

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»

Ихласов Даурен Бакытжанұлы

Автоматизированный электропривод пластинчатого конвейера дробильно-сортировочного
цеха

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6В07101– Энергетика

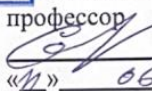
Алматы 2025

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	ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»	Заведующий кафедрой
Институт энергетики	«Энергетика»
и машиностроения	PhD, ассоциированный
	профессор
	 Е.А. Сарсенбаев
	«11» 06 2025г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Автоматизированный электропривод пластинчатого конвейера дробильно-
сортировочного цеха

6B07101– Энергетика

Выполнил:

Ихласов Д.Б.



Рецензент
PhD, ассистент профессор
Ж.Ж. Калиев
«05» 06 2025 г.

Научный руководитель
PhD, ассоциированный профессор
С.А. Минажова
«05» 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

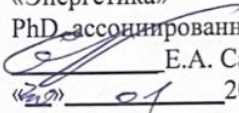
Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева
Кафедра «Энергетика»

6В07101– Энергетика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Энергетика»

PhD, ассоциированный профессор

 Е.А. Сарсенбаев

«22» 01 2025г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Ихласов Даурен Бакытжанұлы

Тема: Автоматизированный электропривод пластинчатого конвейера дробильно-сортировочного цеха

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

Срок сдачи законченной работы «19» мая 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: Производительность конвейера $Q=1.5\text{ м}^3/\text{ч}$, минимальная масса детали = 60 кг, максимальная масса детали = 500 кг, скорость конвейера = 0,005 – 0,05 м/сек, длина конвейера = 24 м.

Краткое содержание дипломной работы: Аналитическая часть, расчет и выбор электродвигателя, преобразователя, редуктора и дросселя, расчет характеристик замкнутых и разомкнутых систем, исследование переходных процессов, экономическое сравнение схем Г-Д и ТП-Д, по результатам которого определён более эффективный вариант.

Графические материалы дипломной работы представлены в 10 слайдах.

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

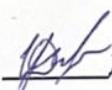
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретическая часть	10.02 - 19.03.2025	—
Основная расчетная часть	10.03 - 21.04.2025	—
Экономическая часть	07.04 - 30.04.2025	—

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	04.06.2025	

Научный руководитель  С.А. Минажова

Задание принял к исполнению обучающийся  Д.Б. Ихласов

Дата " 19 " мая 2025г.

АННОТАЦИЯ

В дипломном проекте разработана система управления электроприводом пластинчатого конвейера для дробильно-сортировочного цеха. Выполнен выбор основных элементов: электродвигателя, тиристорного преобразователя, редуктора и сглаживающего дросселя. Рассчитаны характеристики замкнутых и разомкнутых систем. Проведено сравнение схем Г–Д и ТП–Д, по результатам которого определён более эффективный вариант. Срок окупаемости выбранной системы составил два года. Решение позволяет повысить надёжность, снизить потери энергии и стабилизировать работу оборудования.

АҢДАТПА

Дипломдық жобада ұсақтап-сұрыптау цехына арналған пластинкалы конвейердің электр жетегін басқару жүйесі әзірленді. Электр қозғалтқышы, тиристорлы түрлендіргіш, редуктор және тегістеу дросселі сияқты негізгі элементтер тандалды. Ашық және жабық жүйелердің сипаттамалары есептелді. Г–Д және ТП–Д схемалары салыстырылып, тиімдірек нұсқа анықталды. Тандалған жүйенің өтелу мерзімі екі жылды құрады. Бұл шешім жабдықтың сенімділігін арттыруға, энергия шығындарын азайтуға және жұмысты тұрақтандыруға мүмкіндік береді.

ANNOTATION

The diploma project developed a control system for the electric drive of a plate conveyor used in a crushing and screening plant. The main components were selected: electric motor, thyristor converter, gearbox, and smoothing reactor. Characteristics of open and closed-loop systems were calculated. A comparison of G–D and TP–D schemes was conducted, with the more efficient option identified. The payback period for the selected system is two years. The solution improves reliability, reduces energy losses, and stabilizes equipment operation.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	7
1	Производственные процессы и работа оборудования	9
1.1	Технологический процесс	9
1.2	Описание пластинчатого конвейера	10
1.3	Функционирование пластинчатого конвейера	11
1.4	Типы электроприводов, предназначенных для конвейеров. Принципы работы, достоинства и недостатки	20
2	Определение и подбор компонентов системы автоматического электропривода	14
2.1	Расчет и выбор двигателя для конвейера	14
2.2	Расчет параметров якорной цепи двигателя	19
2.3	Выбор редуктора	20
2.4	Выбор преобразователя	20
2.5	Выбор сглаживающего дросселя	26
2.6	Определение и графическое представление характеристик регулирования преобразователя	28
2.7	Формирование схемы функционирования системы автоматического регулирования	29
2.8	Расчет электромеханических характеристик разомкнутой системы	31
2.9	Определение и графическое представление характеристик электропривода с обратной связью по скорости и ограничением тока	34
2.10	Пример расчета статических характеристик управляемого выпрямителя с применением приложения "MathCAD"	38
2.11	Анализ переходных процессов системы стабилизации скорости электропривода постоянного тока	39
3	Технико-экономическая часть	46
3.1	Сравнительный анализ стоимости электрооборудования систем управления	46
3.2	Определение годовых затрат на потери электроэнергии	46
	Заключение	49
	Список использованной литературы	50

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных промышленных технологий невозможно представить без широкого применения электроприводов, которые являются неотъемлемой частью автоматизированных систем управления и механизации производственных процессов. Электропривод представляет собой совокупность устройств, обеспечивающих преобразование электрической энергии в механическое движение, что позволяет управлять работой исполнительных механизмов с высокой точностью и эффективностью. Он нашёл широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря своей универсальности, надёжности и способности функционировать в разнообразных условиях.

История развития электроприводов охватывает более века. Первоначально они представляли собой простые схемы, основанные на управлении мощностью вручную. Однако по мере совершенствования электрических машин и систем автоматического регулирования электроприводы начали приобретать более сложные и интеллектуальные формы. С появлением тиристорных и частотно-регулируемых преобразователей в конце XX века появилась возможность плавного изменения скорости вращения, направления движения и крутящего момента, что значительно повысило точность и адаптивность работы механизмов. В настоящее время электроприводы могут быть оснащены цифровыми системами управления, позволяющими интеграцию в промышленные сети и автоматизированные комплексы управления технологическими линиями.

Особое значение электроприводы приобрели в системах транспортировки материалов, включая ленточные и пластинчатые конвейеры, применяемые в горнодобывающей, металлургической и строительной отраслях. В частности, в дробильно-сортировочных цехах, где переработка сырья требует непрерывной подачи и сортировки материалов, электроприводы обеспечивают бесперебойную работу транспортных линий. Их внедрение позволило повысить производительность, снизить трудозатраты и уменьшить износ оборудования за счёт более плавного пуска, точного регулирования скорости и торможения.

Использование электроприводов в дробильно-сортировочных установках началось в первой половине XX века, когда появилась необходимость в механизации тяжёлых процессов сортировки и дробления полезных ископаемых. Ранние модели приводов использовались преимущественно для обеспечения постоянного вращения конвейерных лент. С развитием технологий в 1960–1980-х годах появились более совершенные приводы с возможностью регулировки скорости и защиты от перегрузок. Это стало особенно актуальным в условиях переменного объёма подаваемого материала и необходимости согласования работы различных узлов технологической линии.

Применение электроприводов в конвейерных системах не только улучшило условия труда, но и позволило автоматизировать значительную часть производственного процесса. Внедрение современных приводных систем даёт

возможность точно управлять динамикой движения ленты, предотвращать аварийные ситуации и оптимизировать энергопотребление. Кроме того, использование интеллектуальных систем управления позволяет отслеживать техническое состояние оборудования в режиме реального времени, что повышает общую надёжность и снижает затраты на обслуживание.

Таким образом, электропривод играет ключевую роль в повышении эффективности и надёжности конвейерных установок, особенно в условиях интенсивной и непрерывной эксплуатации, характерной для дробильно-сортировочных цехов. Его развитие продолжает оказывать значительное влияние на совершенствование производственных процессов и внедрение автоматизированных решений в различных отраслях промышленности.

Цель данной дипломной работы – расчет и проектирование автоматизированного электропривода пластинчатого конвейера дробильно-сортировочного цеха.

Задачи данной дипломной работы:

- провести теоретический обзор технологического процесса пластинчатого конвейера;
- определить и выбрать компоненты системы автоматизированного электропривода;
- рассчитать и выбрать электрооборудования системы электропривода;
- определить характеристики регулирования преобразователя;
- рассчитать механических характеристик системы электропривода;
- проанализировать переходные процессы в системе электропривода;
- провести технико-экономический анализ.

1 Производственные процессы и работа оборудования

1.1 Технологический процесс

Дробильно-сортировочный цех представляет собой производственный участок, основная задача которого заключается в измельчении, сортировке и подготовке горной массы или других сыпучих материалов к дальнейшей переработке или использованию. В таких цехах осуществляется последовательное дробление крупных кусков породы до требуемой фракции, а также разделение материала по размерам с использованием грохотов. Работа ДСЦ построена на непрерывной подаче сырья, чётко организованной схеме транспортировки и эффективной координации между различными агрегатами.

Процесс начинается с приёмки исходного материала, доставляемого из карьеров или шахт. На первом этапе материал подаётся в бункеры-накопители, откуда он направляется в оборудование для крупного дробления (например, щёковые дробилки). После первичной переработки полученная масса поступает на конвейеры, доставляющие её к агрегатам среднего и мелкого дробления. Далее задействуются сортировочные установки, отделяющие готовую продукцию по размеру. Частицы, не соответствующие установленным параметрам, возвращаются на повторное дробление, обеспечивая замкнутый цикл переработки.

Важным элементом транспортной инфраструктуры цеха являются пластинчатые конвейеры, которые используются на наиболее ответственных участках, таких как приём и подача материала в дробилки. Эти транспортные системы состоят из металлических пластин, закреплённых на тяговой цепи, что придаёт конструкции высокую прочность и устойчивость к воздействию агрессивной среды и ударным нагрузкам.

Пластинчатые конвейеры, как правило, применяются для подачи негабаритных и абразивных пород, особенно в зоне первичного дробления, где другие типы транспортных систем (например, ленточные) не справляются с большими кусками материала или интенсивной загрузкой. Они незаменимы при перемещении тяжёлых и остроугольных фрагментов породы, которые могут повредить более чувствительное оборудование.

Одним из главных преимуществ пластинчатых конвейеров является их высокая износостойкость и способность работать в условиях повышенной запылённости и влажности. Конструкция отличается надёжностью, устойчивостью к заклиниванию и простотой обслуживания. В отличие от ленточных конвейеров, пластинчатые модели лучше переносят температурные перепады и не требуют частой замены полотна. Кроме того, они могут работать при значительных углах наклона, что расширяет возможности их применения в сложной конфигурации производственных площадок.

Таким образом, пластинчатые конвейеры играют важную роль в обеспечении стабильности технологического процесса ДСЦ, особенно на начальных стадиях дробления, где прочность и надёжность транспортной

системы имеют ключевое значение. Их использование способствует повышению общей эффективности работы цеха и снижению эксплуатационных затрат.

1.2 Описание пластинчатого конвейера

Основным элементом пластинчатого конвейера является подвижное полотно, которое состоит из металлических пластин, жёстко закреплённых на тяговой цепи (Рисунок 1.1). Эта цепь движется по замкнутому контуру и передаёт движение пластинам, перемещая груз от точки загрузки до места выгрузки. Движение осуществляется с помощью приводной станции, в состав которой входят электродвигатель, редуктор и приводная звёздочка. Цепь натягивается и стабилизируется с помощью натяжной станции, обеспечивающей необходимое усилие для плавной и бесперебойной работы. Полотно может быть гладким или снабжено продольными бортиками, препятствующими соскальзыванию груза при транспортировке под углом. Сами конвейеры могут быть прямолинейными, криволинейными или наклонными, что позволяет гибко адаптировать их к конфигурации производственного участка.



