

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»

Қалдарбек Адель Бақытжанқызы

Автоматизированный электропривод подвесного конвейера на
автомобильном заводе Allur

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»

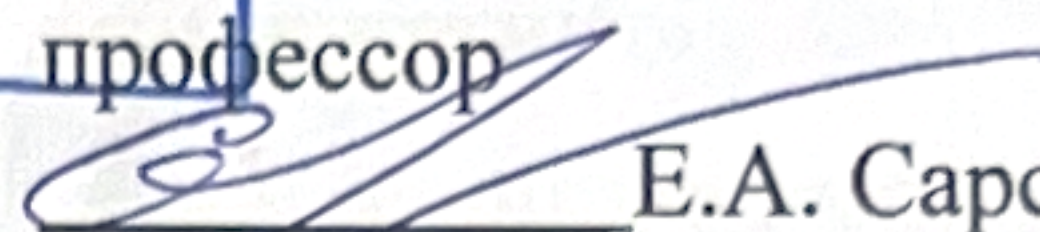
Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
«Энергетика»
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
Институт энергетики
и машиностроения

PhD, ассоциированный
профессор

 Е.А. Сарсенбаев

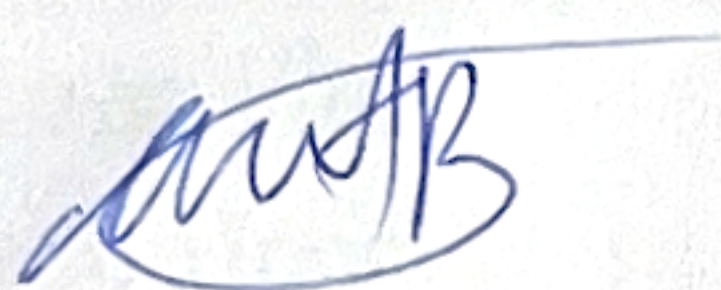
« 5 » 06 2025г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Автоматизированный электропривод подвесного конвейера на
автомобильном заводе Allur

6B07101– Энергетика

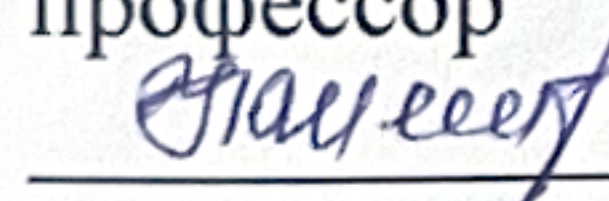
Выполнила:



Қалдарбек А.Б.

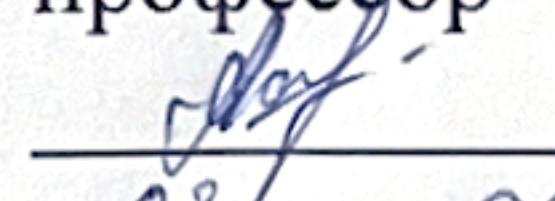
Рецензент

PhD, ассоциированный
профессор

 Л.Ш. Утешкалиева
« 04 » 06 2025 г.

Научный руководитель

PhD, ассоциированный
профессор

 С.А. Минажова
« 03 » 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

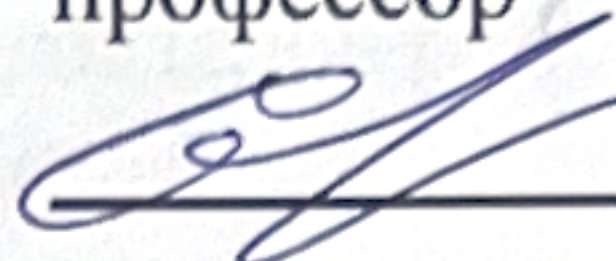
Кафедра «Энергетика»

6B07101– Энергетика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Энергетика»

PhD, ассоциированный
профессор

 Е.А. Сарсенбаев
«30» 01 2025г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Қалдарбек Адель Бақытжанқызы

Тема: Автоматизированный электропривод подвесного конвейера на
автомобильном заводе Allur

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
 $Z_{см}=12000$ шт., продолжительность смены $T_{см}=8$ час, эксплуатационная
продолжительность $Z_{э}=1500$ шт/ч, наибольший угол наклона пути $\beta_{тп}=300$,
диаметр звездочек $D=831.7$ мм, масса подвески - $G_n=7$ кГ, масса груза
(поковки) $G=10$ кГ, вес каретки $G_n=8$ кГ, условия работы – средние.

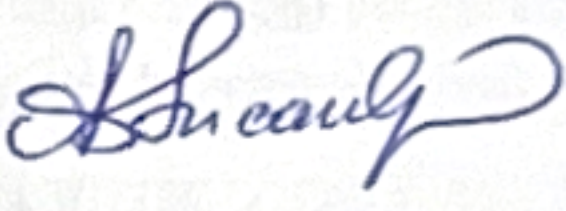
Краткое содержание дипломной работы: Аналитическая часть, тяговый
расчет конвейера и выбор электродвигателя, расчет параметров
электродвигателя, выбор ЧП, составление структурной схемы,
исследование переходных процессов в MatLab, экономическая часть.
Графические материалы дипломной работы представлены в 10 слайдах.

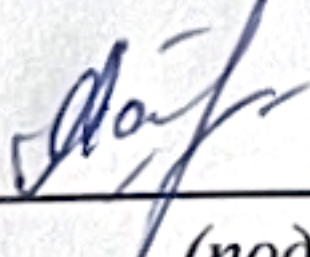
ГРАФИК

подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретическая часть	10.02 – 19.03. 2025г	—
Расчетная часть	10.03 – 22.04.2025г	—
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	22.04.2025	
Экономическая часть	С.А. Минажова, PhD, ассоциированный профессор	30.04.2025	
Нормаконтроль	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель	09.06.2025	

Научный руководитель  С.А. Минажова
(подпись)

Задание принял к исполнению обучающийся  А.Б. Қалдарбек
(подпись)

Дата " 19 " мая 2025г.

АННОТАЦИЯ

В дипломной работе рассмотрены технические вопросы модернизации автоматизированного электропривода подвешенного конвейера. Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи проекта. В основной части выполнен обзор типов конвейеров, условий их эксплуатации и применяемых электроприводов, а также сформулированы требования к ним. На основе тягового расчёта выбран асинхронный двигатель 4A112MA8U3, рассчитаны его характеристики и энергетические показатели. Разработана силовая схема привода, произведён выбор и расчёт параметров частотного преобразователя. Построена структурная схема системы управления, получены передаточные функции. В среде Matlab/Simulink создана модель электропривода и проведён анализ переходных процессов, включая динамику момента и скорости ротора.

АНДАТПА

Дипломдық жұмыста ілмекті конвейердің автоматтандырылған электр жетегін жаңғыртудың техникалық мәселелері қарастырылды. Кіріспе бөлімінде тақырыптың өзектілігі негізделіп, жобаның мақсаты мен міндеттері айқындалды. Негізгі бөлімде конвейер түрлері, олардың жұмыс істеу жағдайлары мен қолданылатын электр жетектеріне шолу жасалды, оларға қойылатын талаптар анықталды. Тяга есебі негізінде 4A112MA8U3 типті асинхронды қозғалтқыш таңдалып, оның сипаттамалары мен энергия көрсеткіштері есептелді. Жетектің қуат сұлбасы әзірленіп, жиілік түрлендіргіштің параметрлері таңдалып және есептелді. Басқару жүйесінің құрылымдық сұлбасы құрастырылып, негізгі элементтердің беріліс функциялары анықталды. Matlab/Simulink ортасында электр жетегінің моделі жасалып, өтпелі процестер, соның ішінде момент пен ротор жылдамдығының динамикасы зерттелді.

ANNOTATION

The thesis focuses on the technical aspects of modernizing the automated electric drive of a suspended conveyor. The introduction justifies the relevance of the topic and defines the project's goals and objectives. The main part provides an overview of conveyor types, operating conditions, and applied electric drives, along with the requirements for such systems. Based on traction calculations, an asynchronous motor of type 4A112MA8U3 was selected, and its characteristics and energy indicators were calculated. A power circuit of the drive was developed, and the parameters of the frequency converter were selected and calculated. A block diagram of the control system was built, and transfer functions of key components were obtained. A model of the electric drive was created in Matlab/Simulink, and a transient analysis was carried out, including the dynamics of torque and rotor speed.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	7
1	Общие сведения о конвейерах и их электроприводах	8
1.1	Типы подвесных конвейеров и их конструкций	9
1.2	Особенности режимов работы подвесных конвейеров и требования, предъявляемые к электроприводам конвейеров	16
1.3	Типы электроприводов, предназначенных для конвейеров. Принципы работы, достоинства и недостатки	17
1.4	Перспективы использования частотно-регулируемых электроприводов	21
2	Выбор и расчет основных силовых элементов электропривода конвейера	24
2.1	Исходные данные для проектирования и кинематическая схема конвейера	24
2.2	Выбор электродвигателя для привода конвейера и расчет его параметров и характеристик	27
2.3	Расчет параметров Т-образной схемы замещения электродвигателя	29
2.4	Расчет естественных механической и электромеханической характеристик электродвигателя	31
2.5	Расчет искусственных механических характеристик электродвигателя при законе $U/f = \text{const}$ частотного регулирования	38
2.6	Выбор преобразователя частоты. Общие положения	45
2.7	Описание преобразователя частоты E2-8300-S3L	48
2.8	Расчет энергетических показателей электродвигателя	52
3	Исследование системы электропривода в динамических режимах работы	55
3.1	Расчет параметров объекта управления	55
3.2	Структурная схема системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» и расчет ее параметров	56
3.3	Выбор виртуальной модели электропривода и исследование переходных процессов	57
	Заключение	62
	Список литературы	63

ВВЕДЕНИЕ

В современную эпоху высоких технологий практически все отрасли народного хозяйства были полностью электрифицированы. Электрификация стала основой для внедрения автоматизации и механизации технологических и производственных процессов. Это, в свою очередь, способствует увеличению производительности труда и улучшению условий работы для персонала. Ключевую роль в общей электрификации играет электрический привод. Он является основным элементом в приводных системах транспортных устройств, технологического оборудования, приборов медицинского назначения, в промышленности, а также в телевизионной и космической технике и многих других сферах. Поскольку технологии не стоят на месте, к системам автоматического электропривода предъявляются всё более разнообразные и сложные требования. В этой области ведутся активные исследования, создаются новые теоретические подходы, основанные на современных математических моделях и усовершенствованных методах. В результате таких разработок автоматизированный электропривод сегодня фактически сформировался в самостоятельную техническую и научную дисциплину. По своей сути автоматизированный привод представляет собой синтез знаний из электротехники, теории автоматического управления и механики, что позволило сформировать уникальный подход к решению инженерных задач и проведению исследований. В рамках данного дипломного проекта рассматривается система автоматизированного электропривода подвешенного конвейера, используемого на автомобильном предприятии. Подобные конвейеры играют важную роль в организации производства, особенно в условиях массового выпуска, где необходима непрерывная и безопасная транспортировка изделий. Создание энергоэффективного и управляемого по частоте электропривода для конвейерных установок представляет собой актуальную задачу. Основной целью данной дипломной работы является выбор и проектирование частотно-регулируемого электропривода для подвешенного конвейера с заданной производительностью. На основе проведённых расчётов тяговых характеристик был выбран асинхронный двигатель нужной мощности, определены его параметры, построены его естественные и управляемые механические и электромеханические характеристики, а также разработаны функциональная и структурная схемы замкнутой системы частотного регулирования. Кроме того, с помощью программной среды Matlab исследованы переходные процессы данной системы.

1 Общие сведения о конвейерах и их электроприводах

Конвейер предназначен для организации производственного процесса, при котором обработка объектов делится на последовательные этапы. Это позволяет выполнять операции одновременно над разными изделиями, что значительно увеличивает производительность. Термин "конвейер" также применяется к механизму, перемещающему объекты между этапами.

Главная особенность конвейера — непрерывность работы. Он используется как для транспортировки грузов на короткие расстояния, так и в поточном производстве, где движущийся объект проходит этапы сборки. Такая система сделала возможным выполнение сложных операций менее квалифицированными работниками, упростив и ускорив процесс.

Конвейеры классифицируют по разным признакам:

- по направлению движения: горизонтальные, вертикальные, наклонные;
- по типу груза: для штучных и насыпных материалов;
- по функциям: транспортировочные и сборочные;
- по размещению: напольные и подвесные;
- по типу тягового элемента: ленточные, цепные, канатные;
- по способу перемещения: гравитационные, инерционные, винтовые;
- по конструкции: гладкие, скребковые, ковшовые, люлечные, карманные
-



Рисунок 1.1 – Ленточный конвейер



Рисунок 1.2 – Подвесной конвейер

На производственных предприятиях применяются различные типы конвейеров:

- Винтовой (шнековый) — состоит из желоба и вращающегося винта,

используется для перемещения сыпучих материалов.

- Канатный – включает канат с закреплёнными дисками, которые перемещают неабразивные вещества (например, уголь) по желобу.
- Качающийся – применяется для транспортировки мелких предметов, которые движутся по наклонной вибрирующей поверхности.
- Ковшовый – оснащён подвижными ковшами, которые переносят сыпучие материалы (уголь, щебень, шлак); ковши устанавливаются вплотную для непрерывной подачи.
- Пластинчатый – состоит из параллельных цепей, соединённых металлическими или пластиковыми пластинами, подходит для тяжёлых или нестандартных грузов.
- Пневматический – транспортирует материалы с помощью воздушного потока внутри трубопровода, материал движется либо в потоке, либо в закрытых контейнерах.
- Роликовый – состоит из ряда роликов, по которым перемещаются крупные твёрдые объекты; может иметь наклон (гравитационный принцип) или привод.
- Скребковый – с помощью скребков, закреплённых на цепи, перемещает сыпучие грузы по желобу, выгрузка возможна в конце или через боковые отверстия.
- Тележечный – используется для транспортировки сборочных узлов; при напольном исполнении на тележках устанавливают специальные приспособления для сварки и сборки.
- Шаговый – предназначен для поэтапного перемещения собираемых и свариваемых узлов в составе поточных линий; обеспечивает точную подачу на рабочие позиции.
- Ленточный – используется для транспортировки сыпучих грузов на агломерационных установках, в доменных цехах металлургии, на тепловых электростанциях и других промышленных объектах.

1.1 Типы подвесных конвейеров и их конструкций

Подвесные конвейеры предназначены для перемещения штучных грузов различной формы, массы и размеров, включая полуфабрикаты, сборочные узлы и готовую продукцию. Перемещение осуществляется по замкнутому маршруту с пространственно сложной конфигурацией со скоростью от 0,1 до 45 м/мин. Транспортируемые изделия размещаются в подвесках или специальных контейнерах, которые крепятся к тележкам или кареткам, передвигающимся по подвесной направляющей.

Загрузка и выгрузка грузов на таких конвейерах может выполняться как вручную, так и с использованием автоматизированных систем, прямо во время движения. В процессе перемещения возможно выполнение ряда технологических операций — таких как пескоструйная обработка, химическое

травление, окраска, сушка, термообработка, сборка, складирование и прочие этапы. Подвесные конвейеры находят широкое применение в таких отраслях, как машиностроение, пищевая, химическая промышленность и др.

Классификация подвесных конвейеров осуществляется по способу взаимодействия тягового устройства с подвеской и по методу транспортировки груза:

Грузонесущий подвесной конвейер — тележки с подвесками жёстко соединены с цепью и движутся по фиксированной трассе подвесного пути.

Грузотолкающий подвесной конвейер — тележки с грузами не соединены с цепью напрямую, а перемещаются под действием толкателей, установленных на тяговой цепи. При этом тяговая цепь с толкателями движется по одному пути, а тележки — по отдельному.

Комбинированный (несуще-толкающий) — объединяет принципы работы предыдущих двух: на отдельных участках груз перемещается посредством проталкивания, на других — в подвешенном положении.

