$

$$q_{BX} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057$$

$$q_{BbIX} = 0,01 - 0,1$$

$$L_{\phi} = \frac{S_{LC}}{m^2 * C * \omega^2} = \frac{5,71}{6^2 * 0,1 * 314^2} = 1,6 * 10^{-5} \text{ (Гн)}$$

Примем C=100мкФ на 1кВт мощности двигателя.

2.5 Вычисления структурной схемы электропривода в абсолютных единицах

При подчинённом регулировании координат система электропривода разделяется на группы звеньев, в каждом из которых есть одна большая постоянная времени. Количество контуров регулирования выбирается равным числу контролируемых координат объекта регулирования.

В данном дипломном проекте будет одноконтурная система подчинённого регулирования координат по частоте вращения вала двигателя.

Структурная схема приведена на рисунке 2.8, где ЗИ – задатчик интенсивности, РС – регулятор скорости ДС – датчики скорости, ЧП – преобразователь частоты [6]. Преобразователь частоты является инерционным звеном первого порядка.

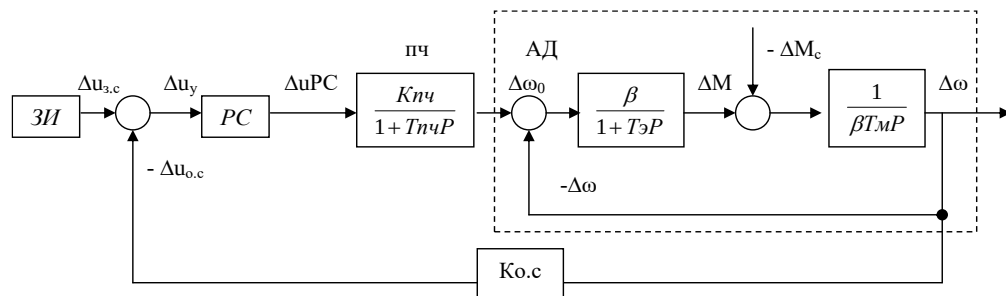


Рисунок 2.8 - Структурная схема системы ПЧ-АД с обратной связью по скорости

Асинхронный двигатель можно представить двумя звеньями с передаточными функциями

Механическая часть:

$$W_M(p) = \frac{1}{\beta T_M P}$$

Электрическая часть:

$$W_{\omega}(P) = \frac{\beta}{1 + T_{\omega}P}.$$

Основные параметры указанных звеньев β , T_M , T_{ω} , определяем по следующим Выражением.

Коэффициент жёсткости на рабочей характеристике:

$$\beta = \frac{M_K}{\omega_{0.HOM} * S_K} = \frac{1112,05}{157 * 0,095} = 74,56$$

$$\omega_{0.HOM} = \frac{2 * \pi * f_1}{p} = \frac{2 * 3,14 * 50}{2} = 157 \text{ , (об / мин)}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_M = \frac{J_{\Sigma}}{\beta} = \frac{153,48}{74,56} = 2,05 \text{ , (с)}$$

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{2L_{\Phi.TP} + L_{\Phi} + 2L_{\Phi.TP} + L_1 + L'_2}{2R_{\Phi.TP} + 2R_{\Phi.TP} + r_1 + r'_2} =$$

$$= \frac{2 * 4,39 * 10^{-3} + 1,6 * 10^{-5} + 0,0078}{2 * 0,09 + 0,111 + 0,124} = 0,059 \text{ , (с)}$$

$$L_1 + L'_2 = \frac{X_K}{\omega_{0.HOM}} = \frac{1,24}{157} = 0,0078 \text{ , (Гн)}$$

Передаточная функция механической части:

$$W_M(p) = \frac{1}{\beta T_M p} = \frac{1}{74,56 * 2,05 p} = \frac{1}{152,84 p}$$

Передаточная функция электрической части:

$$W_{\Sigma}(P) = \frac{\beta}{1 + T_{\Sigma} P} = \frac{74,56}{1 + 0,059 P}$$

Передаточная функция преобразователя частоты:

$$K_{ПЧ} = \frac{\Delta \omega_0}{\Delta U_{PC}} = \frac{157}{10} = 15,7$$

$$W_{ПЧ}(P) = \frac{K_{ПЧ}}{1 + T_{ПЧ} P} = \frac{157}{1 + 0,01 P}$$

Кпч- передаточный коэффициент преобразователя частоты;

$T_{пч} = 0,01$ - постоянная времени цепи управления преобразователем частоты из диапазона от 0,005 до 0,1с.