Рисунок 1.1 – Общий вид пластинчатого конвейера

Пластинчатые конвейеры особенно широко применяются в зонах первичной переработки, таких как дробильно-сортировочные цеха. Здесь они выполняют функцию подачи крупнокускового материала к щёковым или роторным дробилкам. Благодаря высокой устойчивости к ударным нагрузкам, данные конвейеры эффективно работают с тяжелой и абразивной породой, которую не выдерживают ленточные транспортёры. Кроме того, они

применяются для равномерной дозированной подачи материала, что особенно важно в автоматизированных технологических линиях.

Функционирование привода пластинчатого конвейера играет ключевую роль в надёжности всей системы. Приводные устройства обеспечивают равномерное движение полотна, предотвращают рывки, пробуксовки и перегрузки. Основное преимущество цепного привода заключается в его способности передавать большое тяговое усилие и работать в условиях повышенной запылённости, влажности и температур. Такие приводы устойчивы к заклиниванию и могут функционировать даже при наличии загрязнений на рабочих элементах. Кроме того, возможна установка нескольких приводных станций на одном конвейере для увеличения его длины и производительности.

Однако наряду с преимуществами существует ряд недостатков. Прежде всего, это значительная масса подвижных компонентов, что требует использования мощных электродвигателей и более прочных конструкций опор. Также необходимо учитывать повышенные требования к техническому обслуживанию: цепи, шарнирные соединения и направляющие элементы нуждаются в регулярной смазке, проверке и при необходимости — замене. По сравнению с ленточными аналогами пластинчатые конвейеры имеют более низкую скорость движения, что может ограничивать производительность при перемещении мелкофракционного материала на большие расстояния.

В целом, пластинчатые конвейеры являются эффективным решением в условиях тяжёлых производственных нагрузок. Их применение обеспечивает надёжную и устойчивую транспортировку материала, снижает вероятность аварийных ситуаций и позволяет автоматизировать важнейшие этапы технологического процесса, особенно в цехах с интенсивной переработкой крупного и тяжёлого сырья.

1.3 Функционирование пластинчатого конвейера

При работе пластинчатого конвейера в условиях дробильно-сортировочного цеха приводной электродвигатель сталкивается с необходимостью преодоления значительной статической нагрузки, возникающей в результате действия сил трения во всех подвижных узлах установки. Основные источники трения включают подшипники вращающихся элементов, участки контакта катков и направляющих, а также участки изгиба тягового элемента, который в пластинчатом транспортере, как правило, представляет собой цепную конструкцию. Учитывая протяжённость трассы конвейера и значительное количество движущихся компонентов, суммарная сила сопротивления движению может достигать высоких значений даже при холостом ходе.

Все элементы управления электроприводом и защитное электрооборудование размещаются в шкафу управления, обычно

установленном в защищённой зоне цеха. Приводной двигатель, обеспечивающий движение цепного механизма, как правило, устанавливается вблизи загрузочной зоны или приёмного бункера. Условия эксплуатации в дробильно-сортировочном производстве характеризуются повышенной запылённостью, вибрациями и возможной влажностью, поэтому к надёжности привода предъявляются повышенные требования.

Кроме того, в зоне первичного дробления может наблюдаться повышение температуры окружающей среды, особенно при замкнутом пространстве и интенсивной работе оборудования. В подобных условиях электродвигатель должен обеспечивать надёжный запуск при высоких сопротивлениях покоя. Это особенно актуально для пластинчатых конвейеров, поскольку на старте часто требуется преодоление застойных усилий, вызванных слипанием мелких фракций материала, заклиниванием катков или загустеванием смазки в соединениях. Поэтому двигатель должен обладать повышенным пусковым моментом, превышающим номинальные значения.

Технологический процесс подачи горной массы к дробильному оборудованию требует не только надёжной работы транспортного устройства, но и стабильности его скорости. Это обеспечивает равномерную загрузку дробилок и грохотов, предотвращает перегрузки и холостые простои. Для достижения этих целей применяется система автоматического управления электроприводом (АСУЭП), которая регулирует параметры в зависимости от условий текущей загрузки. Такая система представляет собой замкнутый контур управления с подчинённым регулированием, где основным регулируемым параметром является скорость движения полотна.

Замкнутая система электропривода должна удовлетворять как требованиям надёжности и минимального обслуживания, так и обеспечить заданные статические и динамические характеристики. Статическая характеристика отражает зависимость скорости привода от момента сопротивления, возникающего при изменении массы и формы перемещаемого материала. Она формируется с использованием обратной связи по скорости, что позволяет снижать отклонения выходного параметра при изменении внешней нагрузки.

Динамические свойства системы, в свою очередь, описывают поведение привода в переходных режимах: запуск, остановка, изменение скорости и нагрузки. Качество работы системы в этих условиях определяется такими показателями, как быстродействие, величина перерегулирования и уровень колебательности. Анализ переходного процесса позволяет оценить степень адаптивности привода к реальным условиям работы в цехе, где внешние возмущения, вызванные изменениями потока материала, происходят постоянно.

Быстродействие системы электропривода оценивается временем t_n вхождения скорости в 5 % область установившегося значения переменной.

$$\frac{\omega(t) - \omega_{уст}}{\omega_{уст} - \omega_{нач}} = \frac{\Delta\omega(t) - \Delta\omega_{уст}}{\Delta\omega_{уст}} \leq a, \quad (1.1)$$

где $\Delta\omega(t)$, $\omega(t)$ – изменение скорости или ее приращение во времени;
 $\omega_{уст}$, $\omega_{нач}$ – установившееся и начальное значение скорости;
 $\Delta\omega_{уст}$ – приращение скорости от начального до установившегося значения;
 a – установленная точность окончания переходного процесса, обычно a принимается в пределах (0,03 – 0,05).

Повышение быстродействия повышает производительность работы конвейера, снижает динамические ошибки при возмущении по нагрузке, поэтому t_n будет стремиться к минимуму.

Следующий показатель качества системы – перерегулирование δ . Перерегулирование δ показывает максимальное отклонение регулируемой величины в переходном процессе от ее установившегося значения. Оно может определяться по значениям переменных и по их приращениям и обычно выражается в процентах:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100, \quad (1.2)$$

$$\delta = \frac{\Delta\omega_{\max} - \Delta\omega_{уст}}{\Delta\omega_{уст}} \cdot 100, \quad (1.3)$$

где $\omega_{\max}$, $\Delta\omega_{\max}$ – максимальные значения скорости и ее приращение в переходном процессе;
 $\omega_{уст}$, $\Delta\omega_{уст}$ – установившееся значение скорости и ее приращение.

Перерегулирование для конвейера дробильно-сортировочного цеха $\delta \leq 20\%$.

Число колебаний регулируемой величины в течение времени переходного процесса примем равным 3.

Исходя из технологии и данных требований, выберем и рассчитаем все элементы автоматизированного электропривода.

2 Определение и подбор компонентов системы автоматического электропривода

2.1 Расчет и выбор двигателя для конвейера

Исходные данные:

Производительность конвейера $Q = 1,5$ т/ч

Минимальная масса детали $m = 60$ кг

Максимальная масса детали $m = 500$ кг

Скорость конвейера $v = 0,005 - 0,05$ м/сек

Длина конвейера $l = 24$ м

Будем рассматривать пластинчатый конвейер для транспортировки штучных грузов. Расчет конвейера проведем в два этапа:

1. предварительное определение основных параметров конвейера и его ходовой части;
2. проверочный расчет конвейера и выбор двигателя.

Предварительное определение основных параметров конвейера и его ходовой части:

Для заданного конвейера выбираем средний плоский стальной швеллерный настил. Из таблицы 6 [5] выберем ширину бортов $h = 100$ мм.

Найдем ширину настила

$$B = (1,7 \cdot a + 200), \text{ мм} \quad (2.1)$$

$$B = (1,7 \cdot 584 + 200) = 1193 \text{ мм},$$

где $a = 584$ мм – наибольший размер крупных кусков.

По таблице 26 [5] выбираем ширину настила $B = 1200$ мм – ГОСТ 22281-76.

Определим линейную нагрузку от ходовой части конвейера

$$g_0 = 60 \cdot B + A, \text{ Н/м} \quad (2.2)$$

$$g_0 = 60 \cdot 1,2 + 100 = 172 \text{ Н/м},$$

где $B = 1,2$ м – ширина настила;

$A = 100$ - электрический коэффициент.

Найдем расстояние между соседними грузами

$$a = \frac{3,6 \cdot m \cdot g}{Q}, \text{ м} \quad (2.3)$$

$$a = \frac{3,6 \cdot 60 \cdot 0,05}{1,5} = 0,02 \text{ м}$$

Определим линейную нагрузку от штучного груза

$$g_z = g \cdot m / a, \text{ Н/м} \quad (2.4)$$

$$g_z = 9,81 \cdot 60 / 0,02 = 29400 \text{ Н/м},$$

где m – масса единицы груза;

a – расстояние между соседними грузами.

Определим максимальное натяжение в тяговых цепях

$$S_{\max} = 1,1 \cdot (S_0 + \omega \cdot [(g_0 + g_z) \cdot L_2 + g_0 \cdot L_x] + g + g_0), \text{ Н} \quad (2.5)$$

$$S_{\max} = 1,1 \cdot (1000 + 0,08 \cdot [(29400 + 172) \cdot 24 + 172 \cdot 24] + 9,81 + 172) = 61906,2$$

где $S_0 = 1000 \text{ Н}$ – начальное натяжение цепей;

$L_2 = 24 \text{ м}$ – горизонтальная проекция длины загруженной ветви конвейера;

$L_x = 24 \text{ м}$ – горизонтальная проекция длины холостой ветви конвейера;

$\omega = 0,08$ – коэффициент сопротивления движению ходовой части;

g_0 – линейная нагрузка от ходовой части конвейера;

g_z – линейная нагрузка от штучного груза.

При одной тяговой цепи $S_{\max} = S_{\text{расч}}$, а так как у нас две тяговые цепи, то с учетом неравномерности нагрузки мы имеем:

$$S_{\text{расч}} = \frac{1,5 \cdot S_{\max}}{2}, \text{ Н} \quad (2.6)$$

$$S_{\text{расч}} = \frac{1,5 \cdot 61906,2}{2} = 46429,6 \text{ Н}$$

По полученному результату можно выбрать тяговую цепь.

Проверочный расчет конвейера и выбор двигателя:

Рассчитаем сопротивление на горизонтальном участке

$$W_{\text{гг}} = (g_z + g_0) \cdot L_g \cdot \omega, \text{ Н} \quad (2.7)$$

$$W_{\text{гг}} = (29400 + 172) \cdot 24 \cdot 0,08 = 56778,2 \text{ Н}$$

Рассчитаем сопротивление на горизонтальном участке для незагруженной ветви

$$W_{\text{гн}} = g_0 \cdot L_n \cdot \omega, \text{ Н} \quad (2.8)$$

$$W_{\text{гн}} = 172 \cdot 24 \cdot 0,08 = 330,2 \text{ Н}$$

Определим сопротивление на звездочках

$$W_{\text{зв}} = S_{\text{зв}} \cdot (\zeta - 1), \text{ Н} \quad (2.9)$$

$$W_{\text{зв}} = 1000 \cdot (1,05 - 1) = 50 \text{ Н},$$

где $\zeta = 1,05$ - коэффициент сопротивления на звездочках.

Найдем сопротивление от трения груза о неподвижные борта

$$W_{\delta} = 1000 \cdot \rho \cdot h^2 \cdot f' \cdot L \cdot g, \text{ Н} \quad (2.10)$$

$$W_{\delta} = 1000 \cdot 0,2 \cdot 0,1^2 \cdot 0,2 \cdot 102 \cdot 9,81 = 399,84 \text{ Н},$$

где $h = 0,1$ м – высота бортов;

$f' = 0,2$ - коэффициент трения груза о борт, [8]

$L = 102$ м – длина бортов.

Определим величину тягового усилия

$$P_{\text{см}} = \sum W = W_{\text{гг}} + W_{\text{гн}} + W_{\text{зв}} + W_{\delta}, \text{ Н} \quad (2.11)$$

$$P_{\text{см}} = 56778,2 + 330,2 + 50 + 399,84 = 57558,3 \text{ Н}$$

Далее находим наибольшее статическое натяжение тяговых цепей

$$S_{\text{см}} = (S_0 + \sum W) \cdot 1,05, \text{ Н} \quad (2.12)$$

$$S_{cm} = (1000 + 57558,3) \cdot 1,05 = 58558,2 \text{ Н}$$

При скорости $v \leq 0,16 \text{ м/сек}$ динамическими усилиями можно пренебречь, тогда можно считать что $S_{\max} = S_{cm}$.