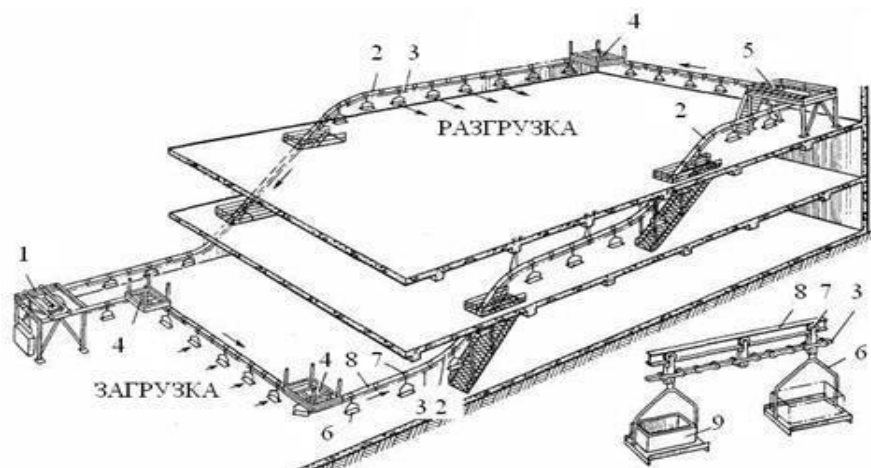
Грузоведущий подвесной конвейер — перемещает наземные тележки, движущиеся по полу. Связь между тележкой и цепью осуществляется через вертикальный шток, управляемый толкателем каретки.

Комбинированный несуще-грузоведущий — тележки прикреплены к каретке через шарниры и движутся как по полу, так и в подвешенном состоянии, например, при подъёме на разные уровни.

Все виды подвесных транспортёров имеют схожие конструктивные элементы: приводы, натяжные устройства, унифицированные тяговые цепи и поворотные механизмы. Основные отличия касаются подвесных путей, типов тележек и других специфических компонентов.

Грузонесущий подвесной конвейер (см. рисунок 1.3) включает замкнутую по маршруту цепь с закреплёнными на ней каретками. К кареткам подвешиваются шарнирные держатели с транспортируемыми предметами. Привод обеспечивает движение всей системы по подвесному пути, закреплённому к строительным конструкциям. Натяжение цепи осуществляется за счёт специального механизма.

Основные эксплуатационные характеристики подвесных конвейеров включают: массовую производительность Q (т/ч), штучную производительность Z (шт./ч), скорость движения цепи v (м/с), шаг цепи t_c (м), грузоподъёмность одной каретки N_g (кг). Конвейеры классифицируются также по типу привода (одноприводные и многоприводные) и по типу тягового устройства (цепные, канатные).



1 – натяжное устройство; 2 – вертикальные перегибы трассы; 3 – тяговый элемент; 4 – поворотные устройства; 5 – привод; 6 – подвески; 7 – каретки; 8 – подвесной путь; 9 – груз

Рисунок 1.3 – Подвесной грузонесущий конвейер

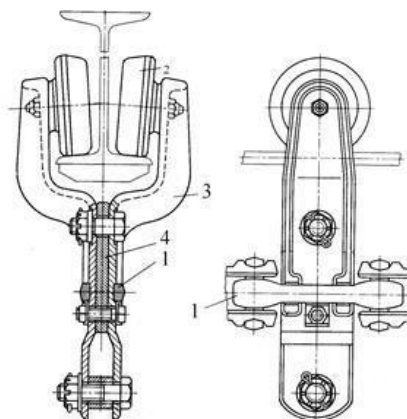
К основным достоинствам подвесных конвейеров можно отнести: возможность организации пространственной трассы, охватывающей полный цикл производства как внутри одного цеха, так и между соседними зданиями; гибкость трассы в условиях изменения технологического процесса; способность накапливать запас обрабатываемых изделий прямо на линии; низкое потребление энергии; широкие возможности автоматизации.

В качестве тягового органа для подвесных систем, работающих в горизонтальной плоскости, применяются цепи или канаты. При построении пространственных трасс используются специальные сборные цепи, которые обеспечивают плавные повороты как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

Грузонесущую функцию выполняют каретки. Они делятся на грузовые — одиночные или траверсные, предназначенные для крепления подвесок с изделиями и их перемещения по направляющим путям — и опорные, которые размещаются между грузовыми и служат для поддержки цепи, снижая её провисание. Конструкция каретки зависит от используемого профиля направляющего пути.

Каретка подвесного конвейера (см. рисунок 1.4) обычно состоит из двух роликов на консольных осях с подшипниками, кронштейнов и прокладки. Ролики, как правило, имеют безрёберную конструкцию, а форма обода подбирается в соответствии с профилем направляющего пути. Наиболее надёжным вариантом исполнения считается ролик с подшипником и сфероконическим ободом, выполненный как единый узел — это повышает надёжность в эксплуатации.

Кронштейны кареток должны обеспечивать высокую прочность и жёсткость конструкции при минимальном собственном весе, что важно для долговечности и стабильности работы всей системы.



1 – цепь; 2 – катки; 3 – кронштейн; 4 – прокладки

Рисунок 1.4 – Каретка подвешного грузонесущего конвейера

Шаг установки кареток (см. рисунок 1.5) определяется как расстоянием между подвесками с грузами, так и требуемыми значениями радиусов вертикальных перегибов трассы. При уменьшении шага между каретками возможно достижение меньшего радиуса перегиба. В системах, где предусмотрены участки с вертикальными изменениями направления движения, каретки, как правило, размещаются через 4–10 шагов тяговой цепи, при этом расстояние между ними не должно превышать 960 мм.

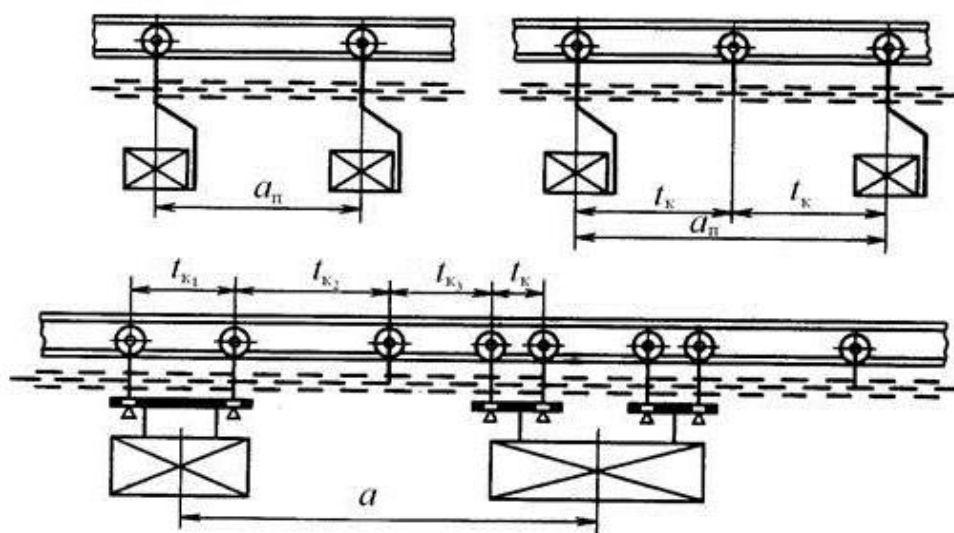


Рисунок 1.5 – Схема установки одинарных и траверсных кареток на тяговой цепи

В конвейерных системах с наличием вертикальных перегибов шаг установки кареток рассчитывается по формуле: $t_k = (4-10) t_{ц}$, где $t_{ц}$ — шаг тяговой цепи. При превышении этого значения дополнительно монтируются вспомогательные каретки, чтобы избежать чрезмерного провисания цепного элемента.

Роликовая батарея (см. рисунок 1.6) представляет собой конструкцию из последовательно установленных неподвижных роликов, размещённых по дугообразной траектории.

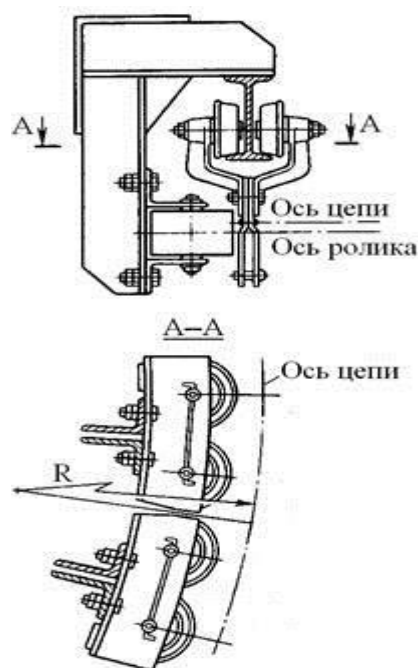


Рисунок 1.6 – Поворотное устройство подвесного конвейера на роликовой батарее

Оси роликов фиксируются на стационарной раме, которая монтируется либо на металлоконструкции, либо непосредственно на направляющем пути. Ролики изготавливаются из серого чугуна либо из стали марки 40. Их диаметр составляет 70 мм, а расстояние между роликами (шаг) находится в пределах 90–170 мм. Такие роликовые батареи применяются, как правило, в конструкциях с разборными или пластинчатыми цепями.

Направляющие шины — это изогнутые по определённому радиусу участки направляющего пути, которые используются при эксплуатации двухшарнирных и стержневых цепей.

Поворотные узлы монтируются на стойках с консолями, на специальных кронштейнах, тягах или подвешиваются к конструктивным элементам здания (например, к перекрытиям). Радиус поворота конвейерной трассы в горизонтальной плоскости зависит от типа поворотного механизма и от характеристик тягового элемента. При использовании звёздочки поворот делают с радиусом, меньшим, чем радиус начальной окружности этой звёздочки. Если же

поворот осуществляется через блок с гладким ободом, радиус определяется с учётом взаимного расположения тягового элемента и каретки на блоке.

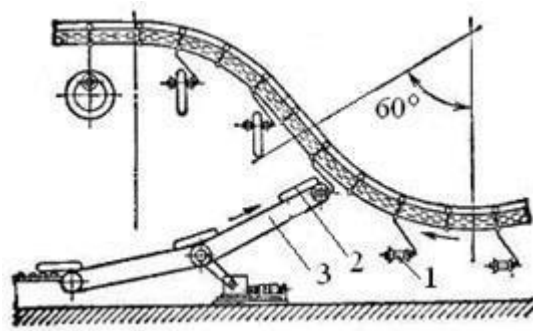
Приводные системы подвесных конвейеров различаются по типу применяемой цепи: для всех типов цепных передач используют угловые приводы со звёздочкой или прямолинейные гусеничные приводы. В случае применения каната или круглозвенной цепи используются фрикционные приводы. Угловые приводы со звёздочками, как правило, устанавливаются в местах, где требуется поворот трассы на 90° или 180° , в то время как гусеничные приводы размещаются на прямолинейных участках горизонтальной трассы. Элементы гусеничного привода закрепляются на подвижной раме, которая перемещается внутри стационарной конструкции подвесного пути.

Приводы могут обеспечивать как постоянную, так и регулируемую скорость перемещения. Плавная регулировка скорости достигается использованием вариаторов, гидравлических двигателей или электромоторов постоянного тока. Приводные узлы, как правило, размещают в тех точках трассы, где возникает наибольшее натяжение тягового элемента — после длинных и нагруженных горизонтальных отрезков или подъёмов. Это позволяет оптимизировать тяговые усилия и натяжение цепи, особенно на участках с большим числом поворотов, где сопротивление движению максимальное.

В многоприводных системах предусматривается установка нескольких приводных агрегатов. При этом необходимо, чтобы все электроприводы работали синхронно — имели одинаковые характеристики двигателей и равные передаточные числа в редукторах.

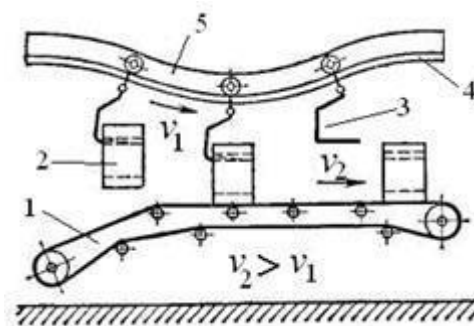
Подвески выполняют функцию несущего элемента в подвесном конвейере. Их конструктивное исполнение зависит от характеристик груза (массы, формы, габаритов), от специфики производственного процесса, а также от способов загрузки и выгрузки. Подвески могут быть выполнены в виде лотков, этажерок, крюков, захватов, контейнеров и т.д., и, как правило, крепятся к каретке или траверсе через шарнирное соединение, что обеспечивает устойчивое вертикальное положение при прохождении наклонных участков трассы и надёжное удержание груза.

Подвеска должна обладать достаточной прочностью, быть экономически целесообразной в изготовлении, а также обеспечивать удобство при загрузке и выгрузке груза. Она должна гарантировать безопасное и надёжное перемещение продукции как по горизонтальным, так и по наклонным отрезкам конвейерной линии. Процесс загрузки и выгрузки может осуществляться вручную, с использованием подъёмных механизмов, либо в полуавтоматическом или полностью автоматизированном режиме (см. рисунки 1.7, 1.8).



1 – подвеска; 2 – груз; 3 – ленточный конвейер

Рисунок 1.7 – Схема полуавтоматической загрузки подвесного конвейера



1 – ленточный конвейер; 2 – груз; 3 – подвеска; 4 – цепь; 5 – подвесной путь

Рисунок 1.8 – Схема полуавтоматической разгрузки подвесного конвейера

Система автоматического адресного управления подвесками позволяет производить загрузку и выгрузку грузов в строго заданных точках трассы без участия оператора.

Процесс автоматической разгрузки осуществляется следующим образом: система адресации присваивает каждой подвеске конкретное место разгрузки. В движении, при достижении назначенного участка, адресоноситель активирует исполнительный механизм. Этот механизм либо отсоединяет груз от подвески, либо передаёт его на внешнее устройство, не связанное непосредственно с конвейером.

Адресной информацией в системах автоматического управления служат такие элементы, как диски, выступы, клавиши, штыри и контакты. Определённое расположение этих элементов на адресоносителе формирует уникальный адрес, присваиваемый каждой подвеске с грузом.

Для предотвращения падения грузов при перемещении по наклонным и вертикальным участкам, а также на горизонтальных отрезках, пролегающих над пешеходными проходами или транспортными проездами, устанавливаются защитные ограждения в виде лотков. Такие ограждения изготавливаются из

металлической сетки либо листовой стали и монтируются на раме, которая подвешивается к ходовой части транспортной системы.

Контроль перегрузок в приводной и ходовой системах осуществляется при помощи предохранительных устройств — срезных штифтов и упорных пружин, встроенных в приводной механизм. В случае обрыва цепи используются улавливатели, обеспечивающие захват цепи или кареток, что предотвращает аварийные ситуации.

Положение натяжной тележки и груза отслеживается конечными выключателями, закреплёнными на конструкции натяжного механизма. Состояние цепи может проверяться как вручную, так и с применением автоматических диагностических средств.

Работой системы управляет централизованный пульт, на котором размещаются органы управления запуском, сигнальные устройства, лампы индикации, а также мнемосхема трассы, на которой отображаются точки загрузки и разгрузки. Пульт также фиксирует положение всех конечных выключателей и показывает текущее состояние конвейера. Кроме того, на нём могут устанавливаться счётчики груза.

Современные конвейерные линии дополнительно оснащаются автоматизированной системой видеонаблюдения, включающей средства электронного контроля, которые в режиме реального времени передают информацию на процессор, установленный в диспетчерском центре управления.

1.2 Особенности режимов работы подвесных конвейеров и требования, предъявляемые к электроприводам конвейеров

Эксплуатационные условия:

- конвейеры, как правило, функционируют в длительном режиме, то есть работают на протяжении всей смены или нескольких смен подряд без остановок на выключение;
- запуск оборудования осуществляется сравнительно редко, и продолжительность включения не оказывает существенного влияния на общую производительность;
- при запуске, особенно после экстренной остановки, возможны большие пусковые нагрузки, превышающие номинальные значения (в том числе статические моменты: $M_{с,тр} > M_{с,ном}$);
- электродвигатели эксплуатируются в разнообразных условиях окружающей среды – на открытых площадках, в пыльных и влажных зонах, при высоких или низких температурах, а также в цехах с агрессивной атмосферой.