2.6 Синтез регуляторов системы управления электроприводом

Расчёт регуляторов скорости производим по [3]. Настройка контура на “модульный оптимум”.

В системе УБСР-АИ максимальный задающий сигнал 10В, Отчего в цепи обратной связи по скорости нужен делитель напряжения для гальванической развязки (ДМ-2АИ).

Таблица 2.6 – Технические характеристики тахогенератора

ТД-102	
нн, об/мин	1500
Уя, В	82
Ія, А	0,1
Рн, Вт	8,2
Рвозб, Вт	7,5

$$\omega_H = \frac{\pi * n_H}{30} = \frac{3.14 * 1500}{30} = 157(\text{об/мин})$$

$$K_{тг} = \frac{U_{я}}{\omega_H} = \frac{82}{157} = 0.522$$

При синтезе регулятора скорости пренебрегаем влиянием внутренней обратной связи по ЭДС двигателя, что сказывается на точности регулирования скорости, незначительно влияет на динамические показатели, но существенно упрощается синтез регулятора. При этом передаточная функция объекта регулирования примет вид:

$$W_{орс}(P) = \frac{K_{пч}}{(1 + T_{пч}P)} \frac{\beta}{(1 + T_{э}P)} \frac{1}{\beta T_{м}P} = \frac{K_{пч}}{(1 + T_{пч}P)(1 + T_{э}P)T_{м}P}.$$

Принимаем некомпенсируемую постоянную времени: $T_{\mu} = T_{пч} = 0,01с$.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости:

$$W_{раз}(P) = \frac{1/K_{о.с}}{a_T T_{\mu} P (T_{\mu} P + 1)}$$

Передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{pc}(P) = \frac{W_{раз}(P)}{W_{орс}(P)} = \frac{\frac{1/K_{o.c}}{a_T T_{\mu} P (T_{\mu} P + 1)}}{\frac{K_{нч}}{(1 + T_{\mu} P)(1 + T_{\varepsilon} P) T_M P}} = \frac{(1 + T_{\mu} P)(1 + T_{\varepsilon} P) T_M P}{K_{o.c.} K_{нч} * a_T T_{\mu} P (T_{\mu} P + 1)} =$$

$$= \frac{(1 + T_{\varepsilon} P) T_M}{K_{o.c.} K_{нч} * a_T T_{\mu}} = \frac{(1 + 0,059 P) * 2,05}{0,064 * 15,7 * 2 * 0,01} = 102,01(1 + 0,059 P)$$

$$K_{o.c} = \frac{U_{зз.н}}{\omega_H} = \frac{10}{155,1} = 0,064$$

где $K_{o.c}$ - коэффициент обратной связи по скорости,
 $a_T = 2$ коэффициент отношения постоянных.

При подстановки численных значения параметров передаточной функции, получился ПД регулятор.

В серии УБСР-АУ регулятор скорости реализуется с помощью П и ПИ регулятора. Для реализации ПД регулятора возьмём ячейку регулятора скорости РС-IAИ с П регулятором, и усилитель У-IAИ. Параллельно усилителю включим сопротивление R_{oc} . Схема ПД регулятора представлена на рисунке 2.9.

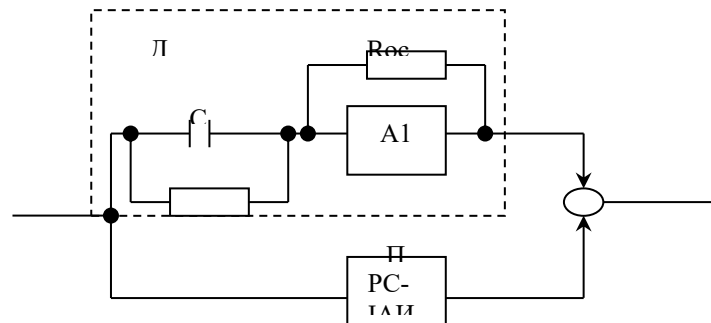


Рисунок 2.9 - Реализация ПД регулятора в серии УБСР-АИ

Примем $R_c = 100 \text{ кОм}$, $C = 1 \text{ мкФ}$.