Определим расчетное усилие для двух цепей

$$S_{расч} = \frac{1,5 \cdot S_{\max}}{2}, \text{ Н} \quad (2.13)$$

$$S_{расч} = \frac{1,5 \cdot 58558,2}{2} = 43918,7 \text{ Н}$$

По величине расчетного усилия $S_{расч}$, полученного проверочным расчетом, проверяют принятые цепи по условию

$$S_{разр} \geq S_{расч} \cdot \kappa \quad (2.14)$$

$$S_{разр} \geq 43918,7 \cdot 6 = 263512,08 \text{ Н},$$

где $S_{разр}$ - разрушающая нагрузка одной цепи;

κ - коэффициент запаса прочности цепи, $\kappa = 6$.

Найдем натяжение в различных точках трассы. Определим натяжение тяговых цепей в точке 1

$$S_1 = S_{\min}, \text{ Н} \quad (2.15)$$

$$S_1 = 1000, \text{ Н}$$

Рассчитаем натяжение тяговых цепей в точке 2

$$S_2 = S_1 + g_0 \cdot g \cdot l \cdot \omega, \text{ Н} \quad (2.16)$$

$$S_2 = 1000 + 172 \cdot 9,81 \cdot 24 \cdot 0,08 = 3336,35 \text{ Н}$$

Проведем расчет натяжения тяговых цепей в точке 3

$$S_3 = \kappa \cdot S_2, \text{ Н} \quad (2.17)$$

$$S_3 = 1,1 \cdot 3336,35 = 3559,9 \text{ Н}$$

Далее определим натяжение тяговых цепей в точке 4

$$S_4 = S_3 + (g_z + g_0) \cdot (l_2' + \omega \cdot g), \text{ Н} \quad (2.18)$$

$$S_4 = 3559,9 + (29400 + 172) \cdot (24 \cdot 0,08 \cdot 9,81) = 62953,99 \text{ Н}$$

Рассчитаем окружное усилие на звездочке

$$P = S_{\max} - S_0, \text{ Н} \quad (2.19)$$

$$P = 62953,99 - 1000 = 61953,99 \text{ Н}$$

Определим мощность электродвигателя конвейера

$$N = \frac{P \cdot g}{1000 \cdot \eta}, \text{ кВт} \quad (2.20)$$

$$N = \frac{61953,99 \cdot 0,05}{1000 \cdot 0,85} = 3,6 \text{ кВт}$$

По каталожным данным выбрали двигатель ПБСТ-62 со встроенным тахогенератором ПТ-1. Заводские данные двигателя:

Номинальная мощность двигателя	$P = 4,7 \text{ кВт}$
Номинальное число оборотов	$n_n = 1000 \text{ обор/мин}$
Номинальное напряжение якорной цепи	$U_{ян} = 220 \text{ В}$
Номинальный ток якорной цепи	$I_{ян} = 21,2 \text{ А}$
Сопротивление якорной цепи	$R_я = 0,344 \text{ Ом}$
Число пар полюсов	$2P = 4$
Коэффициент полезного действия	$\eta = 0,87$

Определим частоту вращения приводных звездочек

$$n_{зз} = \frac{60 \cdot g}{Z \cdot t_y}, \text{ обор/мин} \quad (2.21)$$

$$n_{зз} = \frac{60 \cdot 0,05}{6 \cdot 0,2} = 2,5 \text{ обор/мин,}$$

где $Z = 6$ - число зубьев звездочки;

$t_{\text{ц}} = 0,2$ м - шаг цепи.

Найдем общее передаточное число привода

$$i_{\text{общ}} = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{зв}}} \quad (2.22)$$

$$i_{\text{общ}} = \frac{1000}{2,5} = 400$$

2.2 Расчет параметров якорной цепи двигателя

Определим индуктивность якорной цепи по формуле Ленвила – Уманского

$$L_{\text{я}} = \frac{U_{\text{ян}} \cdot K_{\text{к}}}{I_{\text{ян}} \cdot \omega_{\text{н}} \cdot p}, \text{ Гн} \quad (2.23)$$

$$L_{\text{я}} = \frac{220 \cdot 0,5}{21,2 \cdot 104,6 \cdot 2} = 0,024 \text{ Гн},$$

где $K_{\text{к}} = 0,5 \div 1$ - коэффициент компенсации;
 p - число пар полюсов.

Определим сопротивление якорной цепи двигателя

$$R_{\text{дв}} = 1,34 \cdot R_{\text{я}}, \text{ Ом} \quad (2.24)$$

$$R_{\text{дв}} = 1,34 \cdot 0,344 = 0,46 \text{ Ом}$$

Определи конструктивную постоянную двигателя

$$C = k\Phi = \frac{U_{\text{ян}} - I_{\text{ян}} \cdot R_{\text{д}}}{\omega_{\text{н}}} \quad (2.25)$$

$$C = \frac{220 - 21,2 \cdot 0,46}{104,6} = 2,01$$

2.3 Выбор редуктора

Для выбора редуктора определим крутящий момент на тихоходном валу редуктора, который равен крутящему моменту на валу приводных звездочек

$$D_{36} = t_{\psi} \cdot (\sin 180 / Z) \quad (2.26)$$

$$D_{36} = 6 \cdot (\sin 180 / 6) = 0,28$$

$$M_{36} = \frac{W_0 \cdot D_{36}}{2}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.27)$$

$$M_{36} = \frac{62853,9 \cdot 0,28}{2} = 3519 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

По каталогу выбираем редуктор Ц2ЧН – 250 – 40.

2.4 Выбор преобразователя

В ходе анализа характеристик электромеханических преобразователей с независимым возбуждением, работающих на постоянном токе, установлено, что наибольшая гибкость и эффективность управления процессами преобразования энергии достигается путём изменения напряжения, подводимого к якорной цепи двигателя. Для реализации этой возможности применяются различные виды преобразователей, способных регулировать уровень питающего напряжения.

До широкого распространения полупроводниковых устройств основным способом управления двигателями постоянного тока являлось применение электромеханических преобразователей энергии — в частности, генераторов постоянного тока. На базе таких решений формировалась система регулируемого электропривода, известная как система Г–Д (генератор–двигатель). В её состав входили три основные электрические машины: приводной двигатель (ПД), приводящий в движение генератор постоянного тока (Г), и двигатель постоянного тока (Д), который, в свою очередь, вращал исполнительный механизм со скоростью ω [5]. На рисунке 2.1 изображена система Г – Д.

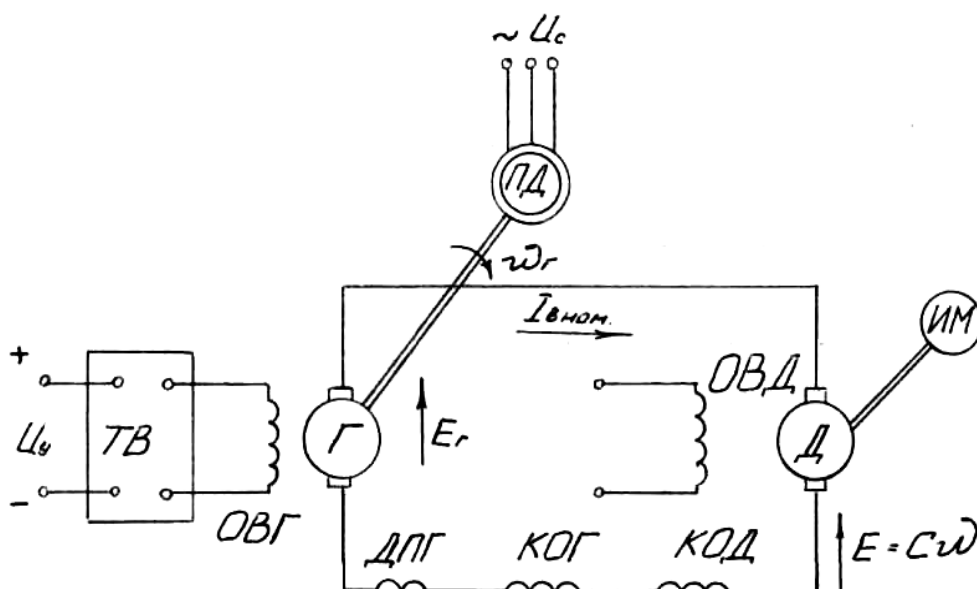


Рисунок 2.1 – Система управления Г – Д

В ходе анализа характеристик электромеханических преобразователей с независимым возбуждением, работающих на постоянном токе, установлено, что наибольшая гибкость и эффективность управления процессами преобразования энергии достигается путём изменения напряжения, подводимого к якорной цепи двигателя. Для реализации этой возможности применяются различные виды преобразователей, способных регулировать уровень питающего напряжения.

До широкого распространения полупроводниковых устройств основным способом управления двигателями постоянного тока являлось применение электромеханических преобразователей энергии — в частности, генераторов постоянного тока. На базе таких решений формировалась система регулируемого электропривода, известная как система Г–Д (генератор–двигатель). В её состав входили три основные электрические машины: приводной двигатель (ПД), приводящий в движение генератор постоянного тока (Г), и двигатель постоянного тока (Д), который, в свою очередь, вращал исполнительный механизм.

$$\eta_{Г-Д} = \eta_Д \cdot \eta_Г \cdot \eta_{ПД} \quad (2.28)$$

По причине указанных технологических и экономических недостатков, на различных этапах развития электрических приводов активно велись поиски более компактных и энергоэффективных способов замены вращающихся преобразователей. Одной из таких альтернатив на раннем этапе стала система УРВ–Д, в которой управляющий ртутный выпрямитель питал двигатель постоянного тока. Однако из-за значительных потерь напряжения в дуге, громоздкости, сложностей в эксплуатации и несовершенства систем

управления, основанных на ртутных вентилях, эта система не смогла обеспечить устойчивую замену Г–Д.

Кардинальный прогресс был достигнут только с появлением полупроводниковых тиристоров и систем импульсно-фазового управления нового поколения. С применением кремниевых вентилях и микропроцессорной техники стало возможным создание преобразовательных установок нового типа с высокими эксплуатационными и динамическими характеристиками.

Так возникла система ТП–Д (тиристорный преобразователь – двигатель), в которой двигатель постоянного тока питается от управляемого выпрямителя (Рисунок 2.2). Последний преобразует переменное напряжение сети в регулируемое выпрямленное напряжение, подаваемое на якорную цепь двигателя. Для устранения пульсаций тока в цепь вводится реактор сглаживания. Выходное напряжение преобразователя зависит от угла управления, значений противо-ЭДС, тока нагрузки, а также сопротивлений и падений напряжения на элементах силовой схемы. Тиристорный преобразователь, применяемый в такой системе, обеспечивает высокое быстродействие и точность регулирования, что позволяет эффективно управлять режимами работы электропривода.

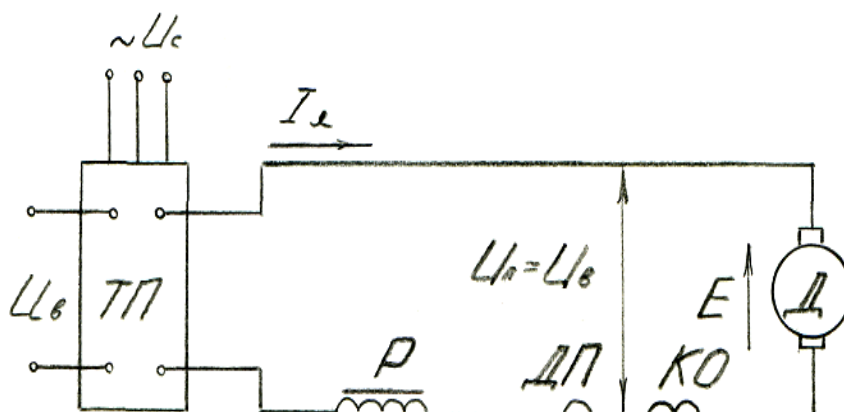


Рисунок 2.2 - Система управления ТП – Д

В системах с импульсно-фазовым управлением на базе полупроводниковых приборов временная постоянная цепи управления не превышает 0,01 секунды. Это обстоятельство значительно расширяет возможности проектирования высокودинамичных электроприводов при применении схемы ТП–Д (тиристорный преобразователь – двигатель). Благодаря малому времени реакции, такие приводы способны быстро адаптироваться к изменениям управляющих и нагрузочных воздействий, обеспечивая устойчивую и точную работу.