К электроприводу предъявляются следующие требования:

- повышенный пусковой момент, равный 1,6–1,8 от номинального значения ($M_{п}/M_{ном} = 1,6...1,8$);
- плавность разгона и торможения, что важно для исключения рывков, пробуксовки ленты или колебаний груза (особенно у ленточных и подвесных

конвейеров);

- возможность регулировки скорости в небольшом диапазоне (обычно 1:2), что позволяет адаптировать работу к требованиям производственного потока;
- синхронная работа приводов, особенно при применении нескольких двигателей, обеспечивающая равномерное движение всей системы.

Таким условиям в достаточной мере соответствует электропривод на базе трёхфазных асинхронных электродвигателей, рассчитанных на продолжительный рабочий цикл. Варианты исполнения включают двигатели с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором.

К недостаткам короткозамкнутых асинхронных двигателей можно отнести высокий пусковой ток, однако они позволяют существенно снизить стоимость автоматизации транспортных систем. При этом предпочтение следует отдавать двигателям с увеличенным пусковым моментом.

Для конвейеров с одним электроприводом, где необходимо регулирование скорости, применяют многоскоростные электродвигатели с возможностью переключения пар полюсов. Также могут использоваться механические вариаторы, регулируемые электрические или гидравлические муфты.

Асинхронные двигатели с фазным ротором целесообразно использовать в случаях, когда необходим высокий пусковой момент, а также для многоприводных установок, где важно выравнивание нагрузки между электродвигателями или требуется согласованное движение, например, в системах подвесных транспортёров (ПТС).

1.3 Типы электроприводов, предназначенных для конвейеров. Принципы работы, достоинства и недостатки

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (КЗ-ротором) могут использоваться как в односкоростном, так и в многоскоростном исполнении (путём переключения количества пар полюсов). В случаях, когда требуется регулировка скорости для однодвигательных конвейерных систем, дополнительно применяются механические вариаторы, а также регулируемые муфты — электрические или гидравлические.

Асинхронные двигатели с фазным ротором целесообразно применять:

- когда конвейер требует увеличенного пускового момента;
- при наличии многодвигательного привода, чтобы достичь равномерного распределения нагрузки между всеми двигателями;
- при необходимости согласованного движения отдельных участков системы.

Многоприводные системы находят применение на длинных конвейерах, где использование одной приводной станции может привести к чрезмерным механическим нагрузкам, перегрузкам отдельных секций, а также к увеличению размеров и натяжения тягового элемента. Размещение нескольких приводных

станций позволяет снизить усилия в тяговом органе и уменьшить износ оборудования. При этом каждая станция передаёт тяговое усилие только на обслуживаемый ею участок, а не на весь конвейер.

Расположение приводных агрегатов определяется на основании диаграммы натяжения, учитывающей сопротивления перемещению по всей длине трассы. Количество приводных станций выбирается исходя из технико-экономических расчётов.

Для систем с несколькими приводами на базе АД с КЗ-ротором требуется подбор двигателей с одинаковыми параметрами. В случае применения фазных асинхронных двигателей, их рабочие характеристики можно уравновесить путём введения дополнительных сопротивлений в роторные цепи.

Существует ряд механизмов, в которых используется два и более одинаковых электродвигателя, работающих с одинаковой скоростью. Примеры таких объектов: башенные краны, разводные мосты, шлюзовые ворота, а также конвейеры, требующие строго согласованного вращения приводов. В тех случаях, когда механическое соединение валов невозможно, применяется электрическая синхронизация, известная как электрический вал.

Такая система реализуется через специальные схемы, обеспечивающие электрическую связь между роторами синхронных или асинхронных двигателей.

В состав схемы входят два основных двигателя — ГД1 и ГД2, каждый из которых приводит в движение свой механизм («механизм 1» и «механизм 2»). Оба двигателя имеют идентичные характеристики. На валах этих двигателей установлены вспомогательные асинхронные машины — АД1 и АД2, роторы которых имеют фазное исполнение и соединяются между собой электрически. При этом мощность вспомогательных двигателей значительно ниже, чем у основных. Эта схема позволяет обеспечить согласованное вращение без механической связи между ведущими валами.

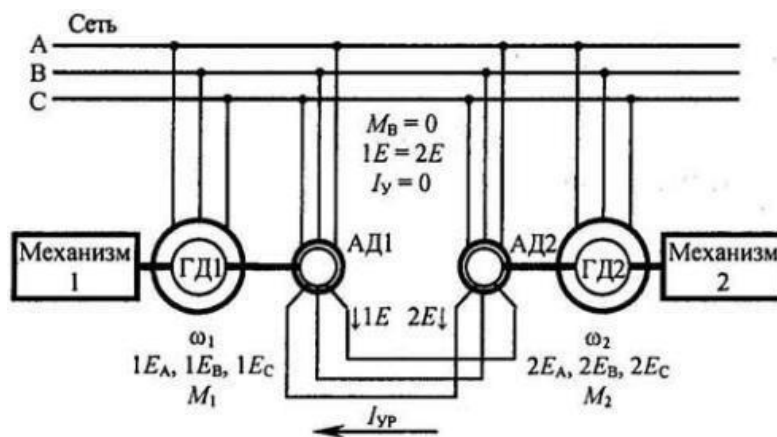


Рисунок 1.9 – Схема «электрического вала» с вспомогательным АД

Статорные обмотки главных двигателей подключаются к сети с прямой последовательностью чередования фаз, тогда как обмотки вспомогательных

асинхронных машин — к сети с обратной последовательностью фаз. Если нагрузки на механизмы отличаются, происходит рассогласование угловых скоростей вращения роторов ($\omega_1 \neq \omega_2$). В результате возникает разность электродвижущих сил (ЭДС), которая вызывает появление уравнивающих токов. Эти токи создают компенсирующие моменты (M_1 и M_2), направленные противоположно причине, вызвавшей расхождение скоростей. В соответствии с законом Ленца, это взаимодействие продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто равенство скоростей роторов ($\omega_1 = \omega_2$).

Преимущества данной схемы:

- высокая энергетическая эффективность;
- жёсткая механическая характеристика, обеспечивающая стабильную работу при переменных нагрузках.

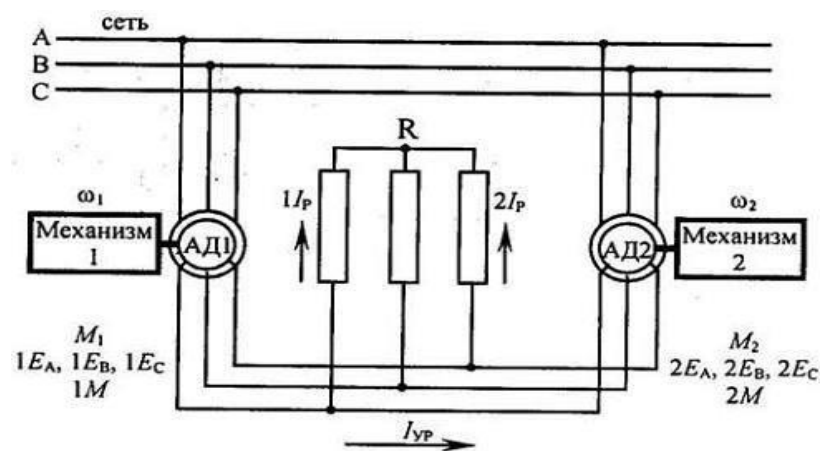


Рисунок 1.10 – Схема «электрического вала» с резисторами

В состав схемы входят два асинхронных электродвигателя с фазными роторами (обозначенные как АД1 и АД2), а также резисторы (R), подключённые в роторные цепи. Принцип действия аналогичен предыдущей схеме с использованием вспомогательных двигателей.

Минусы этой схемы (в сравнении с ранее описанной):

- более низкий КПД, поскольку создаваемые уравнивающие моменты (M_1 и M_2) значительно меньше;
- присутствие добавочных резисторов в цепях роторов снижает жёсткость механических характеристик и вызывает дополнительные энергетические потери.

Плюсы по сравнению с предыдущим вариантом:

- конструктивно схема является более простой;
- стоимость ниже;
- требует меньше монтажного пространства.

В другой модификации схемы используются два приводных асинхронных двигателя с фазным ротором (Д1 и Д2), а также преобразователь частоты (ПЧ). При этом обмотки статоров ПЧ и двигателей подключаются к питающей сети, а обмотки роторов электрически соединены между собой.

При вращении ПЧ частота в роторах будет пропорциональна скольжению, скорость вращения всех машин будет одинаковой и равной $\omega = \frac{2\pi}{p}(f_1 - f_2)$. Это справедливо при равных нагрузках на механизмах.

Если, например, нагрузка на первый механизм увеличивается, его скольжение возрастает, а угловая скорость снижается. Это приводит к увеличению ЭДС в роторе двигателя Д1, что вызывает рост роторного тока и электромагнитного момента, за счёт чего система самостоятельно компенсирует разбаланс и возвращается к согласованному режиму работы.

Для возможности регулирования согласованной скорости механизмов (без изменения частоты сети) может быть добавлено устройство изменения частоты, например, механический вариатор. Это расширяет диапазон рабочих скоростей при сохранении стабильной работы системы.

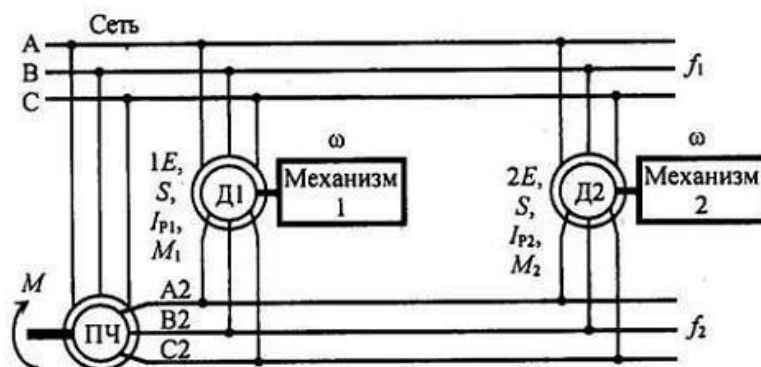


Рисунок 1.11 – Схема «электрического вала» двойного питания

Рассмотренные схемы можно применять для любого числа согласованно работающих механизмов, принцип работы схемы не меняется.

1.4 Перспективы использования частотно-регулируемых электроприводов

Для запуска и остановки конвейерных установок широко применяются релейно-контакторные схемы и устройства плавного пуска, что позволяет эффективно решать задачи, связанные с пусковыми режимами. Однако для реализации других функциональных требований, таких как регулировка скорости движения ленты в зависимости от уровня загрузки или снижение динамических перегрузок, необходимо использование регулируемых электроприводов.

В современных промышленных системах наибольшую эффективность и универсальность демонстрируют частотно-регулируемые электроприводы на основе асинхронных и синхронных двигателей. При этом синхронные

электроприводы реализуются с применением высоковольтных преобразователей частоты, рассчитанных на выходные напряжения 6 или 10 кВ.

Асинхронные приводы с регулировкой частоты комплектуются преобразователями как отечественного, так и зарубежного производства, и предназначены для работы с двигателями, рассчитанными на номинальные напряжения: 0,4; 0,69; 1,19; 3,0 (3,3); 6,0 (6,3; 6,6); 10,0 (10,5) кВ. Так как управление скоростью ленты и ограничение динамических воздействий требует широкого диапазона регулирования — не менее 10:1, применение двухтрансформаторных преобразователей частоты в приводах конвейеров становится невозможным. Это связано с тем, что повышающие трансформаторы уже при коэффициенте регулирования 1,5:1 входят в режим магнитного насыщения из-за пониженной частоты тока, что вызывает повышенные потери энергии.

Низковольтные преобразователи (до 1,19 кВ) и высоковольтные устройства (до 10 кВ) производятся с инверторами напряжения, выполненными на базе IGBT-транзисторов, и, как правило, содержат встроенный ПИД-регулятор (PID Controller) для автоматического управления.

Преобразователи на напряжения от 3,0 (3,3) до 10 (10,5) кВ комплектуются инверторами тока, в которых используются запираемые тиристоры как силовые элементы.

На рисунке 1.12 приведена типовая схема низковольтного частотно-регулируемого электропривода с асинхронным двигателем. В основе его лежит автономный инвертор напряжения, построенный на IGBT-модулях, объединяющих в себе силовые ключи и управляющие драйверы. Конструктивно такие модули содержат встроенные защитные элементы, а также интерфейс для связи с микроконтроллерной системой управления.

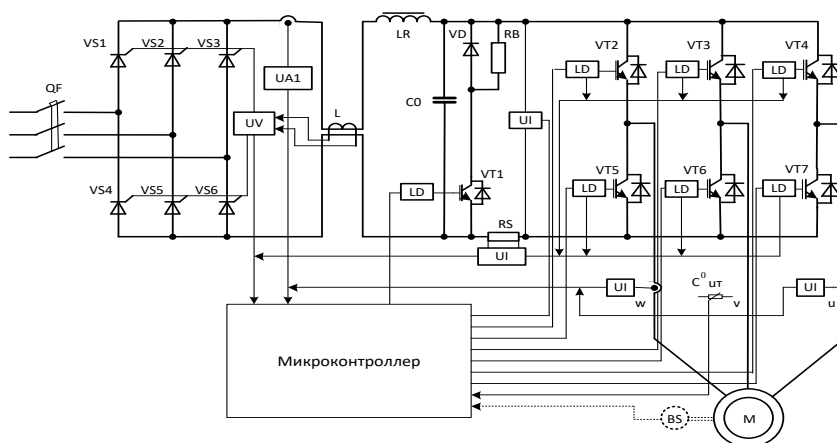


Рисунок 1.12 - Типовая схема низковольтного асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором напряжения

Частотные преобразователи предназначены для регулирования скорости вращения валов асинхронных и синхронных электродвигателей, рассчитанных на номинальные напряжения 6 и 10 кВ. Диапазон регулирования частоты на

статоре составляет от 0,2 до 70 Гц, а регулировка напряжения — от 0 до 6000 В или до 10000 В, в зависимости от модели.

В высоковольтных частотных преобразователях с инвертором тока применяется метод бездатчикового векторного управления. Суть метода заключается в том, что ток в статорной обмотке разлагается на составляющие, отдельно отвечающие за момент и поток. Это позволяет оперативно изменять крутящий момент электродвигателя без изменения магнитного потока. Такой способ применяется без использования датчиков обратной связи по скорости, если двигатель работает длительно при частоте выше 6 Гц и не требует значительного пускового момента (менее 100% от номинального).

При необходимости работы двигателя на низких скоростях (0,2–6 Гц) и обеспечения высокого пускового момента (до 150% от номинального), применяется полное векторное управление с тахометрической обратной связью. Это решение позволяет добиться устойчивой и надёжной работы в тяжёлых условиях.

Анализ современного ассортимента частотных преобразователей показывает, что они полностью покрывают потребности в управлении приводами, применяемыми в конвейерных установках. При подборе подходящего частотного преобразователя необходимо учитывать следующие технические условия:

- напряжение электропитания двигателя должно совпадать с номинальным напряжением частотного преобразователя;
- номинальная мощность и ток преобразователя должны соответствовать аналогичным параметрам двигателя;
- одновременное подключение нескольких двигателей допускается только к преобразователям с инверторами напряжения, при условии, что суммарная мощность всех двигателей не превышает предельную мощность самого преобразователя;
- преобразователи частоты, выполненные на базе инвертора тока, предназначены исключительно для индивидуального управления — к ним может быть подключён только один электродвигатель. Если система привода включает несколько двигателей, необходимо использовать отдельный преобразователь для каждого;
- в условиях шахт, где возможны взрывоопасные концентрации газа или пыли, следует применять взрывозащищённые преобразователи частоты. Современные производители (как отечественные, так и зарубежные) выпускают такие устройства на напряжения 660 В и 1140 В с мощностью до 500 кВт, специально адаптированные для шахтных условий и оснащённые инверторами напряжения;
- для конвейеров, работающих в режиме спуска груза, важной функцией является динамическое торможение, которая может быть встроена в конструкцию преобразователя.