$$T_{диф} = T_{\varepsilon} = C * R_{oc} \Rightarrow R_{oc} = \frac{T_{\varepsilon}}{C} = \frac{0,059}{1 * 10^{-6}} = 59 \text{ , (кОм)}$$

2.7 Вычисления структурной схемы электропривода в относительных единицах

Базовые величины:

$$I_B = I_H = 78(A)$$

$$M_B = M_{KP} = 1112,05(HM)$$

$$\Omega_B = \omega_0 = 157(об / мин)$$

$$U_B = U_C = 6000B$$

$$R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{6000}{78} = 76,92(Ом)$$

$$S_B = S_{KP} = 0,095$$

Базовое значение выходных сигналов $U'_B = 10B$.

Механическая часть двигателя будет иметь передаточную функцию:

$$W_M = \frac{1}{T_J P} = \frac{1}{21,66P},$$

$$T_J = \frac{J_\Sigma \cdot \Omega_0}{M_0} = \frac{153,48 \cdot 157}{1112,05} = 21,66, (с)$$

где T_J – инерционная постоянная времени привода.

Передаточная функция электрической части двигателя:

$$W_\varepsilon = \frac{1}{R^*_{\varepsilon}(T_{\varepsilon}P + 1)} = \frac{1}{0,0042(0,059P + 1)} = \frac{238,1}{1 + 0,059P}$$

$$R^*_{\varepsilon} = \frac{R_{\varepsilon}}{R_0} = \frac{0,325}{76,92} = 0,0042$$

где R_{ε} – сопротивление роторной цепи в относительных единицах.

Передаточная функция преобразователя частоты:

$$W_n = \frac{K^*_{nc}}{T_{nc}P + 1} = \frac{0,026}{1 + 0,01P},$$

$$\text{где } K^*_{nc} = K_{nc} \frac{U'_0}{E_0} = 157 \frac{10}{6000} = 0,026$$

Коэффициент обратной связи по скорости в относительных единицах:

$$K^*_{oc} = K_{oc} \frac{\Omega_b}{U_b} = 0,064 \frac{157}{10} = 1,005$$

Передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{pc}(P) = \frac{(T_\Delta P + 1)T_M}{K_{oc.s.K_{nc}} * a_T T_\mu} = 102,01(1 + 0,059P)$$

На рисунке 2.10 изображена структурная схема в относительных величинах.

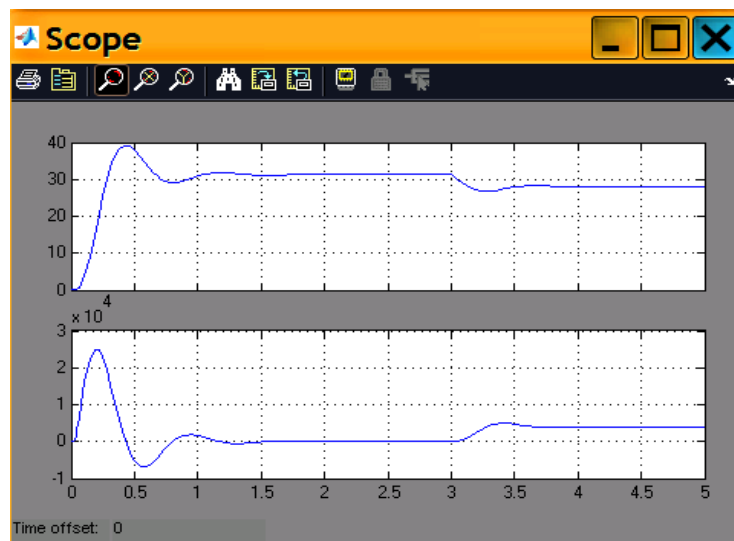


Рисунок 2.10- Структурная схема в относительных величинах

2.8 Анализ системы управления

В замкнутой системе регулирования электропривода имеется возможность формировать переходные процессы, достаточно близкие к оптимальным, путём плавного изменения частоты напряжения протекающего по обмоткам статора.