В случае использования неинверсивного выпрямительного блока в составе системы ТП–Д общая установленная мощность оказывается меньшей по сравнению с классической схемой Г–Д. Это объясняется отсутствием

необходимости в промежуточных машинах и потерь, связанных с двойным преобразованием энергии.

Одним из значимых преимуществ тиристорного электропривода является его высокая энергетическая эффективность. Потери мощности, возникающие при протекании номинального тока через тиристоры, составляют всего 1–2% от общей мощности электропривода. Даже с учётом дополнительных потерь, возникающих в сглаживающем реакторе и понижающем трансформаторе, общая эффективность преобразовательной части остаётся на высоком уровне, особенно при использовании устройств средней и высокой мощности — порядка нескольких десятков киловатт.

Поскольку амплитудные и средние значения напряжения питающей сети и напряжения, подаваемого на вход преобразователя, отличаются между собой, в схеме привода необходимо предусмотреть наличие трансформатора. Этот элемент обеспечивает согласование параметров сети с требованиями преобразователя, а также выполняет функцию гальванической развязки и может участвовать в понижении или повышении напряжения до оптимального уровня для питания силовой части выпрямителя.

Определим требуемую мощность трансформатора. Будем считать, что U и I нагрузки равны соответственно номинальным значениям двигателя

$$P_{Tp} = P_{ТП} \cdot \kappa_u = U_{дн} \cdot I_{дн} \cdot \kappa_u, \text{ Вт} \quad (2.29)$$

$$P_{Tp} = 220 \cdot 21,2 \cdot 1,045 = 4873,4 \text{ Вт},$$

где κ_u - коэффициент использования трансформатора, $\kappa_u = 1,045$.

По данным каталога выбираем трансформатор типа ТТ – 8. Технические данные трансформатора:

Номинальная мощность трансформатора	$P_n = 8 \text{ кВт}$
Номинальное напряжение первичной цепи	$U_{н1} = 380 \text{ В}$
Номинальное напряжение вторичной цепи	$U_{н2} = 260 \text{ В}$
Мощность короткого замыкания	$P_{кз} = 280 \text{ Вт}$

Определим фазное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_{2\phi} = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}}, \text{ В} \quad (2.30)$$

$$U_{2\phi} = \frac{260}{\sqrt{3}} = 150,1 \text{ В}$$

Определим номинальное значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_{2н} = \frac{P_{Tp}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\phi}}, \text{ А} \quad (2.31)$$

$$I_{2н} = \frac{8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 150,1} = 30,7 \text{ А}$$

Определим коэффициент трансформации

$$K_{Tp} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} \quad (2.32)$$

$$K_{Tp} = \frac{380}{260} = 1,46$$

Определим активное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке

$$R_{Tp.\phi} = \frac{\Delta P_{кз}}{3I_{2ном}^2}, \text{ Ом} \quad (2.33)$$

$$R_{Tp.\phi} = \frac{280}{3 \cdot 30,7^2} = 0,099 \text{ Ом}$$

Найдем полное сопротивление фазы трансформатора

$$Z_{Tp} = \frac{U_{кз} \cdot U_{2\phi}}{100 \cdot I_{2н}}, \text{ Ом} \quad (2.34)$$

$$Z_{Tp} = \frac{11 \cdot 150,1}{100 \cdot 30,7} = 0,53 \text{ Ом},$$

где $U_{кз}$ - напряжение короткого замыкания трансформатора.

Определим индуктивное сопротивление фазы трансформатора

$$X_{Tp} = \sqrt{Z_{Tp}^2 - R_{Tp.\phi}^2}, \text{ Ом} \quad (2.35)$$

$$X_{Tp} = \sqrt{0,53^2 - 0,99^2} = 0,285 \text{ Ом}$$

Определим индуктивность фазы трансформатора приведенной к вторичной обмотке

$$L_{Tp} = 2L_{Tp.\phi} \quad (2.36)$$

$$L_{Tp} = 2 \cdot 0,001 = 0,002 \text{ Гн}$$

Найдем активное сопротивление силовой цепи трансформатора и преобразователя

$$R_{ТП} = 2R_{Tp} + 2R_{\Delta t} + L_{Tp.\phi} \cdot f \cdot m, \text{ Ом} \quad (2.37)$$

$$R_{ТП} = 2 \cdot 0,099 + 2 \cdot 0,053 + 0,0015 \cdot 50 \cdot 6 = 0,86 \text{ Ом},$$

где $R_{\Delta t}$ - сопротивление перехода тиристора;

m - число фаз.

Произведем расчеты, необходимые для выбора тиристора

$$I_{d.cp} = K_{zi} \cdot \frac{I_n}{K_{0x} \cdot m_{mp}}, \text{ А} \quad (2.38)$$

$$I_{d.cp} = 2,5 \cdot \frac{4,7}{0,35 \cdot 3} = 11,2 \text{ А}$$

$$U_{d0} = K_c \cdot K_d \cdot K_r \cdot U_{d.n}, \text{ В} \quad (2.39)$$

$$U_{d0} = 1,08 \cdot 1,08 \cdot 1,05 \cdot 220 = 269,4 \text{ В}$$

$$U_{b.\max} = K_{zn} \cdot K_{u.obp} \cdot U_{d0}, \text{ В} \quad (2.40)$$

$$U_{b.\max} = 1,5 \cdot 1,065 \cdot 269,4 = 430,4 \text{ В}$$

По полученным результатам выбираем тиристор типа Т – 15-3-332-1,75

2.5 Выбор сглаживающего дросселя

Поскольку пульсации выпрямленного напряжения растут с ростом угла коммутации α , то требуемое значение индуктивности якоря двигателя определим на нижней характеристике двигателя

$$\omega_{\min} = \frac{\omega_{\min n} \cdot i_{ped}}{D}, \text{ рад/сек} \quad (2.41)$$

$$\omega_{\min} = \frac{0,005 \cdot 400}{10} = 0,2 \text{ рад/сек}$$

Определим сопротивление дросселя

$$R_{\partial p} = \frac{\Delta U_{\partial p}}{I_{ян}}, \text{ Ом} \quad (2.42)$$

$$R_{\partial p} = \frac{2,2}{21,2} = 0,103 \text{ Ом}$$

Определим полное активное сопротивление якорной цепи

$$R_{яц} = R_{\partial в} + R_{mn} + R_{\partial p}, \text{ Ом} \quad (2.43)$$

$$R_{яц} = 0,114 + 0,86 + 0,103 = 1,27 \text{ Ом}$$

Определим минимальную выпрямленную ЭДС тиристорного преобразователя

$$E_{ТП \min} = \omega_{\min} \cdot \frac{\kappa \Phi + R_{яц} - U_{\partial в}}{\kappa \Phi}, \text{ В} \quad (2.44)$$

$$E_{ТП \min} = 4,02 + 23,9 = 27,92 \text{ В}$$

Определим максимальный угол регулирования

$$\alpha_{\max} = \arccos \frac{E_{ТП \min}}{E_d}, \quad (2.45)$$

$$\alpha_{\max} = \arccos \frac{27,92}{220} = 62^{\circ}$$

Определим индуктивность дросселя

$$L_{\partial p} \geq L_{яц} - (L_{ТП} + L_{я}), \text{ Гн} \quad (2.46)$$

$$L_{\partial p} = 0,102 - (0,001 + 0,003) = 0,1 \text{ Гн}$$

Выбор дросселя производится из следующих условий

$$L_{\partial p.н} \geq L_{\partial p},$$

$$I_{\partial p.н} \geq I_{ян},$$

По каталожным данным можно выбрать подходящий нам дроссель.

Определим электромеханическую постоянную времени системы ТП-Д

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{яц}}{(\kappa\Phi)^2}, \text{ сек} \quad (2.47)$$

$$T_M = \frac{0,47 \cdot 1,27}{4,04} = 0,12 \text{ сек},$$

где J_{Σ} - суммарный момент инерции.

Определим электромагнитную постоянную времени системы ТП-Д

$$T_{я} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}, \text{ сек} \quad (2.48)$$

$$T_{я} = \frac{0,102}{1,27} = 0,095 \text{ сек}$$

Для реализации управления приводом конвейера оптимально применима трёхфазная мостовая схема выпрямителя на тиристорах. Такая схема обеспечивает надёжное и симметричное преобразование переменного тока в управляемое выпрямленное напряжение, необходимое для питания электродвигателя. Одной из характерных особенностей данной конфигурации является способ подачи управляющих сигналов на тиристоры. При фиксированном угле управления α импульсы, подаваемые на тиристоры группы 1Т, смещены по фазе на 180° относительно импульсов, управляющих включением тириستоров группы 2Т. Это обеспечивает чередование работы плеч выпрямителя в соответствии с изменениями фаз напряжения питающей сети и

позволяет эффективно реализовать фазоимпульсное регулирование выходного напряжения. Схема - на рисунке 2.3.

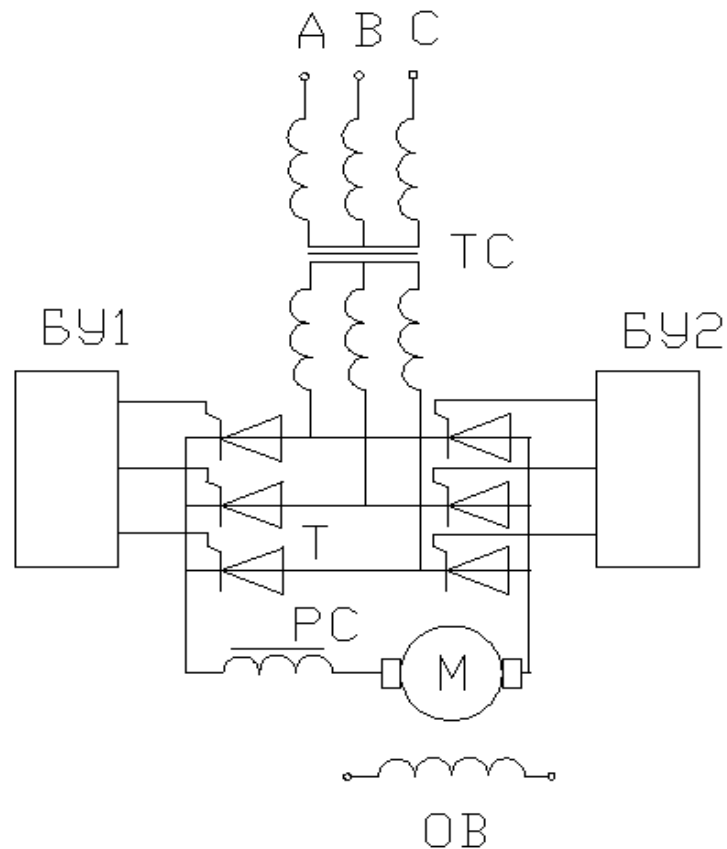


Рисунок 2.3 – Мостовая трехфазная схема управления приводом

2.6 Определение и графическое представление характеристик регулирования преобразователя

Основной характеристикой преобразователя является зависимость ЭДС преобразователя E_{II} от напряжения управления U_y . Для расчета воспользуемся формулой

$$E_{II} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot U_2 \cdot \cos \alpha \quad (2.49)$$

$$E_{II} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{3,14} \cdot 150 \cdot \cos \alpha$$

Результаты расчетов занесены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Результаты расчета

$U_{yП}$	1	2	3	4	5	6	7	8
α	81	72	63	54	45	36	27	18
$\cos \alpha$	0,156	0,31	0,454	0,598	0,707	0,81	0,89	0,95
$E_{П}$	54,52	108,3	158,6	209	247	283	311	314
$K_{П}$	54,52	54,2	52,8	52,25	49,4	44,4	39,29	37,2

По полученным результатам строим характеристики преобразователя. На рисунке 2.4 изображены регулировочные характеристики преобразователя.