2 Выбор и расчет основных силовых элементов электропривода конвейера

2.1 Исходные данные для проектирования и кинематическая схема конвейера

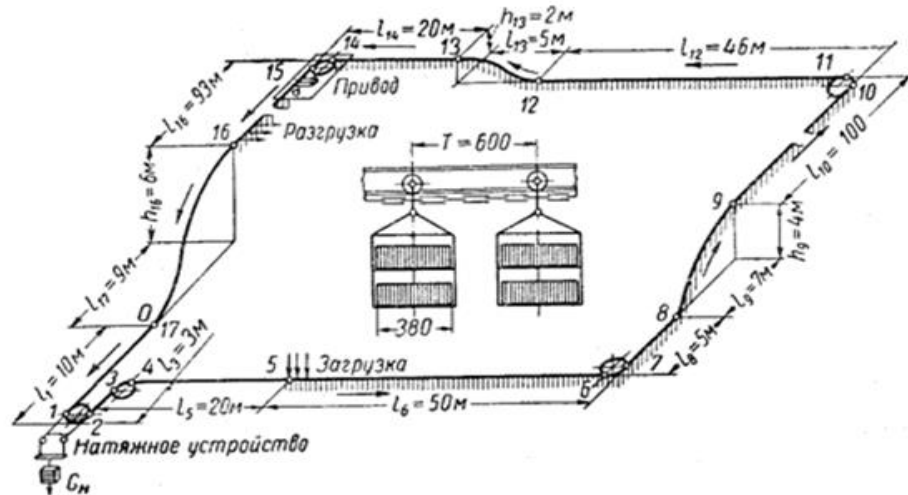


Рисунок 2.1 – Схема трассы конвейера

Плановая (сменная) производительность конвейера $Z_{см}=12000$ шт.;

Продолжительность смены $T_{см}=8$ час;

Эксплуатационная продолжительность $Z_э = Z_{см} / T_{см} = 12000 / 8 = 1500$ шт/ч;

Наибольший угол наклона пути конвейера на вертикальном перегибе $\beta_{min}=30$;

Диаметр поворотных звездочек $D=831.7$ мм;

Число грузов на подвеске $m=2$;

Масса подвески - $G_{п}= 7$ кГ;

Масса груза (поковки) $G= 10$ кГ;

Размеры груза $380 \times 200 \times 120$ мм;

Шаг подвесок $T=0.6$ м;

Шаг кареток $t_k=T=0.6$ м;

Вес каретки $G_{п}= 8$ кГ;

Загрузка подвесок – ручная;

Разгрузка подвесок – ручная;

Режим работы конвейера – средний;

Условия работы – средние.

Определяем эксплуатационную производительность:

$$Z_э = \frac{Z_{см}}{T_{см}} = \frac{12000}{8} = 1500 \text{ шт/час.} \quad (2.1)$$

Расчетная производительность по формуле при $K_n = 1.25$; $K_b = 0.9$:

$$Z = \frac{Z_{\text{э}} \cdot K_n}{K_{\text{б}}} = \frac{1500 \cdot 1.25}{0.9} = 2084 \text{ шт/час.} \quad (2.2)$$

Наибольший угол наклона пути конвейера на вертикальном перегибе $\beta_{\min} = 30^\circ$

отсюда минимально допускаемый шаг подвесок по формуле:

$$T_{\min} = \frac{1}{\cos \beta} (b + 0.1) = \frac{1}{0.866} (0.38 + 0.1) = 0.554 < T = 0.6 \quad (2.3)$$

Графическая проверка прохождения грузов на поворотных звездочках диаметром 831.7 мм показывает наличие достаточных зазоров между подвесками; следовательно, шаг подвесок выбран правильно. Для обеспечения заданной производительности на каждую подвеску укладываем по две поковки, т.е. $m = 2$. Тогда скорость конвейера из формулы:

$$g = \frac{ZT}{3600_m} = \frac{2084 \cdot 0.6}{3600 \cdot 2} = 0.174 \text{ м/с.} \quad (2.4)$$

Погонные нагрузки на холостой ветви по формуле:

$$q_0 = \frac{G_n}{T} + \frac{G_{\kappa}}{t_{\kappa}} + q_{\text{ц}} = \frac{7}{0.6} + \frac{8}{0.6} + 4.9 = 29.9 \approx 30 \text{ кг/м.} \quad (2.5)$$

На грузовой ветви:

$$q = q_0 + \frac{G \cdot m}{T} = 30 + \frac{10 \cdot 2}{0.6} = 63.33 \approx 63 \text{ кг/м.} \quad (2.6)$$

Предварительное определение наибольшего натяжения цепи.

По формуле приближенно определяем наибольшее натяжение цепи

$$S_{\max} = S_0 K_m + c(qL_{\Gamma} + q_0 L_X)(1 + 0.35 K_m) + (q - q_0)(H_p - H_z) \quad (2.7)$$

где, согласно схеме трассы конвейера

$$L_{\Gamma} = l_6 + l_8 + l_9 + l_{10} + l_{12} + l_{13} + l_{14} + l_{16} = 50 + 5 + 7 + 100 + 46 + 5 + 20 + 93 = 326 \text{ м} \quad (2.8)$$

$$L_X = l_{17} + l_1 + l_3 + l_5 = 9 + 10 + 3 + 20 = 42 \text{ м.} \quad (2.9)$$

$$x = 6; y_{90} = 3; y_{180} = 1; H_p = 8.5; H_z = 2.5$$

Суммарный коэффициент местных сопротивлений:

$$K_M = \varphi^x \cdot \varepsilon_{90}^y \cdot \varepsilon_{180} = 1.02^6 \cdot 1.033^3 \cdot 1.04 \approx 1.28 \quad (2.10)$$

Коэффициенты сопротивления приняты для средних условий работы:

$$C = 0.02; \varphi = 1.02; \varepsilon_{90} = 1.033; \varepsilon_{180} = 1.04$$

$$\begin{aligned} S_{\max} &= 50 \cdot 1.28 + 0.02(63 \cdot 326 + 30 \cdot 42)(1 + 0.35 \cdot 1.28) + (63 - 30)(8.5 - 2.5) = \\ &= 64 + 436 \cdot 1.448 + 198 \approx 893 \text{ кг}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Полученная величина наибольшего $S_{\max} = 893$ кг показывает, что цепь выбрана правильно.

Уточненный тяговый расчет. Привод конвейера располагаем в наивысшей точке 14 грузовой ветви конвейера. Минимальное натяжение цепи следует ожидать после спуска в точке О (17), с нее и начнем тяговый расчет по движению цепи конвейера

Принимаем $S_0 = 50$ кг

$$S_1 = S_0 + cql_1 = 50 \cdot 0.02 \cdot 30 \cdot 10 = 56 \text{ кг}. \quad (2.12)$$

$$S_2 = \varepsilon_{180} \cdot S_1 = 1.033 \cdot 56 \approx 58 \text{ кг}. \quad (2.13)$$

$$S_3 = S_2 + cql_3 = 58 \cdot 0.02 \cdot 30 \cdot 3 \approx 60 \text{ кг}. \quad (2.14)$$

$$S_4 = \varepsilon_{90} \cdot S_3 = 1.033 \cdot 60 \approx 62 \text{ кг}. \quad (2.15)$$

$$S_5 = S_4 + cql_5 = 62 + 0.02 \cdot 30 \cdot 20 \approx 74 \text{ кг}. \quad (2.16)$$

$$S_6 = S_5 + cql_6 = 74 + 0.02 \cdot 63 \cdot 50 \approx 137 \text{ кг}. \quad (2.17)$$

$$S_7 = \varepsilon_{90} \cdot S_6 = 1.033 \cdot 137 \approx 142 \text{ кг}. \quad (2.18)$$

$$S_8 = S_7 + cql_8 = 142 + 0.02 \cdot 63 \cdot 5 \approx 148 \text{ кг}. \quad (2.19)$$

$$S_9 = \varphi(\varphi S_8 + cql_9 + qh_9) = 1.02(1.02 \cdot 148 + 0.02 \cdot 63 \cdot 7 + 63 \cdot 4) = 419 \text{ кг}. \quad (2.20)$$

$$S_{10} = S_9 + cql_{10} = 419 + 0.02 \cdot 63 \cdot 100 \approx 545 \text{ кг}. \quad (2.21)$$

$$S_{11} = \varepsilon_{90} \cdot S_{10} = 1.033 \cdot 545 \approx 563 \text{ кг}. \quad (2.22)$$

$$S_{12} = S_{11} + cql_{12} = 563 + 0.02 \cdot 63 \cdot 46 \approx 621 \text{ кг}. \quad (2.23)$$

$$S_{13} = \varphi(\varphi S_{12} + cql_{13} + qh_{13}) = 1.02(1.02 \cdot 621 + 0.02 \cdot 63 \cdot 5 + 63 \cdot 2) = 766 \text{ кг}. \quad (2.24)$$

$$S_{14} = S_{13} + cql_{14} = 766 + 0.02 \cdot 63 \cdot 20 \approx 791 \text{ кг}. \quad (2.25)$$

Наибольшее натяжение получилось в точке 14 ($S_{14} = 791$), при $S_{\max} = 893$ кг.

Для определения натяжения в точках 16 и 15 необходимо вести расчет против хода конвейера в обратном порядке, начиная с точки О(17): $S_{17} = S_0 = 50$ кг

$$S_{16} = \frac{1}{\varphi} \left(\frac{1}{\varphi} S_{17} - cql_{17} + q_0 h_{16} \right) = \frac{1}{1.02} \left(\frac{1}{1.02} \cdot 50 - 0.02 \cdot 30 \cdot 9 + 30 \cdot 6 \right) = 172 \text{ кг.} \quad (2.26)$$

$$S_{15} = S_{16} - cql_{16} = 172 - 0.02 \cdot 63 \cdot 93 \approx 55 \text{ кг.} \quad (2.27)$$

Тяговое усилие на приводной звездочке по формуле:

$$P = (S_{14} - S_{15}) \varepsilon_{90} = (791 - 55) \cdot 1.033 \approx 760 \text{ кг.} \quad (2.28)$$

Потребная мощность электродвигателя по формуле при к.п.д. $\eta = 0.75$

$$N = K \frac{P g}{102 \eta} = 1.1 \frac{760 \cdot 0.174}{102 \cdot 0.75} = 1.9 \text{ кВт.} \quad (2.29)$$

Необходимая угловая скорость двигателя, рад/сек

$$\omega_{\partial \partial} = \frac{2g_k i_p}{D} = \frac{2 \cdot 0.174 \cdot 24.8}{0.42} = 20.55 \text{ рад/сек.} \quad (2.30)$$

2.2 Выбор электродвигателя для привода конвейера и расчет его параметров и характеристик

Выбираем асинхронный двигатель мощностью 2,2 кВт серии 4А112МА8У3. Техническая характеристика приведена в таблице 2.1.

Для расчета имеем следующие данные электродвигателя:

- номинальная выходная мощность $P_{2H} = 2,2$ кВт;
- номинальное фазное напряжение обмотки статора $U_{1H} = 220$ В;
- номинальная частота тока $f_1 = 50$ Гц;
- номинальный коэффициент полезного действия $\eta_H = 76,5$ %;
- номинальный коэффициент мощности статорной обмотки $\cos \varphi_H = 0,71$;
- критическое скольжение ротора $S_k = 29$ %;
- номинальное скольжение ротора $S_H = 3,4$ %;
- число пар полюсов: $p = 4$;
- число фаз: $m = 3$;
- скорость холостого хода: $n_0 = 750$ об/мин;
- момент инерции на валу машины: $J = 0,017$ кг·м².
- отношение пускового момента к номинальному моменту, $m_H = 1,9$;
- отношение пускового тока к номинальному току, $k_{i.H} = 5,0$

-отношение максимального (критического) момента к номинальному моменту, $m_k=2,2$;

- отношение минимального момента к номинальному моменту, $m_m=1,5$;

Таблица 2.1 - Номинальные данные асинхронного двигателя 4A112MA8Y3

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная синхронная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Нм	Отношение пускового момента к номинальному моменту, m_p	Отношение пускового тока к номинальному току, $k_{i.p}$	Отношение максимального момента к номинальному моменту, m_k	Отношение максимального момента к номинальному моменту, m_m	Динамический момент инерции ротора, kgm^2 , $J_{дв}$
4A112MA8Y3	2,2	750	76,5	0,71	6,1	29	1,9	5	2,2	1,5	0,017

Синхронная угловая скорость вращения:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 750}{30} = 78.5 \text{ рад/с.} \quad (2.31)$$

Номинальная угловая скорость вращения:

$$\omega_n = (1 - s_H) \cdot \omega_0 = (1 - 0.034) \cdot 78.5 = 75.83 \text{ рад/с.} \quad (2.32)$$

Номинальный момент электродвигателя:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{2.2 \cdot 10^3}{75.83} = 29 \text{ Н·м.} \quad (2.33)$$

Номинальное фазное напряжение:

$$U_{\text{фн}} = \frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.} \quad (2.34)$$

Номинальный фазный ток статора:

$$I_{1\text{фн}} = \frac{P_{2\text{н}} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}} = \frac{2.2 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.765 \cdot 0.71} = 6.1 \text{ А.} \quad (2.35)$$

Максимальный пусковой ток:

$$I_{\text{пуск}} = k_{\text{л.у.у.ск}} \cdot I_{1\text{фн}} = 5 \cdot 6.1 = 30.5 \text{ А.} \quad (2.36)$$

Критический (максимальный) момент электродвигателя:

$$M_k = m_k \cdot M_{\text{н}} = 2.2 \cdot 29 = 63.8 \text{ Н·м.} \quad (2.37)$$

Пусковой момент электродвигателя:

$$M_{\text{пуск}} = m_{\text{н}} \cdot M_{\text{н}} = 1.9 \cdot 29 = 55.1 \text{ Н·м.} \quad (2.38)$$

Минимальный момент электродвигателя:

$$M_{\text{мин}} = m_{\text{м}} \cdot M_{\text{н}} = 1.5 \cdot 29 = 43.5 \text{ Н·м.} \quad (2.39)$$

2.3 Расчет параметров Т-образной схемы замещения электродвигателя

В справочнике приведены параметры Г-образной схемы замещения (рисунок 2.2) в относительных единицах:

- в номинальном режиме:

$$R_1' = 0.093; X_1' = 0.11; R_2'' = 0.083; X_2'' = 0.17; X_{\mu} = 1.5$$

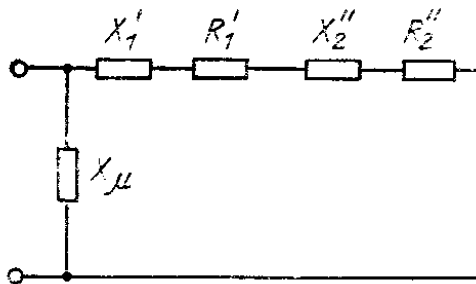


Рисунок 2.2– Г-образная схема замещения

По известным паспортным данным АД и параметрам Г-образной схемы замещения рассчитываются параметры Т-образной схемы замещения (рисунок 2.3).