При действии возмущающего воздействия появляется статическая ошибка регулирования по скорости

$$\Delta\omega_{ст} = \frac{M_c}{\beta} .$$

Длительность переходного начального участка зависит от электромеханической постоянной T_M [12], причем при $T_\Delta=0$ момент нарастает до значения $M_{п.уст}$ за время равное $3T_M$.

На рисунке 2.11 изображена Схема протестирования в MathLab.

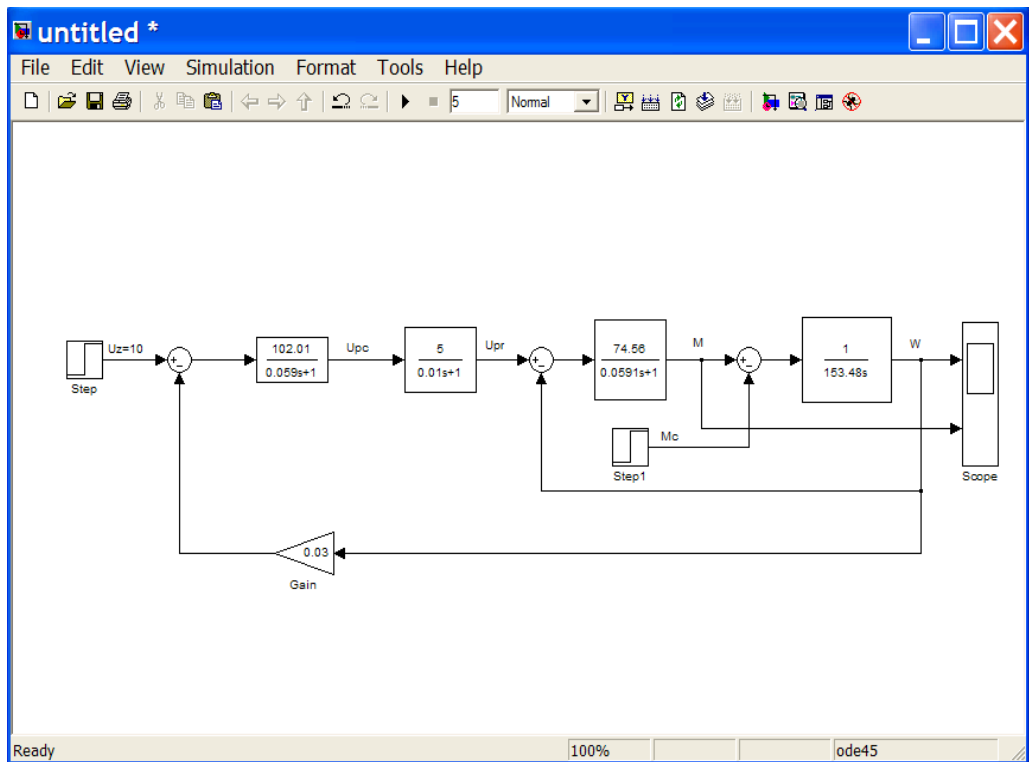


Рисунок 2.11- Виртуальная модель управления

Затем затухания свободной составляющей, скорость нарастает по линейному закону, отставая от кривой $\omega_0 t$ на значение равное $\Delta\omega_{\Sigma} = \Delta\omega_{CT} + E_0 T_M$

Таким образом, задаваемый на входе системы закон изменения скорости воспроизводится с ошибкой, которая в установившемся процессе складывается из ошибки, равной статическому падению скорости и ошибки равной динамическому падению.

$$\Delta\omega_{CT} = \frac{M_C}{\beta}$$

$$\Delta\omega_{дин} = \frac{J_{\Sigma} E_H}{\beta}$$

Ускорение двигателя определяется:

$$E_H = \frac{\omega_H}{t_H} = \frac{155,1}{15,147} = 10,23 (рад/c^2)$$

$$\Delta\omega_{CT} = \frac{M_C}{\beta} = \frac{437,83}{74,56} = 5,8$$

$$\frac{\Delta\omega_{CT}}{\omega_H} * 100\% = \frac{5,8}{155,1} * 100\% = 3,74\%$$

$$\Delta\omega_{дин} = \frac{J_{\Sigma} E_H}{\beta} = \frac{153,48 * 10,23}{74,56} = 2,05$$

$$\Delta\omega_{\Sigma} = \Delta\omega_{ст} + \Delta\omega_{дин} = 5,8 + 2,05 = 7,85$$

$$3T_M = 6,15(c)$$

Из выше сказанного, видно, что статическая ошибка не превышает 5% и удовлетворяет настройке системы управления на «модульный оптимум».