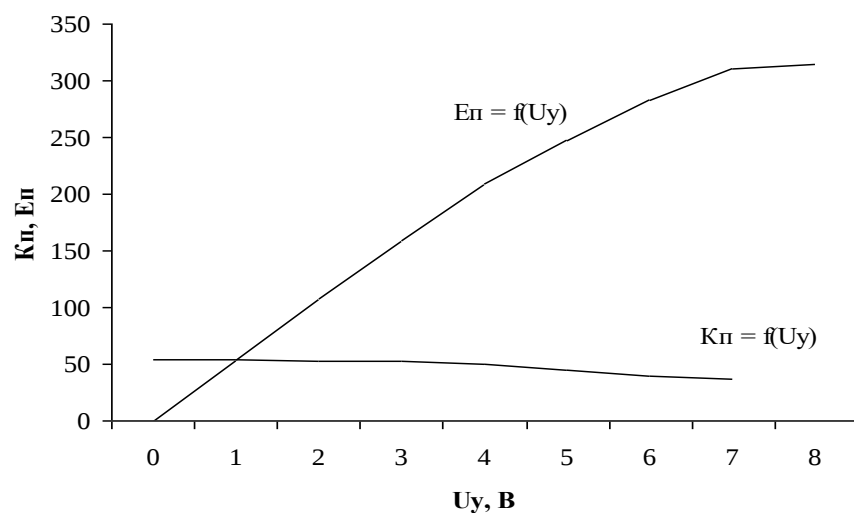


Рисунок 2.4 – Характеристики регулирования преобразователя

2.7 Формирование схемы функционирования системы автоматического регулирования

Автоматическая система управления электроприводом типа ТП–Д, используемая в составе привода конвейера электрической сопроотивительной печи, относится к классу систем, реализующих основную функцию стабилизации скорости вращения двигателя. Поддержание постоянной скорости в условиях переменной нагрузки осуществляется за счёт применения замкнутой схемы регулирования с корректирующими связями.

Система обеспечивает требуемый диапазон регулирования $D=10$ и характеризуется определённым уровнем статизма при изменении тока нагрузки от нуля до $I_{ном}$ $\delta=10\%$. Для реализации этих условий в схеме управления используется отрицательная обратная связь по току с элементом отсечки. Ограничение по скорости достигается путём сдерживания управляющего сигнала, поступающего на вход выпрямительного устройства. Такая форма

ограничения позволяет избежать превышения заданного уровня скорости при работе в различных нагрузочных режимах.

Уровень напряжения, необходимого для срабатывания отсечки, задаётся стабилитроном, напряжение которого выбирается с учётом диапазона изменения сигнала управления, при котором достигается устойчивое поддержание требуемой скорости и допустимого тока. Так, стабилитрон V1 реализует отсечку по току: его параметры определяются из условий ограничения тока на уровне, не превышающем допустимое значение для электропривода. Это позволяет предотвратить перегрузку силовой части и повысить надёжность системы.

Функция ограничения по скорости реализуется с применением диода V2. Когда значение обратного сигнала по скорости, поступающего от датчика, превышает заданное опорное напряжение, диод ограничивает управляющее воздействие, предотвращая превышение установленного значения скорости. В этом случае уровень обратной связи определяется как разность между фактической скоростью вращения и заданным значением, преобразованным в аналоговый сигнал. При этом напряжение обратной связи определяется следующим образом:

$$u_{c,o} = (u_c - U_{o,c}) \cdot 1(\Delta\omega) \quad (2.50)$$

$$u_{c,o} = k_c (\omega - \omega_{omc}) \cdot 1(\Delta\omega) \quad (2.51)$$

где ω_{omc} - скорость отсечки, при которой начинает действовать обратная связь по скорости;

$1(\Delta\omega) = 1(\omega - \omega_{omc})$ - единичная функция по скорости, равная нулю при $\omega < \omega_{omc}$ и единице при $\omega \geq \omega_{omc}$.

Выбор значений тока отсечки I_{omc} и скорости отсечки ω_{omc} , то есть значений единичных функций, может производиться при их точном соответствии. Однако практически значение скорости отсечки принимается при скорости ниже полного соответствия, то есть при $I > I_{omc}$. Это позволяет упростить настройку системы и исключить снижение момента перегрузки двигателя при снижении напряжения сети.

Задающее напряжение в системе электропривода с отрицательной обратной связью по скорости (напряжению) с отсечкой определяется при идеальном холостом ходе двигателя, когда $1(\Delta\omega) = 1$, а $1(\Delta I) = 0$. Тогда

$$U_3 = \frac{\omega_0}{k_U \cdot k_{II} \cdot k_D} \cdot (1 + k_C \cdot k_U \cdot k_{II} \cdot k_D) - U_{o,c} \quad (2.52)$$

Снижение задающего напряжения в системе с отсечкой по скорости на $U_{o,c}$ позволяет облегчить действие токовой отсечки.

Регулирование скорости в такой системе электропривода изменением задающего напряжения U_3 обеспечиваться не может, так как при снижении скорости ниже скорости отсечки ($\omega < \omega_{omc}$) обратная связь по скорости отключается. Поэтому скорость регулируется изменением значения опорного напряжения $U_{o,c}$, изменяющего скорость отсечки ω_{omc} . Это является недостатком этой системы управления.

Функциональная схема системы показана на рисунке 2.5.

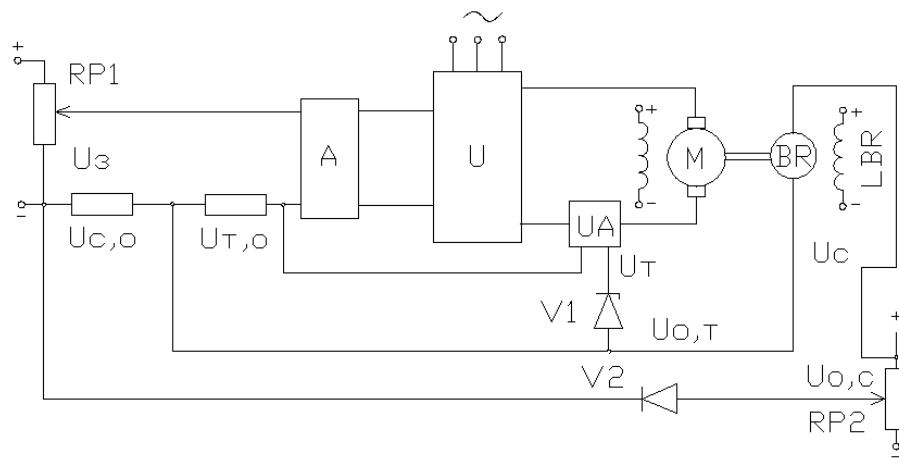


Рисунок 2.5 – Функциональная модель электроприводной системы с двухконтурной отрицательной обратной связью и функцией отсечки

2.8 Расчет электромеханических характеристик разомкнутой системы

Для построения естественной электромеханической характеристики двигателя постоянного тока по уравнению

$$\omega(I_{я}) = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{я}}{K\Phi} \cdot I_{я} \quad (2.53)$$

необходимо знать координаты двух ее точек: номинального режима с координатами

$$I_{я} = I_{ян}, \text{ A} \quad \omega = \omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}, \text{ рад/сек}$$

$$I_{\text{я}} = 21,2 \text{ А} \quad \omega = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/сек}$$

и режима холостого хода с координатами

$$I_{\text{я}} = 0, \quad \omega = \omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{\text{кФ}}, \text{ рад/сек}$$

$$\omega = \frac{220}{2,03} = 108,4 \text{ рад/сек}$$

Для получения при номинальной нагрузке минимально заданной скорости

$$\omega_{\min} = \frac{\omega_{\text{н}}}{D}, \text{ рад/сек} \quad (2.54)$$

$$\omega_{\min} = \frac{104,7}{10} = 10,5 \text{ рад/сек}$$

необходимо снизить величину напряжения на статоре двигателя до значения

$$U_{\text{я min}} = \frac{U_{\text{ян}}}{D}, \text{ В} \quad (2.55)$$

$$U_{\text{я min}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ В}$$

Характеристика строится по точкам номинальной нагрузки $I_{\text{я}} = I_{\text{ян}}$, $\omega = \omega_{\min}$ и режима холостого хода с координатами

$$I_{\text{я}} = 0, \quad \omega = \omega_{0 \min} = \frac{U_{\text{я min}}}{\text{кФ}}, \text{ рад/сек}$$

$$\omega = \frac{22}{2,03} = 10,8 \text{ рад/сек}$$

Затем выполняется определение условных (искусственно сформированных) статических электромеханических характеристик привода в режиме без обратных связей. Рассматривается значение электродвижущей силы, формируемой преобразователем при заданной — номинальной — скорости вращения и соответствующем уровне нагрузки

$$E_H = \kappa \cdot \Phi \cdot \omega_n + I_n \cdot R_{\Sigma}, \text{ В} \quad (2.56)$$

$$E_H = 1,85 \cdot 104,7 + 21,2 \cdot 1,27 = 220 \text{ В}$$

Статическая характеристика строится при изменении тока по формуле

$$\omega(I) = \frac{E_H - I \cdot R_{\Sigma}}{\kappa \Phi} \quad (2.57)$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.2.

ЭДС преобразователя при минимальной скорости и номинальной нагрузке

$$E_{n.\min} = \frac{\kappa \Phi \cdot \omega_n}{D} + I_n \cdot R_{\Sigma}, \text{ В} \quad (2.58)$$

$$E_{n.\min} = \frac{220}{10} = 22 \text{ В}$$

Статическая характеристика для минимальной скорости строится при изменении тока по формуле

$$\omega(I) = \frac{E_{n.\min} - I \cdot R_{\Sigma}}{\kappa \Phi} \quad (2.59)$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.2 - Результаты расчета естественных характеристик

I, А	0	10	21,2
ω , рад/сек	108,4	102,1	95,07

Таблица 2.3 - Результаты расчета искусственных характеристик

I, А	0	10	15
ω , рад/сек	10,8	4,6	1,45

На рисунке 2.6 приведены статические характеристики разомкнутой системы рассматриваемого нами привода.

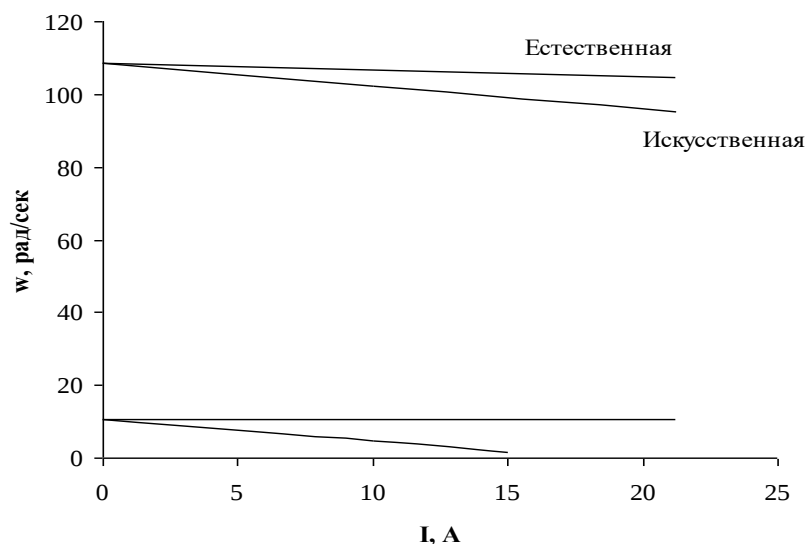


Рисунок 2.6 – Установившиеся характеристики разомкнутой системы

2.9 Определение и графическое представление характеристик электропривода с обратной связью по скорости и ограничением тока

Как следует из проведённых ранее вычислений, механические характеристики электропривода, питаемого от вентильного преобразователя, отличаются относительно низкой жёсткостью. Это ограничивает возможности по точному поддержанию скорости при изменении нагрузки. Для повышения диапазона регулирования скорости в таких системах целесообразно применение корректирующих обратных связей. В частности, может быть реализована положительная обратная связь по якорному току, либо отрицательные связи — по скорости вращения или по подводимому напряжению.

Для ограничения тока, протекающего через вентильный преобразователь и якорь двигателя, нередко применяется замедленная отрицательная обратная связь по току, также известная как токовая отсечка. Введение такой корректирующей связи позволяет обеспечить ограничение перегрузки по току в переходных режимах и при пуске. При использовании токовой отсечки характер электромеханических зависимостей электропривода приближается к так называемой «экскаваторной» характеристике, при которой двигатель может кратковременно развивать повышенный пусковой момент, но с последующим ограничением тока при достижении определённого уровня нагрузки.