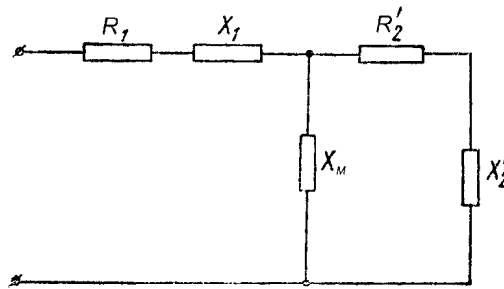


Рисунок 2.3 – Т-образная схема замещения

Базисное значение сопротивления:

$$Z_{\text{баз}} = \frac{U_{1н}}{I_{1н}} = \frac{220}{6.1} = 36 \text{ Ом.} \quad (2.40)$$

Реактивное сопротивление рассеяния статора в относительных единицах:

$$X_{1*} = \frac{2 \cdot X_1' \cdot X_m}{X_m + \sqrt{X_m^2 + 4 \cdot X_1' \cdot X_m}} = \frac{2 \cdot 0,11 \cdot 1,5}{1,5 + \sqrt{1,5^2 + 4 \cdot 0,11 \cdot 1,5}} = 0,103. \quad (2.41)$$

Коэффициент, связывающий параметры машины в Т и Г-образной схемах замещения:

$$c_1 = \frac{X_1'}{X_1} = \frac{0,11}{0,103} = 1,07. \quad (2.43)$$

Реактивное сопротивление рассеяния фазы статора:

$$X_1 = \frac{X_1' \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1} = \frac{0,11 \cdot 36}{1,07} = 3,7 \text{ Ом.} \quad (2.44)$$

Активное сопротивление фазы статора:

$$R_1 = R_s = \frac{R_1' \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1} = \frac{0,093 \cdot 36}{1,07} = 3,35 \text{ Ом.} \quad (2.45)$$

Индуктивность рассеяния фазы статора:

$$L_{1s} = \frac{X_1}{\omega_1} = \frac{3.7}{314} = 0.0118 \text{ Гн.} \quad (2.46)$$

Реактивное сопротивление рассеяния фазы ротора:

$$X'_2 = \frac{X''_2 \cdot Z_{\sigma\sigma z}}{c_1} = \frac{0.17 \cdot 36}{1.07} = 5.72 \text{ Ом.} \quad (2.47)$$

Активное сопротивление фазы ротора:

$$R'_2 = R'_R = \frac{R''_{2*} \cdot Z_{\sigma\sigma z}}{c_1} = \frac{0.083 \cdot 36}{1.07} = 2.79 \text{ Ом.} \quad (2.48)$$

Индуктивность рассеяния фазы ротора:

$$L_{2s} = \frac{X'_2}{\omega_1} = \frac{5.72}{314} = 0.018 \text{ Гн.} \quad (2.49)$$

Реактивное сопротивление взаимоиндукции:

$$X_{m*} = X_m \cdot Z_{\sigma\sigma z} = 1.5 \cdot 36 = 54 \text{ Ом.} \quad (2.50)$$

Индуктивность взаимоиндукции

$$L_m = \frac{X_{m*}}{\omega_1} = \frac{54}{314} = 0.172 \text{ Гн.} \quad (2.51)$$

Полная индуктивность фазы статора:

$$L_s = L_m + L_{1s} = 0.172 + 0.0118 = 0.1838 \text{ Гн.} \quad (2.52)$$

Полная индуктивность фазы ротора:

$$L_R = L_m + L_{2s} = 0.172 + 0.018 = 0.19 \text{ Гн.} \quad (2.53)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_k = X_1 + X'_2 = 3.7 + 5.72 = 9.42 \text{ Ом.}$$

2.4 Расчет естественных механической и электромеханической характеристик электродвигателя

К основным характеристикам асинхронных двигателей относятся зависимости $M(s)$, $I_2'(s)$, $I_1(s)$, т.е. зависимости момента, тока ротора и тока статора от скольжения

Под механической характеристикой асинхронных двигателей понимают зависимость частоты вращения n ротора от электромагнитного момента M , т.е. $n = f(M)$.

Эту характеристику удобно рассчитать по зависимости момента от скольжения ($M=f(s)$). Реальный расчет механическую характеристику производится по формуле Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot a \cdot s_k} \quad (2.54)$$

где M_K – критический момент двигателя;

s_k – критическое скольжение;

s – текущее значение скольжения;

$a = R_1 / R_2'$ – коэффициент, $a = 1.2$.

Значение критического скольжения определяется по следующей формуле:

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{2.79}{\sqrt{3.35^2 + (3.7 + 5.72)^2}} = 0.28. \quad (2.55)$$

Расчет зависимости момента от скольжения производится по следующим формулам:

$$M_{\text{д}} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot a \cdot s_k} = \frac{2 \cdot 69.28 \cdot (1 + 1.2 \cdot 0.28)}{\frac{s}{0.28} + \frac{0.28}{s} + 2 \cdot 1.2 \cdot 0.28} = \frac{185.1}{\frac{s}{0.28} + \frac{0.28}{s} + 0.672} \quad (2.56)$$

Критический момент определяется по формуле:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]} \quad (2.57)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 78.5 [3.35 + \sqrt{3.35^2 + (3.7 + 5.72)^2}]} = 69.28 \text{ Нм.}$$

При $f=50$ Гц, изменяя s в пределах диапазона $0...1$, определяем значения моментов, результаты расчета сведем в таблицу 2.2

$$1) s=0, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 78.5 - 78.5 \cdot 0 = 78.5 \text{ рад/с.}$$

$$2) s=0.01, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 78.5 - 78.5 \cdot 0.01 = 77.71 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185.1}{\frac{0.01}{0.28} + \frac{0.28}{0.01} + 0.672} = 6.45 \text{ Нм.}$$

$$3) s=0.034, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 78.5 - 78.5 \cdot 0.034 = 75.83 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185.1}{\frac{0.034}{0.28} + \frac{0.28}{0.034} + 0.672} = 20.51 \text{ Нм.}$$

$$4) s=0.1, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 78.5 - 78.5 \cdot 0.1 = 70.65 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185.1}{\frac{0.1}{0.28} + \frac{0.28}{0.1} + 0.672} = 48.34 \text{ Нм.}$$

$$5) s=0.29, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 78.5 - 78.5 \cdot 0.29 = 55.73 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185.1}{\frac{0.29}{0.28} + \frac{0.28}{0.29} + 0.672} = 69.34 \text{ Нм.}$$

$$6) s=0.4, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 78.5 - 78.5 \cdot 0.4 = 47.1 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185.1}{\frac{0.4}{0.28} + \frac{0.28}{0.4} + 0.672} = 66.12 \text{ Нм.}$$

$$7) s=0.7, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 78.5 - 78.5 \cdot 0.7 = 23.55 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185.1}{\frac{0.7}{0.28} + \frac{0.28}{0.7} + 0.672} = 51.86 \text{ Нм.}$$

$$8) s=0.85, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 78.5 - 78.5 \cdot 0.85 = 11.775 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185.1}{\frac{0.85}{0.28} + \frac{0.28}{0.85} + 0.672} = 45.83 \text{ Нм}$$

$$9) s=1, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 78.5 - 78.5 \cdot 1 = 0 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{185.1}{\frac{1}{0.28} + \frac{0.28}{1} + 0.672} = 40.96 \text{ Нм.}$$

Таблица 2.2 - Результаты расчета

S	0	0,01	S _н =0,034	0,1	S _к =0,29	0,4	0,7	0,85	1
ω	78,5	77,71	75,83	70,65	55,73	47,1	23,55	11,775	0
M	0	6,45	20,51	48,34	69,34	66,12	51,86	45,83	40,96

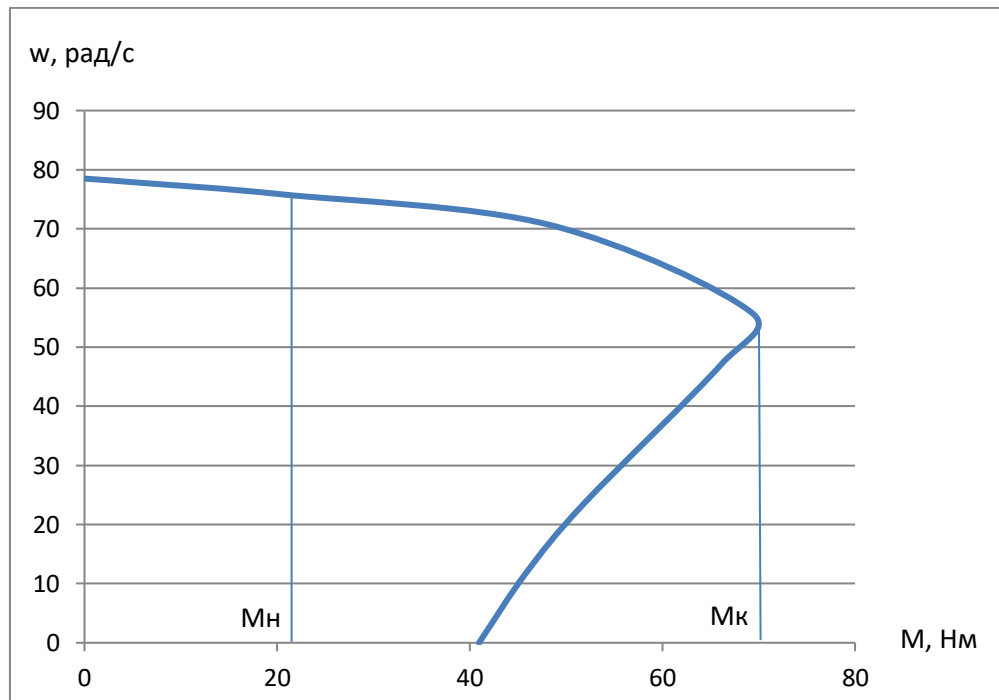


Рисунок 2.4 – Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя

Электромеханическими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости токов статора и ротора от скольжения, т.е. ($I_1(s)$ и $I_2'(s)$), которые определяются по следующим формулам:

$$I_2' = \frac{U_{\phi H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + X_K^2}}. \quad (2.58)$$

где $U_{\phi H}$ – номинальное фазное напряжение обмотки статора, В;
 X_K – индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом.

$$I_{2'} = \frac{U_{\phi H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + X_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{S}\right)^2 + (9.42)^2}}. \quad (2.59)$$

Изменяя значение скольжения s в диапазоне $0 \dots 1$, находим значения $I_{2'}$.
Результаты расчета запишем в таблицу 2.3

1) $s=0, I_{2'} = 0.$

2) $s=0.01.$

$$I_{2'} = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.01}\right)^2 + (9.42)^2}} = 0.79.$$

3) $s=0.034$

$$I_{2'} = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.034}\right)^2 + (9.42)^2}} = 2.56.$$

4) $s=0.1$

$$I_{2'} = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.1}\right)^2 + (9.42)^2}} = 6.74.$$

5) $s=0.29$

$$I_{2'} = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.29}\right)^2 + (9.42)^2}} = 13.72.$$

6) $s=0.4$

$$I_{2'} = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.4}\right)^2 + (9.42)^2}} = 15.74.$$

7) $s=0.7$

$$I_{2'} = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.7}\right)^2 + (9.42)^2}} = 18.43.$$

8) $s=0.85$

$$I_{2'} = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.85}\right)^2 + (9.42)^2}} = 19.1.$$

9) $s=1$

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{1}\right)^2 + (9.42)^2}} = 19.57.$$

Таблица 2.3 – Результаты расчета

S	0	0,01	S _н =0,034	0,1	S _к =0,29	0,4	0,7	0,85	1
ω	78,5	77,71	75,83	70,65	55,73	47,1	23,55	11,775	0
I ₂ '	0	0.79	2.56	6.74	13.72	15.74	18.43	19.1	19.57

Ток I₁ является векторной суммой роторного тока I₂' и тока намагничивания I_μ. Модуль тока статора определяется по следующей формуле:

$$I_1(S) = \sqrt{(I_2')^2 + I_\mu^2 + 2I_\mu I_2' \sin \psi_2}. \quad (2.60)$$

где $\sin \psi_2$ – сдвиг тока статора по фазе:

$$\sin \psi_2 = \frac{x_1 + x_2'}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + X_K^2}} = \frac{9.42}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{S}\right)^2 + 9.42^2}}. \quad (2.61)$$

Ток намагничивания I_μ определяется по формуле:

$$I_\mu = \frac{U_H}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{3.35^2 + (3.7 + 54)^2}} = 3.81 \text{ A}. \quad (2.62)$$

При различных значениях скольжения s находим ток ротора I₂'(s) по формуле (2.58), значения $\sin \psi_2$ – по формуле (2.61), а ток статора I₁(s) – по формуле (2.60).

Результаты расчета приведены в таблице 2.4

1) s=0, $\sin \psi_2 = 0$, I₁ = 0

2) s=0.01

$$\sin \psi_2 = \frac{9.42}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.01}\right)^2 + 9.42^2}} = 0.033.$$

$$I_1(S) = \sqrt{(0.79)^2 + 3.81^2 + 2 \cdot 3.81 \cdot 0.79 \cdot 0.033} = 0.152.$$

3) s=0.034

$$\sin \psi_2 = \frac{9.42}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.034}\right)^2 + 9.42^2}} = 0.110.$$

$$I_1(S) = \sqrt{(2.56)^2 + 3.81^2 + 2 \cdot 3.81 \cdot 2.56 \cdot 0.110} = 0.7.$$

4) s=0.1

$$\sin \psi_2 = \frac{9.42}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.1}\right)^2 + 9.42^2}} = 0.289.$$

$$I_1(S) = \sqrt{(6.74)^2 + 3.81^2 + 2 \cdot 3.81 \cdot 6.74 \cdot 0.289} = 3.05.$$

5) s=0.29

$$\sin \psi_2 = \frac{9.42}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.29}\right)^2 + 9.42^2}} = 0.588.$$

$$I_1(S) = \sqrt{(13.72)^2 + 3.81^2 + 2 \cdot 3.81 \cdot 13.72 \cdot 0.588} = 10.31.$$

6) s=0.4

$$\sin \psi_2 = \frac{9.42}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.4}\right)^2 + 9.42^2}} = 0.674.$$

$$I_1(S) = \sqrt{(15.74)^2 + 3.81^2 + 2 \cdot 3.81 \cdot 15.74 \cdot 0.674} = 13.18.$$

7) s=0.7

$$\sin \psi_2 = \frac{9.42}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.7}\right)^2 + 9.42^2}} = 0.790.$$

$$I_1(S) = \sqrt{(18.43)^2 + 3.81^2 + 2 \cdot 3.81 \cdot 18.43 \cdot 0.790} = 17.57.$$

8) s=0.85

$$\sin \psi_2 = \frac{9.42}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.85}\right)^2 + 9.42^2}} = 0.818.$$

$$I_1(S) = \sqrt{(19.1)^2 + 3.81^2 + 2 \cdot 3.81 \cdot 19.1 \cdot 0.818} = 18.74.$$

9) s=1

$$\sin \psi_2 = \frac{9.42}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{1}\right)^2 + 9.42^2}} = 0.838.$$

$$I_1(S) = \sqrt{(19.57)^2 + 3.81^2 + 2 \cdot 3.81 \cdot 19.57 \cdot 0.838} = 19.59.$$

Таблица 2.4 - Результаты расчета зависимости $I_1(s)$

S	0	0,01	$S_H=0,034$	0,1	$S_K=0,29$	0,4	0,7	0,85	1
ω	78,5	77,71	75,83	70,65	55,73	47,1	23,55	11,775	0
$I_2'(s)$	0	0.79	2.56	6.74	13.72	15.74	18.43	19.1	19.57
$I_1(s)$	0	0.152	0.7	3.05	10.31	13.18	17.57	18.74	19.59
$\sin\psi_2$	0	0.033	0.110	0.289	0.588	0.674	0.790	0.818	0.838

На рисунке 2.5 приведены естественные электромеханические характеристики, т.е. графики зависимостей $I_1(\omega)$ и $I_2'(\omega)$.