3 Технико-экономическая часть

В рамках технико-экономического обоснования был выполнен сравнительный анализ стоимости двух альтернативных решений, а также произведено сопоставление годовых эксплуатационных затрат, связанных с

потерями электрической энергии.

Определение разницы в стоимости электрооборудования систем управления.

Цены на электрооборудование были получены из открытых источников, в том числе из прайс-листов американской компании Workman и немецкой компании Schneider Electric за 2024–2025 годы. Сравнительная стоимость оборудования для двух вариантов электропривода представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Стоимость оборудования приводов

Система управления Г-Д		Система управления ТП-Д	
Наименование оборудования	Стоимость за единицу оборудования, тыс. тенге	Наименование оборудования	Стоимость за единицу оборудования, тыс. тенге
Приводной двигатель ПБС-62	115	Тиристорный преобразователь (Т-15-3-332-1,75)	100
Генератор ГПЭ-5	158	Двигатель ПБСТ-62	118
Двигатель ПБСТ-62	118		
Общая сумма	391	Общая сумма	218
Разница	173		

Таким образом, из таблицы видно, что система управления ТП-Д на сумму 173 тыс. тенге обойдется нам дешевле, чем система Г-Д.

Определение годовых затрат на потери электроэнергии

Для начала необходимо определить номинальные потери ΔP_H в системах управления электроприводом с учетом коэффициента полезного действия.

$$\Delta P_H = P_H \cdot \frac{1 - \eta}{\eta}, \quad (3.1)$$

где P_H - номинальная мощность двигателя;

η - коэффициент полезного действия двигателя.

Далее следует определить потери холостого хода ΔP_{XX} и номинальные нагрузочные потери ΔP_{HH} :

$$\Delta P_{XX} = 0,55 \cdot \Delta P_H \quad (3.2)$$

$$\Delta P_{HH} = 0,67 \cdot \Delta P_H \quad (3.3)$$

Максимальные потери активной мощности определяются следующим образом:

$$\Delta P_M = \Delta P_{XX} + \Delta P_{HH} \cdot K_3^2, \quad (3.4)$$

где K_3 - коэффициент загрузки двигателя, $K_3 = 0,8$.

Средние потери активной мощности ΔP_C , рассматриваемого привода могут быть определены по следующей формуле:

$$\Delta P_C = \Delta P_M \cdot \tau, \quad (3.5)$$

где τ - относительное время использования максимума потерь

$$\tau = 0,7 \cdot \frac{T_M}{T_\Gamma} \quad (3.6)$$

где ΔP_M - максимальные потери активной мощности.

Годовые потери электроэнергии можем определить из выражения:

$$\Delta W = \Delta P_C \cdot T_\Gamma, \quad (3.7)$$

где T_Γ - годовое время работы оборудования.

Годовые затраты на потери электроэнергии в рассматриваемых элементах электропривода определяются:

$$C_{\Sigma\Sigma} = \Delta W \cdot T_\Sigma, \quad (3.8)$$

где T_Σ - тариф на электроэнергию, $T_\Sigma = 8 \text{ тг/кВтч}$ (тариф взят для рассматриваемого региона).

Полученные результаты вычисления сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты вычисления затрат на потери электроэнергии

Наименование параметра	Система ТП-Д	Система Г-Д
------------------------	--------------	-------------

КПД, %	0,87	0,66
P_H , кВт	4,7	14,4
ΔP_H , кВт	0,7	7,42
ΔP_{HH} , кВт	0,47	4,97
ΔP_{XX} , кВт	0,39	4,08
ΔP_M , кВт	0,69	7,26
ΔP_C , кВт	0,414	4,36
T_G , ч	7000	7000
ΔW , кВтч	2898	30520
C_3 , тенге	23184	244160
Разница, тенге	220976	

Разница в 220976 тенге затрат на потери электроэнергии в год между системами, говорит о том что система ТП-Д экономичнее системы Г-Д.