В зависимости от величины тока якоря, возможны два режима работы привода:

а) $I < I_{отс}$, $|U_{дт}| < U_{ствд}$ - в рабочем диапазоне тока работает только одна отрицательная обратная связь по скорости (сигнал ОС по току не поступает на усилитель);

б) $I > I_{OTC}$, $|U_{дт}| > U_{CTVD}$ - в этом диапазоне тока одновременно на входе регулятора скорости действуют два сигнала ОС:

- сигнал по скорости, который стремится сделать скоростную характеристику более жесткой;
- сигнал по току, который стремится сделать скоростную характеристику более мягкой. $I_{OTC} = 1,5 \cdot I_{ЯН}$, $I_{СТ} = 2 \cdot I_{ЯН}$.

На участке 1 $I < I_{OTC}$, токовая отсечка не работает. САУ работает в режиме поддержания постоянства заданной скорости.

При номинальных значениях скорости и тока определим задающее напряжение на верхней характеристике

$$U_{3B} = \frac{\omega_H \cdot (1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial c} \cdot K_{\partial})}{K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial}} + \frac{I_H \cdot R_{\mathcal{E}}}{K_n \cdot K_{pc}}, \text{ В} \quad (2.60)$$

$$U_{3B} = \frac{104,7 \cdot (1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 2,2 \cdot 0,49)}{4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49} + \frac{21,2 \cdot 1,27}{52,5 \cdot 4,73} = 231,3 \text{ В},$$

где K_{pc} - коэффициент усиления регулятора скорости;

K_n - коэффициент усиления преобразователя;

K_{∂} - коэффициент передачи двигателя.

При номинальных значениях скорости и тока определим задающее напряжение на нижней характеристике

$$U_{3H} = \frac{\omega_H \cdot (1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial c} \cdot K_{\partial})}{D \cdot K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial}} + \frac{I_H \cdot R_{\mathcal{E}}}{K_n \cdot K_{pc}}, \text{ В} \quad (2.61)$$

$$U_{3H} = \frac{104,7 \cdot (1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 2,2 \cdot 0,49)}{10 \cdot 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49} + \frac{21,2 \cdot 1,27}{52,5 \cdot 4,73} = 23,2 \text{ В}$$

Определим скорость холостого хода для верхней характеристики

$$\omega_{0B} = \frac{U_{3B} \cdot K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial}}{1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial} \cdot K_{\partial c}}, \text{ рад/сек} \quad (2.62)$$

$$\omega_{0B} = \frac{231,3 \cdot 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49}{1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49 \cdot 2,2} = 104,7 \text{ рад/сек}$$

Определим скорость холостого хода для нижней характеристики

$$\omega_{0H} = \frac{U_{3H} \cdot K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial}}{1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial} \cdot K_{\partial c}}, \text{ рад/сек} \quad (2.63)$$

$$\omega_{0H} = \frac{23,2 \cdot 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49}{1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49 \cdot 2,2} = 10,5 \text{ рад/сек}$$

На 2 участке $I \geq I_{OTC}$, поэтому в результате действия токовой отсечки наклон характеристики увеличивается.

Определим скорость отсечки на верхней характеристике

$$\omega_{omcB} = \frac{U_{3B} \cdot K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial}}{1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial} \cdot K_{\partial c}} - \frac{I_{omc} \cdot R_{\partial} \cdot K_{\partial}}{1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial c} \cdot K_{\partial}}, \text{ рад/сек} \quad (2.64)$$

$$\omega_{omcB} = \frac{231,3 \cdot 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49}{1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49 \cdot 2,2} - \frac{31,8 \cdot 1,27 \cdot 0,49}{1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49 \cdot 2,2} = 104,6 \text{ рад/сек}$$

Определим скорость отсечки на нижней характеристике

$$\omega_{omcH} = \frac{U_{3H} \cdot K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial}}{1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial} \cdot K_{\partial c}} - \frac{I_{omc} \cdot R_{\partial} \cdot K_{\partial}}{1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial c} \cdot K_{\partial}}, \text{ рад/сек} \quad (2.65)$$

$$\omega_{omcH} = \frac{23,2 \cdot 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49}{1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49 \cdot 2,2} - \frac{31,8 \cdot 1,27 \cdot 0,49}{1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49 \cdot 2,2} = 10,4 \text{ рад/сек}$$

Найдем значение напряжения стопорения для верхней характеристики

$$U_{cmB} = \frac{I_{cm} \cdot R_{\partial} \cdot (1 + \beta \cdot K_{pc} \cdot K_n) - U_{3B} \cdot K_{pc} \cdot K_n}{K_n \cdot K_{pc}}, \text{ В} \quad (2.66)$$

$$U_{cmB} = \frac{42,4 \cdot 1,27 \cdot (1 + 21,8 \cdot 4,73 \cdot 52,5) - 231,3 \cdot 4,73 \cdot 52,5}{52,5 \cdot 4,73} = 943 \text{ В}$$

Определим скорость стопорения для верхней характеристики

$$\omega_{cmB} = \frac{U_{3B} \cdot K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial} + U_{cm} \cdot K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial}}{1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial} \cdot K_{\partial c}} - \frac{I_{cm} \cdot R_{\partial} \cdot (1 + \beta \cdot K_{pc} \cdot K_n) \cdot K_{\partial}}{1 + K_{pc} \cdot K_n \cdot K_{\partial c} \cdot K_{\partial}}, \text{рад/сек} \quad (2.67)$$

$$\omega_{cmB} = \frac{943 \cdot 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49 + 231,3 \cdot 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49}{1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49 \cdot 2,2} - \frac{31,8 \cdot 1,27 \cdot (1 + 21,8 \cdot 4,73 \cdot 52,5) \cdot 0,49}{1 + 4,73 \cdot 52,5 \cdot 0,49 \cdot 2,2} = 0 \text{ рад/сек}$$

Для нижней характеристики расчет скорости стопорения производится аналогичным образом, $\omega_{cmH} = 0$ рад/сек.

Данные расчета характеристик сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 - Данные расчета характеристик

I, А	0	31,8	42,4
ω_B , рад/сек	104,7	104,6	0
ω_H , рад/сек	10,5	10,4	0

Статические характеристики двухконтурной системы автоматизированного электропривода АЭП с отрицательной обратной связью по скорости и отсечкой по току представлены на рисунке 2.7.

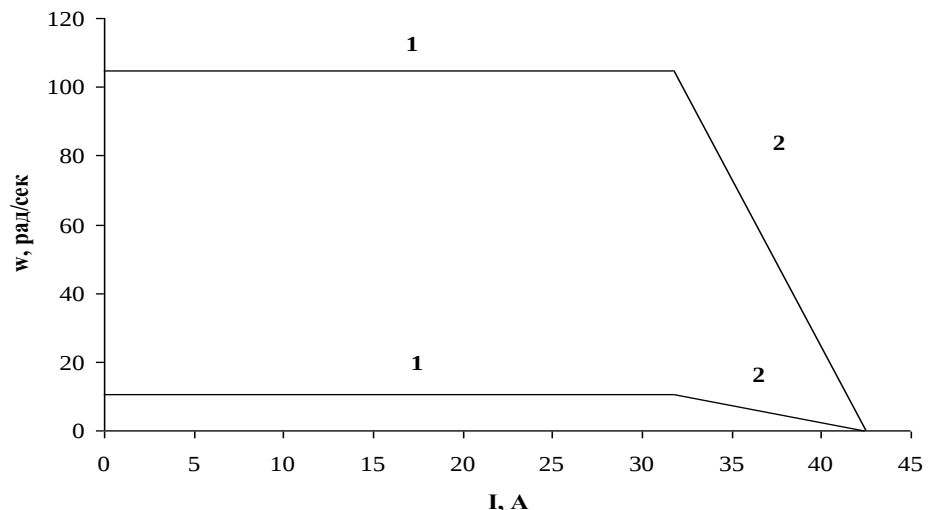


Рисунок 2.7 – Статические характеристики двухконтурной системы АЭП с отрицательной ОС по скорости и отсечкой по току

2.10 Пример расчета статических характеристик управляемого выпрямителя с применением приложения "MathCAD"

Исходные данные:

Преобразователь собран по мостовой схеме, $k_{cx}=1.17$.

$U_c = 220$ В – фазное напряжение вентильной обмотки трансформатора;

$U_{y\max} = 10$ В – принятое максимальное значение напряжения управления.

При арккосинусоидальной характеристике СИФУ угол регулирования инвертора

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_y}{U_{y\max}}\right). \quad (2.68)$$

При линейной характеристике СИФУ угол регулирования инвертора равен

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{U_y}{U_{y\max}}\right). \quad (2.69)$$

ЭДС выпрямителя при мостовой схеме ТП

$$E_{du} = k_{cx} U_c \cos \alpha \quad (2.70)$$

Для определения значения коэффициента усиления инвертора при различных типах импульсно-фазового управления (СИФУ) возможно использование расчётной программы, выполненной на базе пакета MathCAD. В расчётах применяются зависимости, представленные в формулах (2.68), (2.69) и (2.70).

На рисунке 2.8 отображены графические результаты вычислений: зависимости, характеризующие работу системы импульсно-фазового управления (а), выходные параметры преобразователя (б), а также изменение коэффициента передачи выпрямителя (с). Сплошными кривыми обозначены характеристики, полученные при использовании арккосинусоидального закона управления, в то время как пунктирная линия соответствует линейному методу формирования управляющих импульсов.

В первом варианте коэффициент передачи k_n остаётся неизменным в пределах всего диапазона регулирования, тогда как во втором случае этот параметр изменяется в зависимости от угла управления. Для продолжения анализа можно зафиксировать требуемую область регулирования электродвижущей силы выпрямителя, соответствующую конкретной нагрузке или типу механизма, и на этой основе определить применимое значение коэффициента передачи k_n .

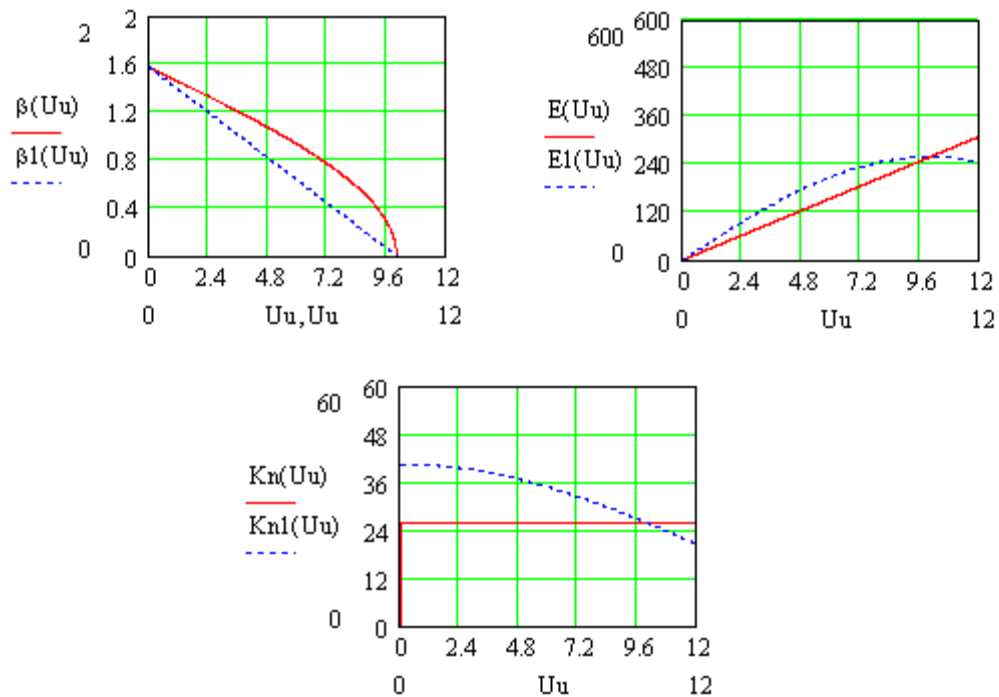


Рисунок 2.8 – Результаты расчета статических характеристик

2.11 Анализ переходных процессов системы стабилизации скорости электропривода постоянного тока

На рисунке 2.9 изображена структурная схема замкнутой системы автоматической стабилизации скорости ДПТ с отсечками.