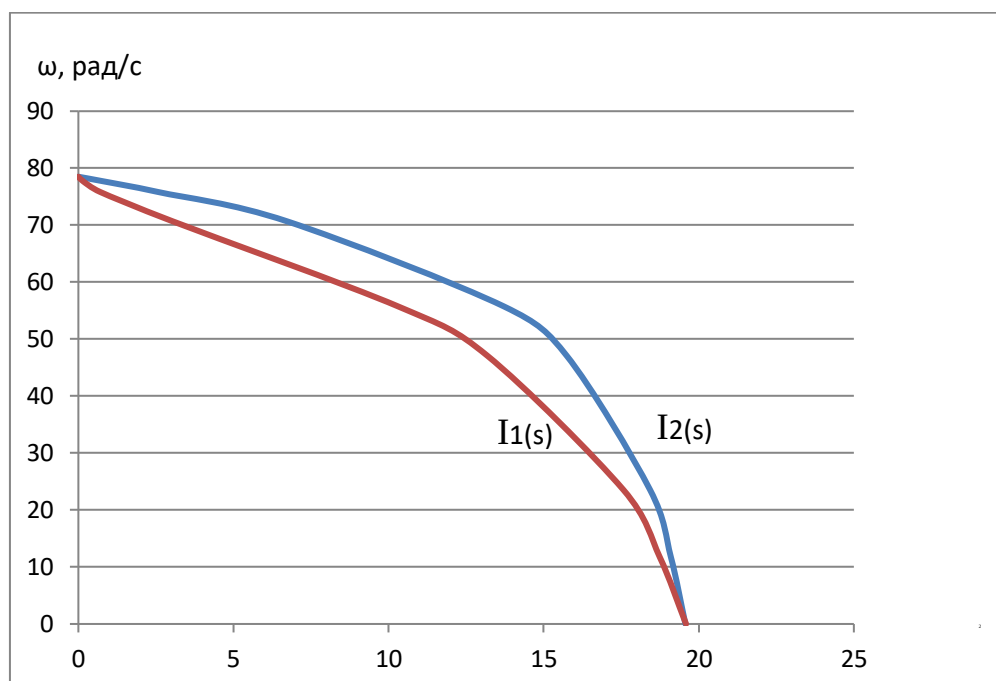


Рисунок 2.5 – Графики зависимостей $I_2'(\omega)$ и $I_1(\omega)$ (электромеханических характеристик)

2.5 Расчет искусственных механических характеристик электродвигателя при законе $U/f = \text{const}$ частотного регулирования

Для нахождения момента воспользуемся формулой:

$$M_d = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}. \quad (2.63)$$

где M_k – максимальный (критический) момент двигателя;
 s_k – критическое скольжение;

$$a = \frac{R_1}{R_2} = \frac{3.35}{2.79} = 1.2.$$

Следует отметить обстоятельство влияния изменения напряжения сети на механические характеристики асинхронного двигателя. При заданном скольжении момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, поэтому двигатель довольно чувствителен к колебаниям напряжения.

При изменении частоты питающего напряжения изменяются синхронная частота вращения ω_0 , скольжения S и индуктивное сопротивление статора и индуктивное сопротивление рассеяния ротора:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{zp} \left(\frac{f_{1i}}{f_{1n}} \right) = \frac{2\pi}{zp} (f^*). \quad (2.64)$$

$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega}{\frac{2\pi}{zp} \left(\frac{f_{1i}}{f_{1n}} \right)} = \frac{\omega}{\frac{2\pi}{zp} (f^*)}. \quad (2.65)$$

$$X_1 + X_2' = (X_1 + X_2') \left(\frac{f_1}{f_{1n}} \right) = (X_1 + X_2') (f^*). \quad (2.66)$$

Соотношение между частотой и напряжением выражается следующей формулой:

$$\frac{U_i}{f_{1i}} = \frac{U_n}{f_n} = const \quad (2.67)$$

Из выражения (2.67) следует, что при значении частоты f_{1i} значение напряжения тоже должно меняться, оно должно быть равно:

$$U_i = U_n \frac{f_{1i}}{f_n} = U_n \left(\frac{f_{1i}}{f_n} \right) = U_n (f^*) \quad (2.68)$$

Рассчитываем искусственные механические характеристики АД при $U/f = const$ для частот $f_1 = 40$ Гц, $f_2 = 25$ Гц, $f_3 = 15$ Гц.

Для построения данных механических характеристик рассчитываем угловую скорость для всех значений скольжений:

$$\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s.$$

Пересчитываем индуктивные сопротивления статора и ротора для частоты 40 Гц:

$$X_{1(40)} = 2\pi \cdot f_{40} \cdot L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 0,0118 = 2,96 \text{ Ом.} \quad (2.69)$$

$$X'_{2(40)} = \frac{X'_2}{1,25} = 4,576 \text{ Ом.} \quad (2.70)$$

Индуктивные сопротивления при частоте 25 Гц:

$$X_{1(25)} = 2\pi \cdot f_{25} \cdot L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 0,0118 = 1,85 \text{ Ом.} \quad (2.71)$$

$$X'_{2(25)} = \frac{X'_2}{2} = 2,86 \text{ Ом.} \quad (2.72)$$

Индуктивные сопротивления при частоте 15 Гц:

$$X_{1(15)} = 2\pi \cdot f_{15} \cdot L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 0,0118 = 1,11 \text{ Ом.} \quad (2.73)$$

$$X'_{2(15)} = \frac{X'_2}{3,33} = 1,72 \text{ Ом.} \quad (2.74)$$

Рассчитываем значение критического скольжения при частоте 40 Гц:

$$s_{k40} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1(40)} + X'_{2(40)})^2}} = \frac{2,79}{\sqrt{3,35^2 + (2,96 + 4,576)^2}} = 0,338 \quad (2.75)$$

$$as_{k40} = \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_{k40} = 0,406 \quad (2.76)$$

$$\omega_{0(40)} = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{6,28 \cdot 40}{4} = 62,8 \text{ рад/с} \quad (2.77)$$

Рассчитываем значение критического скольжения при частоте 25 Гц:

$$s_{k25} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1(25)} + X'_{2(25)})^2}} = \pm \frac{2,79}{\sqrt{3,35^2 + (1,85 + 2,86)^2}} = 0,483 \quad (2.78)$$

$$as_{k25} = \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_{k25} = 0,579 \quad (2.79)$$

$$\omega_{0(25)} = \frac{2\pi f_2}{p} = \frac{6,28 \cdot 25}{4} = 39,25 \text{ рад/с} \quad (2.80)$$

Рассчитываем значение критического скольжения при частоте 15 Гц:

$$s_{k15} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1(15)} + X_{2(15)}')^2}} = \pm \frac{2,79}{\sqrt{3,35^2 + (1,11 + 1,72)^2}} = 0,728 \quad (2.81)$$

$$as_{k15} = \frac{R_1}{R_2'} \cdot s_{k15} = 0,873 \quad (2.82)$$

$$\omega_{0(15)} = \frac{2\pi f_3}{p} = \frac{6,28 \cdot 15}{4} = 23,55 \text{ рад/с} \quad (2.83)$$

Так как задан закон частотного регулирования ($U/f=\text{const}$), то мы получаем $220/50=4,4$, откуда следует что при частоте $f_1=40$ Гц значение $U_{\phi 1}=176$ В, при частоте $f_2=25$ Гц значение $U_{\phi 2}=110$ В, при частоте $f_3=15$ Гц значение $U_{\phi 3}=66$ В.

Рассчитываем значение критического момента для частоты 40 Гц:

$$M_{k40} = \frac{3U_{\phi 1}^2}{2\omega_{40} \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{1(40)} + X_{2(40)}')^2} \right]} = \frac{3 \cdot 176^2}{2 \cdot 62,8 \cdot \left[3,35 + \sqrt{3,35^2 + (2,96 + 4,576)^2} \right]} = 63,8$$

Критический момент для частоты 25 Гц:

$$M_{k25} = \frac{3U_{\phi 2}^2}{2\omega_{25} \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{1(25)} + X_{2(25)}')^2} \right]} = \frac{3 \cdot 110^2}{2 \cdot 39,25 \cdot \left[3,35 + \sqrt{3,35^2 + (1,85 + 2,86)^2} \right]} = 50,65$$

Критический момент для частоты 15 Гц:

$$M_{k15} = \frac{3U_{\phi 3}^2}{2\omega_{15} \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{1(20)} + X_{2(20)}')^2} \right]} = \frac{3 \cdot 66^2}{2 \cdot 23,55 \cdot \left[3,35 + \sqrt{3,35^2 + (1,11 + 1,72)^2} \right]} = 35,87$$

Найдем значения моментов асинхронного двигателя при частоте 40Гц.

$$M_{д40} = \frac{2M_{k40}(1 + as_{k40})}{\frac{s}{s_{k40}} + \frac{s_{k40}}{s} + 2as_{k40}} = \frac{179,35}{\frac{s}{0,338} + \frac{0,338}{s} + 0,812}$$

$$1) s=0, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 62,8 - 62,8 \cdot 0 = 62,8 \text{ рад/с}, M=0.$$

$$2) s=0,01, \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 62,8 - 62,8 \cdot 0,01 = 62,172 \text{ рад/с}.$$

$$M_{\text{д}} = \frac{179,35}{\frac{0,01}{0,338} + \frac{0,338}{0,01} + 0,812} = 5.16 \text{ Нм.}$$

$$3) s=0.034, \quad \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 62.8 - 62.8 \cdot 0.034 = 60.66 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{179,35}{\frac{0,034}{0,338} + \frac{0,338}{0,034} + 0,812} = 16.5 \text{ Нм.}$$

$$4) s=0.1, \quad \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 62.8 - 62.8 \cdot 0.1 = 56.52 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{179,35}{\frac{0,1}{0,338} + \frac{0,338}{0,1} + 0,812} = 39.77 \text{ Нм.}$$

$$5) s=0,338, \quad \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 62.8 - 62.8 \cdot 0.338 = 41.57 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{179,35}{\frac{0,338}{0,338} + \frac{0,338}{0,338} + 0,812} = 63.63 \text{ Нм.}$$

$$6) s=0,4, \quad \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 62.8 - 62.8 \cdot 0.4 = 37.68 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{179,35}{\frac{0,4}{0,338} + \frac{0,338}{0,4} + 0,812} = 62.99 \text{ Нм.}$$

$$7) s=0,7, \quad \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 62.8 - 62.8 \cdot 0.7 = 18.84 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{179,35}{\frac{0,7}{0,338} + \frac{0,338}{0,7} + 0,812} = 53.04 \text{ Нм.}$$

$$8) s=0,85, \quad \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 62.8 - 62.8 \cdot 0.85 = 9.42 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{179,35}{\frac{0,85}{0,338} + \frac{0,338}{0,85} + 0,812} = 48.04 \text{ Нм.}$$

$$9) s=1, \quad \omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 62.8 - 62.8 \cdot 1 = 0 \text{ рад/с.}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{179,35}{\frac{1}{0,338} + \frac{0,338}{1} + 0,812} = 43.53 \text{ Нм.}$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.5

Таблица 2.5 – Результаты расчета

S	0	0,01	0,034	0,1	0,338	0,4	0,7	0,85	1
ω	62,8	62,172	60,66	56,52	41,57	37,68	18,84	9,42	0
M	0	5,16	16,5	39,77	63,63	62,99	53,04	48,04	43,53

Найдем значения моментов асинхронного двигателя при частоте 25 Гц.

$$M_{Д25} = \frac{2M_{k25}(1 + as_{k25})}{\frac{s}{s_{k25}} + \frac{s_{k25}}{s} + 2as_{k25}} = \frac{160}{\frac{s}{0,483} + \frac{0,483}{s} + 1,159}$$

1) $s=0$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 39.25 - 39.25 \cdot 0 = 39.25$ рад/с, $M=0$.

2) $s=0.01$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 39.25 - 39.25 \cdot 0.01 = 38.86$ рад/с.

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0.01}{0,483} + \frac{0,483}{0.01} + 1,159} = 3.23 \text{ Нм.}$$

3) $s=0.034$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 39.25 - 39.25 \cdot 0.34 = 37.92$ рад/с.

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0.034}{0,483} + \frac{0,483}{0.034} + 1,159} = 10.37 \text{ Нм.}$$

4) $s=0.1$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 39.25 - 39.25 \cdot 0.1 = 35.33$ рад/с.

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0.1}{0,483} + \frac{0,483}{0.1} + 1,159} = 25.82 \text{ Нм.}$$

5) $s=0.29$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 39.25 - 39.25 \cdot 0.29 = 27.87$ рад/с.

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0.29}{0,483} + \frac{0,483}{0.29} + 1,159} = 46.78 \text{ Нм.}$$

6) $s=0.483$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 39.25 - 39.25 \cdot 0.483 = 20.29$ рад/с.

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0.483}{0,483} + \frac{0,483}{0.483} + 1,159} = 50.65 \text{ Нм.}$$

7) $s=0.7$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 39.25 - 39.25 \cdot 0.7 = 11.78$ рад/с.

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0.7}{0,483} + \frac{0,483}{0.7} + 1,159} = 48.48 \text{ Нм.}$$

8) $s=0.85$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 39.25 - 39.25 \cdot 0.85 = 5.89$ рад/с.

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{0.85}{0,483} + \frac{0,483}{0.85} + 1,159} = 45.85 \text{ Нм.}$$

9) $s=1$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 39.25 - 39.25 \cdot 1 = 0$ рад/с.

$$M_{Д25} = \frac{160}{\frac{1}{0,483} + \frac{0,483}{1} + 1,159} = 43.13 \text{ Нм.}$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.6

Таблица 2.6 – Результаты расчета

S	0	0,01	0,034	0,1	0,29	0,483	0,7	0,85	1
ω	39,25	38,86	37,92	35,33	27,87	20,29	11,78	5,89	0
M	0	3,23	10,37	25,82	46,78	50,65	48,48	45,85	43,13

Найдем значения моментов асинхронного двигателя при частоте 15 Гц.

$$M_{д15} = \frac{2M_{k15}(1 + as_{k15})}{\frac{s}{s_{k15}} + \frac{s_{k15}}{s} + 2as_{k15}} = \frac{134,4}{\frac{s}{0,728} + \frac{0,728}{s} + 1,75}$$

1) $s=0$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 23.55 - 23.55 \cdot 0 = 23.55$ рад/с, $M=0$.

2) $s=0.01$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 23.55 - 23.55 \cdot 0.01 = 23.31$ рад/с.

$$M_{д15} = \frac{134,4}{\frac{0.01}{0,728} + \frac{0,728}{0.01} + 1,75} = 1.8 \text{ Нм.}$$

3) $s=0.034$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 23.55 - 23.55 \cdot 0.034 = 22.75$ рад/с.

$$M_{д15} = \frac{134,4}{\frac{0.034}{0,728} + \frac{0,728}{0.034} + 1,75} = 5.79 \text{ Нм.}$$

4) $s=0.1$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 23.55 - 23.55 \cdot 0.1 = 21.2$ рад/с.

$$M_{д15} = \frac{134,4}{\frac{0.1}{0,728} + \frac{0,728}{0.1} + 1,75} = 14.66 \text{ Нм.}$$

5) $s=0.29$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 23.55 - 23.55 \cdot 0.29 = 16.72$ рад/с.

$$M_{д15} = \frac{134,4}{\frac{0.29}{0,728} + \frac{0,728}{0.29} + 1,75} = 28.84 \text{ Нм.}$$

6) $s=0.4$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 23.55 - 23.55 \cdot 0.4 = 14.13$ рад/с.

$$M_{д15} = \frac{134,4}{\frac{0.4}{0,728} + \frac{0,728}{0.4} + 1,75} = 32.62 \text{ Нм.}$$

7) $s=0.728$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 23.55 - 23.55 \cdot 0.728 = 6.41$ рад/с.

$$M_{д15} = \frac{134,4}{\frac{0,728}{0,728} + \frac{0,728}{0,728} + 1,75} = 35,84 \text{ Нм.}$$

8) $s=0,85$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 23,55 - 23,55 \cdot 0,85 = 3,53 \text{ рад/с.}$

$$M_{д15} = \frac{134,4}{\frac{0,85}{0,728} + \frac{0,728}{0,85} + 1,75} = 35,65 \text{ Нм.}$$

9) $s=1$, $\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s = 23,55 - 23,55 \cdot 1 = 0 \text{ рад/с.}$

$$M_{д15} = \frac{134,4}{\frac{1}{0,728} + \frac{0,728}{1} + 1,75} = 34,9 \text{ Нм.}$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.7

Таблица 2.7 – Результаты расчета

S	0	0,01	0,034	0,1	0,29	0,4	0,728	0,85	1
ω	23,55	23,31	22,75	21,2	16,72	14,13	6,41	3,53	0
M	0	1,8	5,79	14,66	28,84	32,62	35,84	35,65	34,9

По данным, приведенным в таблицах (2.5; 2.6; 2.7), построим искусственные механические характеристики (рисунок 2.6)

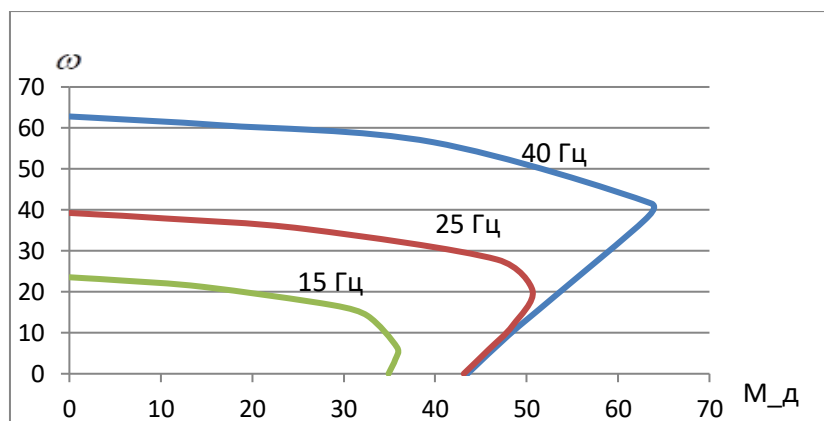


Рисунок 2.6 – Механические характеристики АД при частотном регулировании

2.6 Выбор преобразователя частоты. Общие положения

Частотное регулирование скорости электродвигателей переменного тока обосновано с позиции их математической модели. Одним из ключевых преимуществ этого способа является то, что вместе с регулировкой скорости достигается также управление потребляемой мощностью. В отличие от параметрических методов изменения скорости, данный подход позволяет существенно снизить энергетические потери.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}. \quad (2.84)$$

В контексте рассматриваемой задачи необходимость установки частотного преобразователя объясняется требованиями, предъявляемыми к работе конвейера, такими как: плавный запуск и останов, возможность широкого диапазона регулирования скорости, низкие и стабильные потери энергии, а также возможность реверсивного вращения электродвигателя.