Таким образом, даже по двум показателям можно выбрать наиболее экономически выгодный вариант системы управления, которым является система тиристорный преобразователь – двигатель (ТП-Д). Опуская вычисления остальных экономических показателей, основываясь на том, что они относительно мало отличаются для сравниваемых вариантов и уже из рассмотренных показателей явно виден экономичный вариант системы управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведённой работы была реализована модернизация привода конвейерной линии с использованием частотного преобразователя типа ТРИОЛ. Данный подход обеспечил возможность гибкого регулирования частоты вращения асинхронного электродвигателя, что особенно актуально в современных производственных условиях, где требуется точная настройка параметров движения в зависимости от технологических задач.

Применение частотно-регулируемых приводов получило широкое распространение в различных отраслях промышленности – от горнодобывающей и металлургической до машиностроения – благодаря своей высокой энергоэффективности, надёжности и возможности интеграции в системы автоматического управления технологическими процессами (АСУ ТП). В отличие от устаревших методов регулирования, таких как переключение числа пар полюсов, частотные преобразователи позволяют реализовать непрерывное управление скоростью в широком диапазоне с минимальными динамическими перегрузками.

В ходе анализа работы существующей конвейерной линии были выявлены узкие места, требующие модернизации. На основании расчётов и анализа нагрузки был произведён подбор электродвигателя и сопутствующего оборудования, соответствующего условиям эксплуатации. Особое внимание было уделено выбору частотного преобразователя – его типа, мощности и стоимости, что является одним из ключевых факторов при проектировании и внедрении систем электропривода.

После построения обновлённой схемы конвейерной установки была выполнена имитационная модель рабочего цикла в среде MATLAB/Simulink, что позволило подтвердить работоспособность предложенного решения, а также оценить поведение системы в различных режимах.

Таким образом, модернизированная система управления приводом конвейера с использованием ПЧ ТРИОЛ отвечает современным требованиям к энергоэффективности, надёжности и адаптивности, а разработанный проект может быть рекомендован для внедрения на предприятиях с аналогичными условиями эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гульков Г.И., Петренко Ю.Н., Раткевич Е.П., Симоненкова О.Л. Системы автоматизированного управления электроприводом: Учеб. Пособие. Под общ. Ред. Петренко Ю.Н. – Мн.: Новое знание, 2004. -384 с.: ил.
- 2 Электротехника: Учебное пособие для вузов. – В 3-х книгах. Книга III. Электроприводы. Электроснабжение/ Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестокова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005,-639 с.
- 3 Тамбовцев А.Ф., Клемперт А.Н. Автоматизированный электропривод конвейерных установок. - Екатеринбург, 1991г.
- 4 Князевский Б.А. «Охрана труда в электроустановках».— 3 изд., перераб. и доп. – Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.
- 5 Способическое пособие для выполнения вычисления по охране труда в дипломных проектах. Н. Новгород, 2000. 67 с.
- 6 Долин П.А. Справочник по технике безопасности. -6-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
- 7 Санатова Т.С., Мананбаева С.Е. Безопасность жизнедеятельности. Способические указания к выполнению раздела «Электробезопасность в электроустановках» в выпускных работ.
- 8 Двоскин Л. И. Схемы и конструкции распределительных устройств. Москва: Энергия, 1974. – 222 с.
- 9 Инвестиционное проектирование: практическое руководство по экономическому обоснованию инвестиционных проектов. Под редакцией Шумилина С.И. М.: Финстатинформ, 1995. -234 с.
- 10 Баканов М.И., Шеремет А.Д. Теория экономического анализа. - М.: Финансы и статистика, 1998
- 11 Идрисов А.Б. Планирование и анализ инвестиционных проектов. - М., 1994.
- 12 Жакупов А.А. Организация и планирование производства, управление предприятием. Способические указания к выполнению курсовой работы. Алматы 2004г.
- 13 Жакупов А.А., Хижняк Р.С. Способические указания по выполнению вычисленияно-графической работы. Алматы 2005г.
- 14 СТ КазННТУ – 09 – 2023. Учебная работа. Общие требования к структуре, оформлению, изложению и содержанию текстовых и графических материалов.