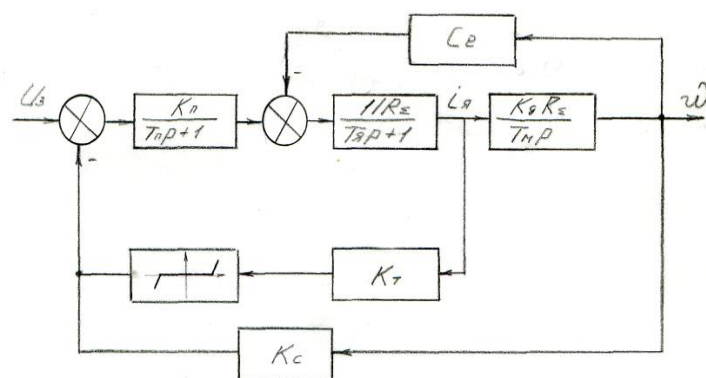


Рисунок 2.9 – Структурная схема замкнутой системы автоматической стабилизации скорости ДПТ с отсечками

По завершении переходного процесса система стабилизируется и переходит в установившийся режим с заданной скоростью вращения. В этот момент элементы ограничения (отсечки) перестают оказывать влияние на работу схемы. При незначительных колебаниях нагрузки и малых отклонениях угловой скорости от установившегося значения, поведение системы можно рассматривать как линейное. В таких условиях динамическое поведение электропривода может быть описано с использованием структурной схемы, представленной на рисунке 2.10 ($M_C = 0$).

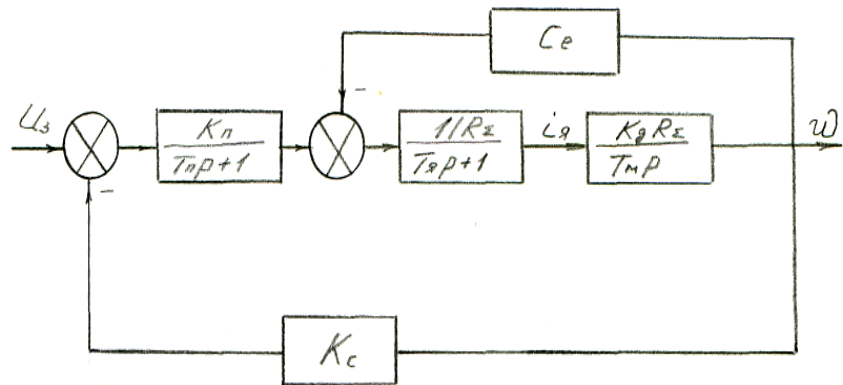


Рисунок 2.10 – Функциональная схема системы регулирования скорости электродвигателя постоянного тока

Необходимо рассчитать и построить кривые $h_\omega(t)$ и $h_{ia}(t)$. Расчет этих кривых производится операционным методом.

Найдем изображение для $h_\omega(t)$, т.е. $H_\omega(p)$

$$H_\omega(p) = W_\omega(p) \cdot U_0 \cdot \frac{1}{p} \quad (2.71)$$

$$W_\omega(p) = \frac{\Omega(p)}{U_3(p)} \quad (2.72)$$

В результате преобразований структурной схемы, изображенной на рисунке 2.10, находим

$$W_\omega(p) = \frac{K_\Sigma}{a_0 \cdot p^3 + a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + 1} \quad (2.73)$$

$$a_0 = \frac{T_\Pi \cdot T_M \cdot T_J}{1 + K_\Pi \cdot K_D \cdot K_C} \quad (2.74)$$

$$a_1 = \frac{T_M \cdot T_J + T_{II} \cdot T_M}{1 + K_{II} \cdot K_D \cdot K_C} \quad (2.75)$$

$$a_2 = \frac{T_{II} + T_M}{1 + K_{II} \cdot K_D \cdot K_C} \quad (2.76)$$

$$K_{\mathcal{O}} = \frac{K_{II} \cdot K_D}{1 + K_{II} \cdot K_D \cdot K_C} \quad (2.77)$$

$$H_{ia}(p) = \frac{U_0 \cdot K_{\mathcal{O}}}{p \cdot (a_0 \cdot p^3 + a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + 1)} \quad (2.78)$$

$$H_{\omega}(p) = \frac{4,2 \cdot U_0}{p \cdot (1,7 \cdot 10^{-5} \cdot p^3 + 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1)}$$

Аналогично преобразив соответствующим образом структурную схему изображенную на рисунке 2.10, находим изображение для кривой $h_{ia}(t)$

$$W_{ia}(p) = \frac{K'_{\mathcal{O}} \cdot p}{a_0 \cdot p^3 + a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + 1} \quad (2.79)$$

$$K'_{\mathcal{O}} = \frac{K_{II} \cdot T_M}{R_{\Sigma} \cdot (1 + K_{II} \cdot K_D \cdot K_C)} \quad (2.80)$$

$$H_{ia}(p) = \frac{U_0 \cdot K'_{\mathcal{O}}}{a_0 \cdot p^3 + a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + 1} \quad (2.81)$$

Проверка системы на устойчивость методом Гурвица:

а) необходимое условие

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0;$$

б) достаточное условие

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = (a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3) = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 1 = 1,9 \cdot 10^{-5} > 0.$$

Достаточное условие выполняется, следовательно, система устойчива.
Для отыскания оригинала необходимо разложить полином

$$A(p) = a_0 \cdot p^3 + a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + 1 \quad (2.82)$$

на простые множители вида $(T_{ip} + 1)$ и $(T_j^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_j \cdot p + 1)$.
Разложение полинома на простые множители производим методом Лина.
Итерационные формулы

$$C_1 = \frac{a_0}{a_1}, \quad C_i = \frac{a_0}{g_{0i}} \quad (2.83)$$

$$g_{1i} = a_2 - C_{i-1}, \quad g_{0i} = a_1 - g_{1i} \cdot C_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots \quad (2.84)$$

Результаты расчета сведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчета коэффициентов

№ приближения	$C_i, 10^{-3}$	$g_{0i}, 10^{-4}$	$g_{1i}, 10^{-3}$
1	7,6102		
2	8,3609	4,8523	6,2898
3	8,3342	4,8679	5,5391
4	8,3355	4,8671	5,5658
5	8,33544	4,8672	5,5645
6	8,33544	4,8672	5,5646
7	8,33544	4,8672	5,5646

Разложение полинома

$$A(p) = (C \cdot p + 1) \cdot (g_0 \cdot p^2 + g_1 \cdot p + 1) \quad (2.85)$$

$$A(p) = (8,3354 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1) \cdot (4,8672 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 5,5646 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)$$

$$A(p) = (T_2 \cdot p + 1) \cdot (T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_1 \cdot p + 1) \quad (2.86)$$

Для расчета и построения кривой $h_\omega(t)$, найдем ее оригинал и необходимые коэффициенты

$$h_\omega(t) = 1 + C_1 \cdot e^{-\gamma \cdot t} \cdot \sin(\lambda \cdot t + \theta) + C_2 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (2.87)$$

$$h_\omega(t) = 1 - 0,985 \cdot e^{-5,72 \cdot t} \cdot \sin(44,97 \cdot t + 1,0694) - 0,136 \cdot e^{-119,97 \cdot t},$$

$$\gamma = \frac{\xi}{T_1} \quad (2.88)$$

$$\lambda = \frac{1}{T_2} \quad (2.89)$$

$$C_1 = -\frac{1}{\lambda \cdot \sqrt{T_1^2 \cdot (1 - 2 \cdot \gamma \cdot T_2) + T_2^2}} \quad (2.90)$$

$$C_2 = \frac{T_2^2}{T_1^2 \cdot (1 - 2 \cdot \gamma \cdot T_2) + T_2^2} \quad (2.91)$$

$$\theta = -\arctg \cdot \frac{\lambda \cdot T_2}{1 - \gamma \cdot T_2} + \arctg \cdot \frac{\lambda}{\gamma} \quad (2.92)$$

Аналогичную операцию по расчету поведем и для кривой $h_{ia}(t)$

$$h_{ia}(t) = C_1 \cdot e^{-\gamma \cdot t} \cdot \sin(\lambda \cdot t + \theta) + C_2 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (2.93)$$

$$h_{\omega}(t) = 45,15 \cdot e^{-5,72 \cdot t} \cdot \sin(44,47 \cdot t + 0,3711) - 16,35 \cdot e^{-119,97 \cdot t}$$

Результаты проведенных расчетов сведены в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты проведенных расчетов кривых $h_{ia}(t)$ и $h_{\omega}(t)$ необходимые для построения

t, с	$h_{ia}(t)$	$h_{\omega}(t)$
0	0	0,16453
0,03	249,2574	0,30322
0,06	358,5807	0,4526
0,08	413,813	0,61066
0,1	411,2749	0,75867
0,12	347,8305	0,87732
0,14	278,4961	0,97422
0,16	206,0527	1,05461
0,18	112,6183	1,10731
0,2	2,2749	1,10661
0,22	-53,5813	1,05932

Продолжение таблицы 2.6

t, с	$h_{ia}(t)$	$h_{\omega}(t)$
0,24	-72,8147	0,99669
0,26	-68,247	0,96374
0,28	-41,5703	0,98135
0,3	-14,8036	1,00832
0,32	11,1369	1,02336
0,34	22,4703	1,01387
0,36	19,7036	1,00734
0,38	13,9257	1,00247
0,4	7,1479	1,00034
0,42	1,3691	1,00099
0,44	-4,2754	1,00007
0,46	-6,3798	1,00006
0,48	-1,0276	1,00003
0,5	0,1397	1,00002

Графики переходных процессов представлены на рисунках 2.11 и 2.12.