При выборе частотного преобразователя следует ориентироваться на специфику задачи, которую должен выполнять электропривод, учитывая:

- тип и мощность подключаемого электродвигателя;
- требуемый диапазон и точность регулировки скорости;
- стабильность поддержания крутящего момента на валу.

Для стандартных асинхронных двигателей необходимо подбирать преобразователь, соответствующий их мощности. Если система требует высокого пускового момента или сокращённого времени разгона/торможения, рекомендуется использовать преобразователь на один номинал выше, чем мощность самого двигателя.

Для повышения точности управления моментом и скоростью в современных преобразователях реализована функция векторного управления. Она позволяет поддерживать полный крутящий момент даже на низких частотах, сохранять заданную скорость при колебаниях нагрузки без использования датчиков обратной связи, а также точно контролировать момент на выходном валу.

Большинство частотных преобразователей (инверторов) оснащаются встроенными ПИД-регуляторами. Эти регуляторы обеспечивают автоматическое управление параметрами системы — такими как расход, давление, температура, уровень или скорость — на основании аналоговых сигналов от датчиков в диапазоне 0–10 В или 4–20 мА. Наличие встроенного ПИД-регулятора уменьшает сложность системы управления и исключает необходимость во внешних управляющих устройствах.

Обычно мощность преобразователя подбирается, исходя из номинальной мощности двигателя, особенно если двигатель рассчитан на 1500 или 3000 об/мин. В случае нестандартных условий эксплуатации или использования электродвигателей с другими характеристиками, необходимо убедиться, что

номинальный выходной ток преобразователя не ниже номинального тока электродвигателя.

Выбор модели частотного преобразователя осуществляется по следующим параметрам:

а) по напряжению питающей сети, например: при $U_c = 220$ В и номинальном токе $I_{ном} = 6,1$ А, можно ориентироваться на модификацию ПЧВ101-K37-А.

Дополнительно, если предъявляются требования к степени защиты оборудования (например, IP54), преобразователь следует размещать внутри монтажного шкафа, а также выбирать модель с запасом по выходному току — коэффициент запаса K_1 должен быть не менее 1,3. Это необходимо для обеспечения надёжной работы преобразователя в условиях ограниченного охлаждения и затруднённого теплоотвода.

На основании этого коэффициента производится расчёт выходного тока, который затем используется для окончательного выбора подходящей модели частотного преобразователя:

$$I_{расч} = I_{ном} \times K_1 \geq 6,1 \times 1,3 \geq 7,93 \text{ А}$$

б) требованию по току $I_{расч} \geq 7,93$ А удовлетворяет модификация: ПЧВ103-2К2-А (рабочий ток до 9,5 А).

На основании полученных данных, выберем преобразователь Е2-8300S3L, с параметрами, приведенными в таблице 2.8:

Таблица 2.8 - Параметры ПЧИТ Е2-8300-S3L

Мощность преобразователя, кВА	3
Мощность электродвигателя, кВт	2,2
Выходной номинальный ток, А	10,5
Напряжение питания	Однофазное 220 В (+10 %, -15 %), 50 Гц (± 5 %)
Выходная частота, Гц	0,1-400

Допускает перегрузку по току: 150% номинального тока в течение 1 мин.

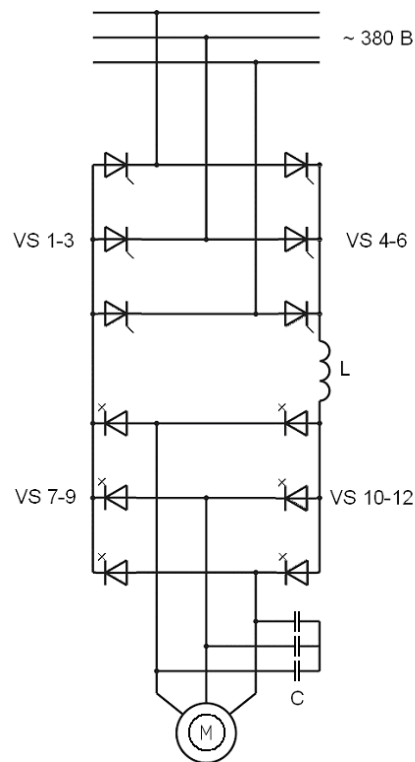


Рисунок 2.7 - Принципиальная схема преобразователя частоты

Рассматриваемый частотный преобразователь относится к двухзвенным схемам с промежуточным токовым контуром. Первая ступень преобразователя представляет собой управляемый выпрямительный блок на тиристорах, за которым следует реактор в цепи постоянного тока, выполняющий роль фильтра и сглаживающего элемента. Вторая ступень схемы — это автономный инвертор тока (АИТ), собранный на базе запираемых тириستоров типа GTO. В составе АИТ предусмотрены конденсаторы, обеспечивающие подачу реактивной мощности на нагрузку преобразователя.

К основным преимуществам частотных преобразователей с автономным инвертором тока относятся:

- возможность обратной передачи энергии в электрическую сеть (рекуперация);
- формирование выходного напряжения, близкого по форме к синусоидальному закону, что снижает гармонические искажения;
- устойчивость к коротким замыканиям на выходе, обеспечивающая надёжную работу в аварийных режимах.

2.7 Описание преобразователя частоты E2-8300-S3L

Как известно, регулировка скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя может осуществляться тремя основными способами:

- изменением частоты питающего напряжения;

- регулировкой амплитуды подводимого напряжения;
- изменением количества пар полюсов в обмотке статора.

С учётом технологических требований, в нашем случае используется первый способ — изменение частоты питания.

Оборудование, рассматриваемое в данной работе, предназначено для управления приводом лифтов и подъёмных механизмов, оснащённых двигателями переменного тока. Метод регулирования частоты позволяет как уменьшать, так и повышать скорость электродвигателя по сравнению с его номинальной.

При снижении частоты питания ниже номинального значения возможно выбрать оптимальное соотношение между частотой и амплитудой напряжения, подаваемого на обмотку статора, чтобы удерживать магнитный поток машины на постоянном уровне. Это позволяет сохранять максимальный момент на прежнем уровне во всём диапазоне регулировки, что особенно важно при постоянной нагрузке, обеспечивая стабильную перегрузочную способность двигателя.

В качестве элемента регулирования выбран частотный преобразователь, имеющий промежуточное звено постоянного тока. Его структура построена на инверторе тока. Принцип функционирования заключается в следующем:

- на первом этапе переменное напряжение из сети выпрямляется тиристорным выпрямителем;
- затем стабилизация напряжения осуществляется в промежуточной цепи, где установлены фильтры нижних частот индуктивно-емкостного типа;
- на завершающем этапе в инверторе, собранном на запираемых силовых тиристорах GTO, формируется выходной сигнал заданной частоты и напряжения.

Выходное напряжение создаётся с использованием метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ), который обеспечивает точное управление характеристиками двигателя и оптимальную энергетическую эффективность.

Выбор дополнительного оборудования. С целью повышения надёжности работы электропривода и улучшения качества управления, рекомендуется использовать дополнительное внешнее оборудование в комплексе с частотным преобразователем (ПЧВ). Схема подключения таких устройств представлена на рисунке 2.8.

На схеме отображены коммутационные элементы, устройства защиты, а также цепи электропитания ПЧВ, обеспечивающие безопасную и стабильную работу системы. Использование внешних компонентов позволяет реализовать защиту от перегрузок, коротких замыканий и других аварийных режимов.

Кроме того, подобная конфигурация способствует упрощению диагностики неисправностей, расширяет возможности по автоматизации процессов и снижает вероятность отказов оборудования в условиях интенсивной эксплуатации.

Таблица 2.9 - Функциональные характеристики преобразователя

Тип		E2-8300
Режим управления		U/f или управление вектором тока
Регулирование частоты	Диапазон	От 0,1 до 650,0 Гц
	Момент при пуске	150%/1Гц (при управлении вектором тока)
	Кратность регулирования скорости	1:50 (при управлении вектором тока)
	Точность регулирования скорости	±0,5% (при управлении вектором тока)
Несущая частота ШИМ		От 2 до 16 кГц
Характеристики U/f		18 фиксированных и 1 программируемая характеристики.
Температура среды		От -10 до +50°С
Относительная влажность		От 0 до 95% (без конденсата)
Степень защиты		IP20 по ГОСТ 14254-96
Управление разгоном / торможением		Две ступени разгона / торможения (0,1 – 3600 с) и S-кривые (см.описание константы 3-05)

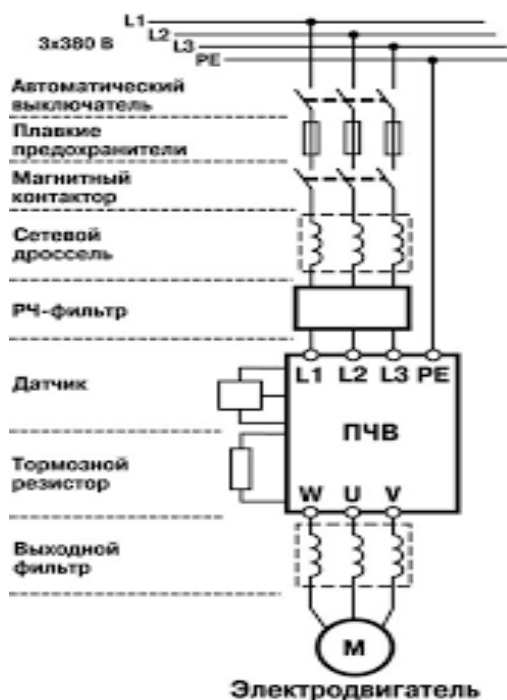


Рисунок 2.8 - Структурная схема подключения привода модификации ПЧВ103-2К2-А

Выбор магнитных контакторов. Магнитный контактор применяется для включения и отключения электропитания как в ручном, так и в дистанционном режиме, а также выполняет защитные функции в составе частотного привода (ПЧВ). Для работы с ПЧВ103-2К2-А выбран контактор ПМЛ-110, соответствующий классу защиты IP00, с номинальным током 10 А.

Выбор сетевых дросселей. Сетевые дроссели применяются для увеличения коэффициента мощности и рекомендуется их использовать в случаях, когда:

- мощность источника питания (например, трансформатора) превышает 500 кВА и более чем в шесть раз превышает мощность ПЧВ;
- длина кабеля между ПЧВ и источником питания менее 10 метров.

Инвертор частотного преобразователя создает высшие гармоники, которые искажают форму питающего напряжения и вызывают перегрев оборудования (двигателей, трансформаторов), а также могут нарушать работу чувствительной электроники. Дроссель ограничивает рост тока при грозовых перенапряжениях или коротких замыканиях, снижая нагрузку на силовые компоненты (IGBT-модули).

Преимущества установки дросселя в системе ПЧВ:

- повышение энергетической эффективности при использовании в насосах, вентиляторах и других исполнительных механизмах;
- снижение влияния гармоник на сеть;
- защита ПЧВ от перегрузок и асимметрий;
- увеличение коэффициента мощности.

Для ПЧВ103-2К2-А подходит дроссель ОВЕН РС0-025-А, рассчитанный на 25 А, с индуктивностью 0,7 мГн.

Выбор радиочастотных фильтров. Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) на входе ПЧВ рекомендуется применять РЧ-фильтры. В нашем случае выбран ЕМФ011А21А, рассчитанный на 11 А и напряжение 220 В.

Выбор выходных фильтров для улучшения качества работы электродвигателя и увеличения его ресурса на выходе ПЧВ рекомендуется установка следующих элементов:

- dU/dt-дроссели — ограничивают скорость нарастания напряжения и защищают изоляцию двигателя от перенапряжений. Рекомендуются при короткой длине кабеля, старых/перемотанных двигателях и в агрессивных средах. Выбран: ED3du-1,27/7, номинал 7 А, индуктивность 1,27 мГн.

- моторные дроссели — снижают токовые пульсации, уменьшают наводки в кабеле, позволяют использовать более длинные соединительные линии. Выбран: ОВЕН РМО-010-А, номинальный ток 10 А, индуктивность 2,1 мГн.

- синусные фильтры — представляют собой LC-фильтр, подавляющий высокочастотные гармоники. Это позволяет подавать на двигатель практически чистое синусоидальное напряжение, снизить шум, тепловые нагрузки и увеличить длину моторного кабеля до 150 м. Выбран: EF3LC-5,5/10, 10 А, индуктивность 5,5 мГн.

Расчет значения мощности и сопротивления тормозного резистора.

Тормозные резисторы используются для быстрого торможения электродвигателя, особенно при наличии значительной инерции. При замедлении двигатель переходит в генераторный режим и отдаёт энергию обратно в ПЧВ, что вызывает повышение напряжения в звене постоянного тока. Для предотвращения повреждений, избыточная энергия рассеивается в тормозном резисторе в виде тепла.

Для определения необходимых параметров тормозного резистора (мощности и сопротивления) учитываются условия торможения. Необходимо рассчитать:

- максимальный тормозной момент ($M_{B\max}$), который зависит от:
- начальной и конечной скоростей (n_1 и n_2);
- требуемого времени торможения (t_B);
- полного момента инерции системы (J_{tot}).

Полученные данные позволяют рассчитать оптимальную мощность и сопротивление резистора, соответствующее данному режиму и обеспечивающее надёжное и безопасное торможение:

$$t_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot M_{B\max}} = \frac{6,28 \cdot 750}{60 \cdot 29} = 2,71 \text{сек.} \quad (2.85)$$

$$ED = \frac{t_s}{T} = \frac{2,71}{60} = 4,52\%. \quad (2.86)$$

Рассчитаем максимальную тормозную мощность:

$$P_{B\max} = \frac{M_{B\max} \cdot (n_1 - n_2)}{9,55} = \frac{29 \cdot 700}{9,55} = 2,1 \text{кВт}. \quad (2.87)$$

Определим электрическую мощность торможения:

$$P_{el} = P_{B\max} - k \cdot P_{mol} = 2,1 - 0,2 \cdot 2,2 = 1,66 \text{ кВт}. \quad (2.88)$$

По графику, изображенному на рисунке 3.3, выбираем коэффициент $f_k=0,15$. Определяем номинальную мощность торможения.

$$P_{el\text{НОМ}} = \frac{P_{el}}{f_k} = \frac{1,66}{0,15} = 11,07 \text{ кВт} \quad (2.89)$$

Определяем максимально допустимое сопротивление тормозного резистора для заданного цикла нагрузки

$$R_{B\max} \leq \frac{U_B^2}{P_{el}} = \frac{220^2}{1660} = 29,16 \text{ Ом}. \quad (2.90)$$

Выбираем тормозной модуль FCI-BU-50 на 29 Ом.