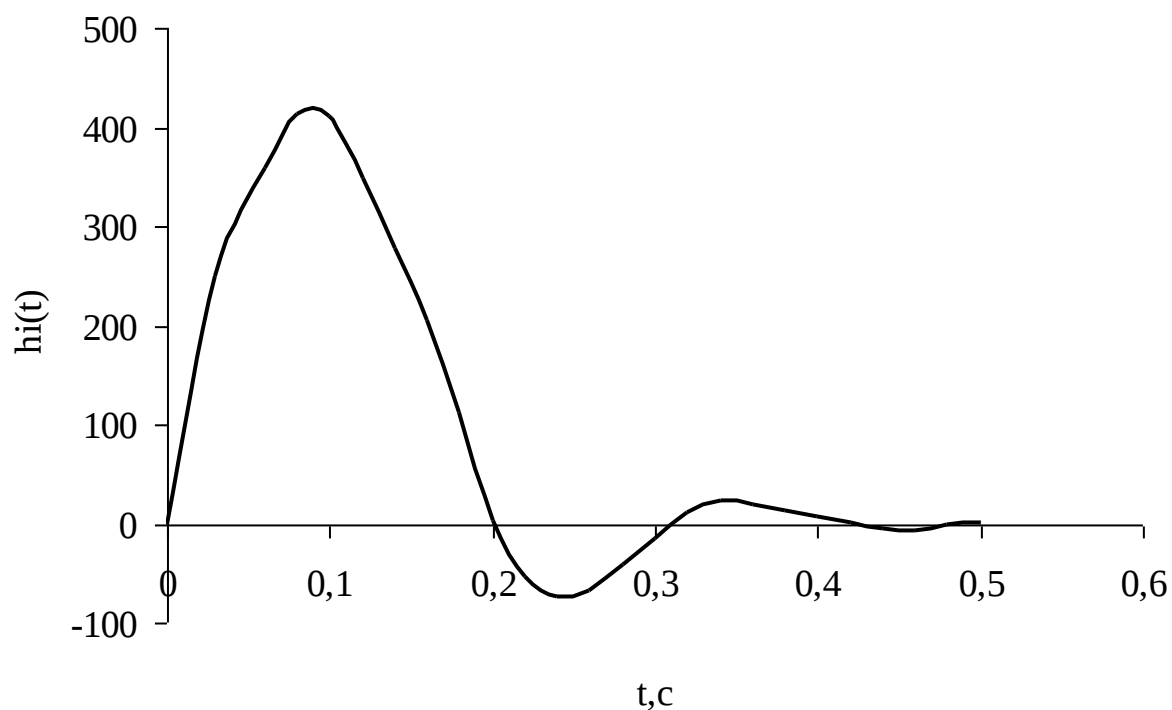


Рисунок 2.11 – Переходной процесс

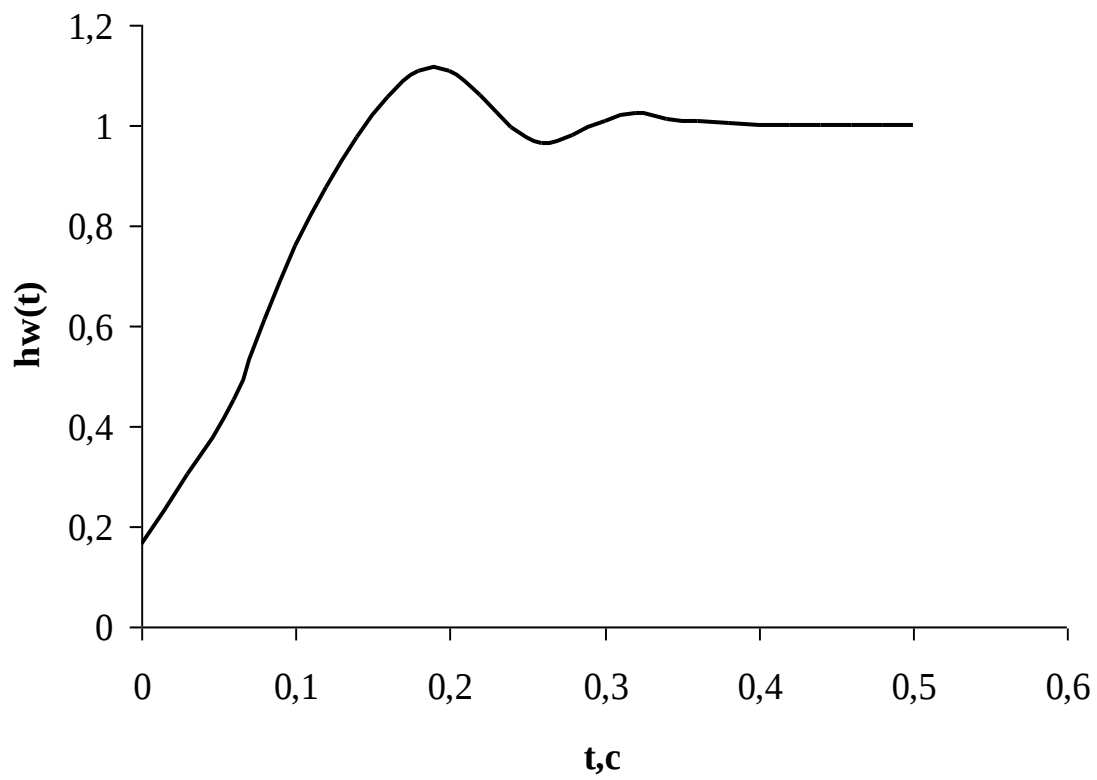


Рисунок 2.12 – Переходной процесс

3 Технико-экономическая часть

Целью технико-экономического обоснования в рамках дипломного проектирования является сравнительный анализ двух вариантов систем управления электроприводом пластинчатого конвейера – на базе схем Г–Д и ТП–Д.

3.1 Сравнительный анализ стоимости электрооборудования систем управления

Цены на электрооборудование приведены по данным официальных прейскурантов, актуальных на 2024 год. Стоимость компонентов электропривода для обоих вариантов 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.

3.2 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:

$$C_{\text{э\textsubscript{э}}} = \Delta W \cdot T_{\text{э}}, \quad (3.8)$$

где $T_{\text{э}}$ - тариф на электроэнергию, 24 тг/кВт*ч.

Полученные результаты расчета сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчета 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 , кВт*ч	2898	30520
C_3 , тенге	69552	732480
Разница, тенге	662 928	

Разница в годовых затратах на потери электроэнергии между рассматриваемыми системами составляет 662 928 тенге, что свидетельствует в пользу большей экономичности системы тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д) по сравнению с системой генератор – двигатель (Г–Д).

Таким образом, уже на основании анализа двух ключевых параметров можно сделать вывод о целесообразности выбора схемы ТП–Д как более эффективной с экономической точки зрения.

Прочие экономические показатели, не представленные в расчётах, предполагают незначительные отклонения между сравниваемыми вариантами, поэтому на основании уже рассмотренных данных можно уверенно определить предпочтительный вариант системы управления по критерию экономической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном дипломном проекте была спроектирована электромеханическая система управления приводом пластинчатого конвейера, предназначенного для применения в составе дробильно-сортировочного цеха. Подобные конвейеры используются для транспортировки тяжёлых, крупнокусковых и абразивных материалов в условиях повышенной запылённости, вибраций и переменных нагрузок, характерных для горнодобывающей и перерабатывающей промышленности.

В ходе проектирования были проведены необходимые расчёты, позволившие определить и обосновать выбор основных компонентов электропривода пластинчатого конвейера. К ним относятся электродвигатель, тиристорный преобразователь, редуктор и сглаживающий дроссель. Особое внимание было уделено обеспечению высокой надёжности работы в тяжёлых производственных условиях, а также стабильности скорости перемещения груза, необходимой для равномерной подачи материала к дробильному оборудованию.

Проведённые расчёты охватывали как разомкнутые, так и замкнутые схемы управления, что позволило смоделировать поведение системы в различных режимах работы, включая переходные процессы и воздействие возмущающих факторов. Также были построены электромеханические характеристики системы, отражающие влияние обратных связей по скорости и току, с учётом режимов токовой отсечки.

Дополнительно в работе рассмотрена необходимость реализации защиты от перегрузки и перегрева, возникающих при резких скачках нагрузки, что характерно для подачи негабаритной и влажной породы. Предусмотрено использование системы импульсно-фазового управления, которая обеспечивает высокую точность регулирования при переменных условиях эксплуатации. Это особенно важно для минимизации простоев оборудования и обеспечения бесперебойной работы всей технологической линии.

В технико-экономической части проекта были сравнены два варианта системы управления электроприводом пластинчатого конвейера — на базе схемы генератор – двигатель (Г–Д) и тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д). По результатам сравнительного анализа установлено, что система ТП–Д обладает более высокой энергетической эффективностью и требует меньших затрат на установку и обслуживание.

На основе проведённых расчётов был определён срок окупаемости затрат на внедрение системы управления по схеме ТП–Д, который составил два года. Это делает выбранное техническое решение экономически оправданным и перспективным для дальнейшего внедрения на предприятиях с аналогичными производственными условиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. - М. – Л., Госэнергоиздат, 1963.
- 2 Основы автоматизированного электропривода. - М., «Энергия», 1974. / Чиликин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М., Шинянский А.В.
- 3 Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. - М., «Энергия», 1966.
- 4 Сиротин А.А. Автоматическое управление электроприводами. - М., «Энергия», 1969.
- 5 Ключев В.И. Теория электропривода. - М., «Энергия», 1971.
- 6 Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами: Уч. пособие для ВУЗов. - М., Высшая школа, 1979.
- 7 Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. Елисеева В.А. и Шинянского А.В. – М., Энергоатомиздат, 1983.
- 8 Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. - М., Изд. МЭИ, 1971.
- 9 Рабинович Г.Я., Ситковский А.Я. Автоматизация ленточных конвейеров. - М., «Энергия», 1966.
- 10 Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчетов автоматизированного электропривода. - Л., «Энергия», 1971.
- 11 Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. - Л., 1973.
- 12 Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
- 13 Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учебное пособие для вузов, М.: Энергоатомиздат, 1984.
- 14 Правила устройства электроустановок /Минэнерго М.:Энергоатомиздат, 1985.
- 15 СТ КазННТУ – 09 – 2023. Учебная работа. Общие требования к структуре, оформлению, изложению и содержанию текстовых и графических материалов.
- 16 Самсонов В.С., Вяткин М.А. Экономика предприятий энергетического комплекса. - М., Высшая школа, 2003.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу
(наименование вида работы)

Ихласова Даурена Бакытжанұлы
(Ф.И.О. обучающегося)

6B07101 - Энергетика
(шифр и наименование специальности)

На тему: «Автоматизированный электропривод пластинчатого конвейера дробильно-
сортировочного цеха»

Дипломная работа студента Ихласова Даурена Бакытжанұлы посвящена решению важной задачи автоматизации тяжелых производственных процессов, актуальной для современной горнодобывающей и перерабатывающей промышленности. Выбор темы обусловлен необходимостью повышения надёжности, эффективности и устойчивости транспортных систем, работающих в условиях интенсивных нагрузок, запылённости, вибрации и переменной массы транспортируемого материала.

В процессе выполнения работы автор провёл теоретическое обоснование применения автоматизированного электропривода в условиях дробильно-сортировочного цеха, детально изучил конструктивные особенности пластинчатых конвейеров и их преимущества перед ленточными в условиях тяжёлой эксплуатации. В практической части проекта произведён расчёт и выбор электродвигателя, преобразователя, редуктора и сглаживающего дросселя, обеспечивающих необходимую мощность и стабильную работу привода. Особое внимание уделено анализу переходных процессов, а также построению электромеханических характеристик замкнутой и разомкнутой систем, что позволило оценить динамику и устойчивость всей схемы.

Замечания к работе

К незначительным замечаниям можно отнести отдельные моменты оформления графического материала, которые могли бы быть выполнены с большей визуальной проработкой. Также в некоторых разделах можно было бы расширить интерпретацию полученных результатов моделирования.

Оценка работы

В целом технический уровень выполнения дипломного проекта соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам и заслуживает оценки «хорошо» В (84 баллов), а её автор – присвоения академической степени бакалавра по образовательной программе 6B07101 – «Энергетика».

Рецензент

PhD, ассистент профессор

АО «АЛТУ Университет

им. М. Тынышпаева»

Ж.Ж. Калиев

(подпись)

«

»

2025 г.

Ф КазНТУ 704-24. Рецензия

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу
**«Автоматизированный электропривод пластинчатого конвейера дробильно-
сортировочного цеха»**

Ихласова Даурена Бакытжанұлы

6B07101 – «Энергетика»

Дипломная работа студента Ихласова Даурена посвящена разработке автоматизированного электропривода пластинчатого конвейера, применяемого в дробильно-сортировочном цехе. Актуальность проекта не вызывает сомнений, поскольку такие системы широко используются в промышленности, и их эффективность во многом определяется качеством реализации электропривода. В условиях высоких нагрузок, переменных технологических параметров и агрессивной среды, надёжность и точность работы привода становятся критически важными для всего производственного цикла.

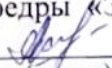
В процессе работы студент проявил инициативность, системное мышление и умение применять теоретические знания на практике. Им были проведены все необходимые инженерные расчёты, в том числе выбор и обоснование параметров электродвигателя, преобразователя, редуктора и дросселя, расчёт характеристик замкнутых и разомкнутых систем, а также анализ переходных процессов. Дополнительно выполнен сравнительный технико-экономический анализ двух принципиально разных схем электропривода, что говорит о глубоком понимании предметной области и стремлении к поиску оптимального решения.

Работа выполнена в полном объёме и в установленные сроки.

В целом, дипломная работа Ихласова Д.Б. соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным работам и заслуживает оценки «хорошо» В+ (85 баллов), а её автор – присвоения академической степени бакалавра по образовательной программе 6B07101 - «Энергетика».

Научный руководитель

PhD, ассоциированный профессор
кафедры «Энергетика»

 С.А. Минажова
(подпись)

«11» _____ 2025 г.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ихласов Даурен Бахытжанулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Автоматизированный электропривод пластинчатого конвейера дробильно-сортировочного цеха

Научный руководитель: Саулеш Минажова

Коэффициент Подобия 1: 7

Коэффициент Подобия 2: 2.6

Микропробелы: 6

Знаки из других алфавитов: 10

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 11.06.2025г.

Заведующий кафедрой Энергетики

Султанбаев Е.А.



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ихласов Даурен Бахытжанулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Автоматизированный электропривод пластинчатого конвейера дробильно-сортировочного цеха

Научный руководитель: Саулеш Минажова

Коэффициент Подобия 1: 7

Коэффициент Подобия 2: 2.6

Микропробелы: 6

Знаки из других алфавитов: 10

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата
11.06.2025

С.А. Минажова

проверяющий эксперт