2.8 Расчет энергетических показателей электродвигателя

Рассчитываем полную мощность:

$$\Delta P_H = P_H \left(\frac{1}{\eta_H} - 1 \right) = 2200 \cdot \left(\frac{1}{0.765} - 1 \right) = 675.8 \text{ Вт}. \quad (2.91)$$

Рассчитываем переменную составляющую потери мощности:

$$\Delta P_{V.H} = M_H (\omega_0 - \omega_H) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 29(78.5 - 75.83) \cdot \left(1 + \frac{3.35}{2.79} \right) = 170.35 \text{ Вт}. \quad (2.92)$$

Рассчитываем постоянную составляющую потери мощности:

$$\Delta P_{CH} = \Delta P_H - \Delta P_{VH} = 675.8 - 170.35 = 505.45 \text{ Вт}. \quad (2.93)$$

Определение коэффициента потерь мощности:

$$a = \frac{\Delta P_{CH}}{\Delta P_{VH}} = \frac{505.45}{170.35} = 2.967 \quad (2.94)$$

Активная мощность.

Расчет полезного расхода энергии:

$$A_2 = M_C \cdot \omega_C \cdot t_C = 29 \cdot 75.83 \cdot 0.8 = 1759.26 \text{ Вт} \cdot \text{с}, \quad (2.95)$$

где ω_C , t_C – угловая скорость и время установившегося режима.

Определение постоянной составляющей потери энергии:

$$\Delta A_C \approx \Delta P_{CH} \cdot \left(\frac{\omega_C}{\omega_0} \right)^2 \cdot t_C = 505.45 \cdot \left(\frac{75.83}{78.5} \right)^2 \cdot 0.8 = 377.3 \text{ Вт} \cdot \text{с}. \quad (2.96)$$

Определение величины приведенного фазного тока ротора в установившемся режиме:

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S_C} \right)^2 + (X_K)^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(3.35 + \frac{2.79}{0.034} \right)^2 + (9.42)^2}} = 2.56 \text{ А}. \quad (2.97)$$

Определение переменной составляющей потери энергии:

$$\Delta A_V = 3 \cdot [I_0^2 \cdot R_1 + (I_2')^2 \cdot (\vartheta \cdot R_1 + R_2')] \cdot t_C \quad (2.98)$$

где ϑ – поправочный коэффициент:

$$\vartheta = 1 + \frac{2 \cdot I_0 \cdot X_K}{U_1} = 1 + \frac{2 \cdot 6.1 \cdot 9.42}{220} = 1.52 \quad (2.99)$$

$$\Delta A_V = 3 \cdot [6.1^2 \cdot 3.35 + 2.56^2 \cdot (1.52 \cdot 3.35 + 2.79)] \cdot 0.8 = 347.58 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Потребляемая из сети энергия:

$$A_1 = A_2 + \Delta A_C + \Delta A_V = 1759.26 + 377.3 + 347.58 = 2484.14 \text{ Вт} \cdot \text{с}. \quad (2.101)$$

Потребление реактивной энергии за цикл:

$$\sum A_P = \sum_{i=1}^n 3 [I_0^2 \cdot (X_1 + X_\mu) + (I_{2i}')^2 \cdot (X_1 + X_{2i}')] \cdot t_{c,i} \quad (2.102)$$

$$A_P = 3 \cdot [6.1^2 \cdot 57.7 + 2.56^2 \cdot 9.42] \cdot 0.8 = 5300.96 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\sum A_2}{\sum A_1} \cdot 100\% = \frac{1759.26}{2484.14} \cdot 100\% = 70.8\% . \quad (2.103)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{\Sigma} = \frac{\sum A_1}{\sqrt{(\sum A_1)^2 + (\sum A_P)^2}} = \frac{2484.14}{\sqrt{2484.14^2 + 5300.96^2}} = 0.42 \quad (2.104)$$

3 Исследование системы электропривода в динамических режимах работы

3.1 Расчет параметров объекта управления

Определим коэффициенты $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$, для двухфазной модели АД для этого рассчитаем необходимые параметры:

- индуктивность статора

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{2\pi f} = \frac{1.119 + 79.88}{314} = 0.184 \text{ Гн.} \quad (3.1)$$

- индуктивность ротора

$$L_2 = \frac{X_2 + X_\mu}{2\pi f} = \frac{2.249 + 79.88}{314} = 0.19 \text{ Гн.}$$

- взаимная индуктивность

$$L_{12} = \frac{X_\mu}{2\pi f} = \frac{54}{314} = 0.172 \text{ Гн.} \quad (3.2)$$

- эквивалентная индуктивность цепи статора

$$L_s = L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} = 0.184 - \frac{0.172^2}{0.19} = 0.0283 \text{ Гн.} \quad (3.3)$$

$$K_1 = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \frac{0.19}{0.184 \cdot 0.19 - 0.172^2} = 35.34 \text{ 1/Гн.}$$

$$K_2 = \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \frac{0.172}{0.184 \cdot 0.19 - 0.172^2} = 31.994 \text{ 1/Гн.}$$

$$K_3 = K_2 R_2 = 31.994 \cdot 2.79 = 89.26 \text{ 1/Гн.}$$

$$K_4 = \frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \frac{0.184}{0.184 \cdot 0.19 - 0.172^2} = 34.226 \text{ 1/Гн.}$$

$$K_5 = K_4 R_2 = 34.226 \cdot 2.79 = 95.49 \text{ 1/Гн.}$$

$$K_6 = \frac{3}{2} p_n L_{12} = \frac{3}{2} \cdot 4 \cdot 0.172 = 1.032 \text{ Ом.}$$

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 \left(\frac{L_{12}^2}{L_2^2} \right) = 3.35 + 2.79 \cdot \frac{0.172^2}{0.19^2} = 5.64 \text{ Ом.}$$

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{0.0283}{5.64} = 0.005 \text{ с.}$$

$$\psi_1 = \frac{E_s \cdot \text{НОМ}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НОМ}}} = \frac{217}{314} = 0.69 \text{ Вб.}$$

3.2 Структурная схема системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» и расчет ее параметров

Структурная схема линейаризованной системы ТПЧ-Д представляет собой структурную схему АД и динамического звена на её входе с передаточной функцией ТПЧ (рисунок 3.2):

$$W_{\text{ТПЧ}} = \frac{\omega_0(P)}{U_{\text{УЧ}}(P)} = \frac{K_{\text{УЧ}} \cdot 2\pi}{P_{\Pi}}. \quad (3.4)$$

где $U_{\text{УЧ}}$, $K_{\text{УЧ}}$ – напряжение управления частотой и коэффициент усиления ТПЧ по каналу частоты.

Модуль статической жесткости рассчитывают по формуле:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_K}{\omega_{\text{ОН}} \cdot S_K} \cong \frac{M_H}{\omega_{\text{ОН}} - \omega_H} = \frac{29}{78.5 - 75.83} = 10.86. \quad (3.5)$$

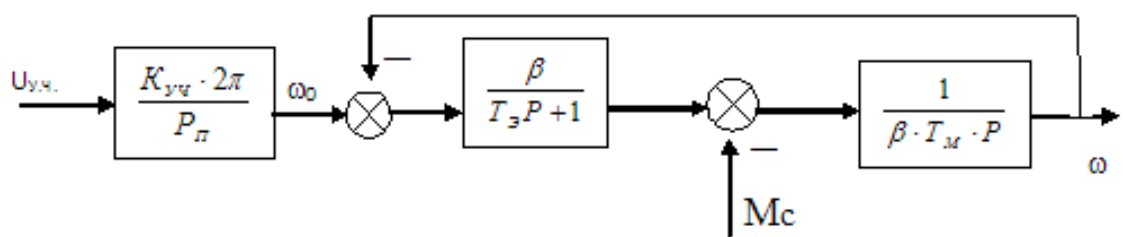


Рисунок 3.2 - Структурная схема системы ТПЧ-АД

Электромагнитная постоянная времени определяется по формуле:

$$T_{\Sigma} = \frac{1}{314 \cdot S_K} = \frac{1}{314 \cdot 0.28} = 0.0114. \quad (3.6)$$

Электрохимическая постоянная времени электродвигателя:

$$T_M = J \frac{\omega_0}{M_{\max}} = 0,017 \frac{78.5}{63.8} = 0,021. \quad (3.7)$$

На рисунке 3.3 показана структурная схема автоматизированной системы управления вентиляторной установкой.

В схеме приняты следующие обозначения:

РТ – регулятор температуры;

К_{ДТ} – датчик температуры;

К_{вент} – передаточный коэффициент вентилятора;

К_д – передаточный коэффициент электродвигателя, который определяется по формуле:

$$K_d = \frac{2\pi}{p} = \frac{2 \cdot 3,14}{4} = 1.57.$$

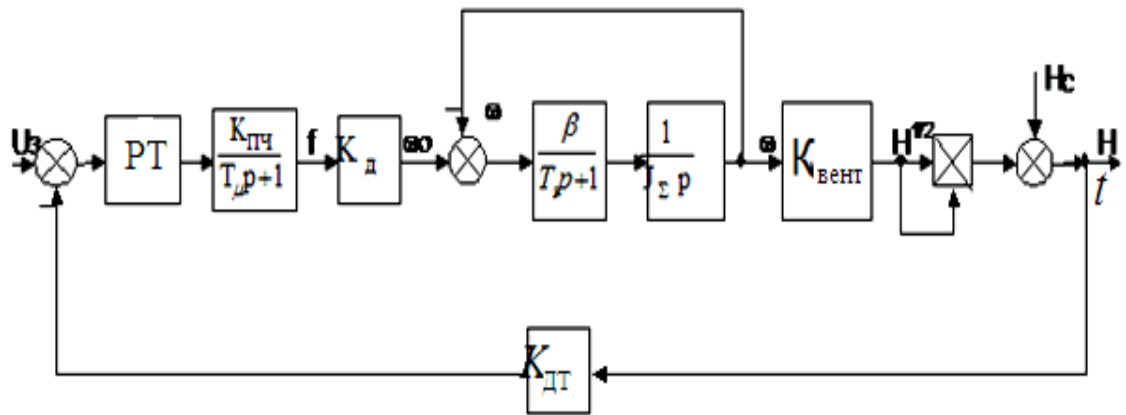


Рисунок 3.3 - Структурная схема автоматизированной системы управления вентиляторной установкой

3.3 Выбор виртуальной модели электропривода и исследование переходных процессов

Для моделирования работы полупроводниковых электроприводов одним из наиболее эффективных и широко применяемых инструментов является программный пакет MatLab (сокращённо от Matrix Laboratory). Благодаря своей модульной структуре и многочисленным пакетам расширения (Toolboxes), MatLab получил широкое признание как основное программное средство для анализа и исследования систем полупроводникового электропривода.

В рамках данного исследования были использованы два ключевых расширения MatLab — Simulink и Power System Blockset.

Simulink представляет собой мощную платформу для моделирования и анализа электромеханических систем. Практически любые задачи, связанные с анализом, управлением или исследованием динамики электропривода, могут

быть решены в данной среде. Simulink позволяет переходить от математических моделей к визуальному построению системы, а также — при необходимости — автоматически генерировать код для последующей реализации алгоритмов на микроконтроллерах.

Библиотека Simulink включает в себя визуальные блоки, позволяющие проектировать и исследовать разнообразные системы автоматического управления. Каждый блок настраивается через интерактивное окно параметров, где задаются все необходимые характеристики.

В рамках построенной модели (см. рисунок 3.4) были использованы следующие компоненты:

- AsynchronousMachineSIUnit — стандартная модель асинхронного электродвигателя, параметры которой соответствуют паспортным данным двигателя типа 4A112MA8Y3;
- 3PhaseProgrammableVoltageSource — источник синусоидального трёхфазного напряжения с амплитудой $U_m = 380$ В, фазовым сдвигом 120° , частотой $f = 50$ Гц, моделирующий трёхфазную систему с номинальными напряжениями $U_\phi = 220$ В и $U_L = 380$ В;
- Three-Phase V-I Measurement — виртуальный мультиметр для измерения значений напряжения и тока в трёхфазной сети;
- Scope (2 экземпляра) — осциллографы, предназначенные для отображения временных диаграмм напряжения и тока, а также характеристик электропривода: частоты вращения ротора и момента на валу;
- Display (2 блока) — индикаторы, показывающие установившиеся значения скорости и момента в числовом формате;
- Дополнительный Scope — используется для снятия и анализа осциллограмм динамики изменения момента и скорости ротора;
- Constant — блок, позволяющий задать постоянную нагрузку на вал двигателя;
- Timer — элемент, с помощью которого моделируются включение и отключение нагрузки в определённые моменты времени.

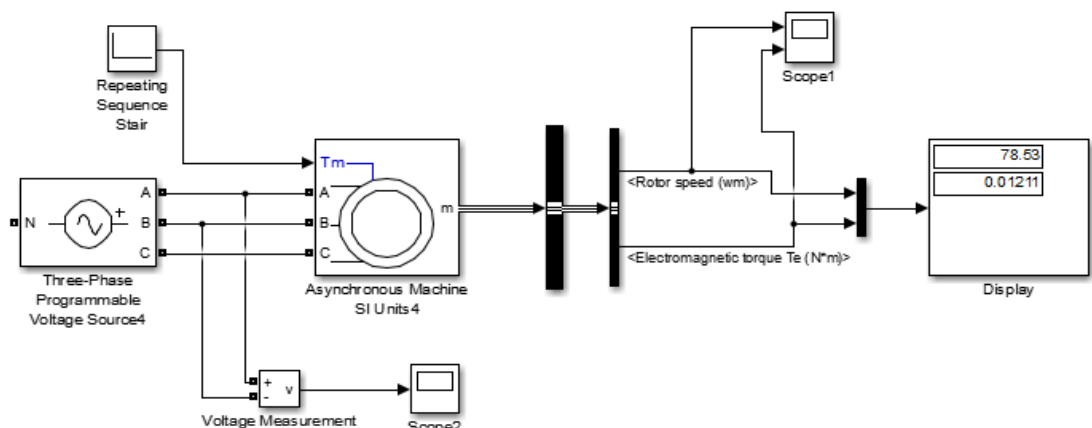


Рисунок 3.4 - Виртуальная модель пуска асинхронного двигателя

В окно ввода введем параметры выбранного электродвигателя 4A112MA8Y3, соответствующие номинальным паспортным данным (рис. 3.5).

Моделируем пуск двигателя под нагрузкой при трех различных частотах питающего напряжения $f_1=50$ Гц, $f_2=30$ Гц, $f_3=15$ Гц, используя закон частотного регулирования $\frac{U}{f} = const$.

Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units4

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]:

[2200 380 50]

Stator resistance and inductance[Rs(ohm) Lls(H)]:

[3.35 0.0118]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[2.79 0.018]

Mutual inductance Lm (H):

0.172

Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

[0.017 0. 4]

Initial conditions

[1 0 0 0 0 0 0]

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.5 - Параметры электродвигателя 4A112MA8Y3

На рисунке 3.6 показаны переходные характеристики скорости и момента электродвигателя при пуске без нагрузки, при $f=50$ Гц $U_n=380$ В.

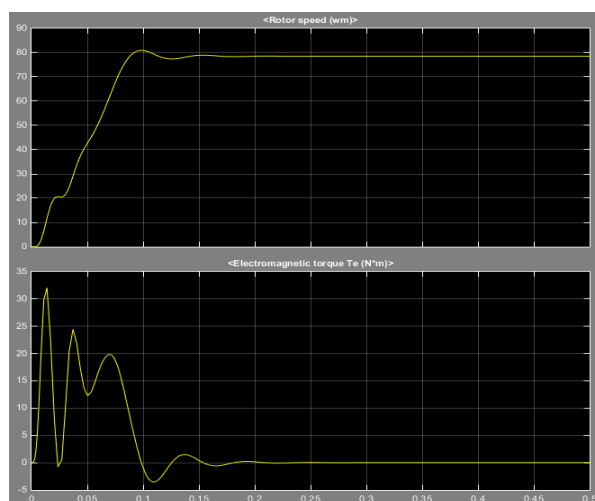


Рисунок 3.6 - Переходные характеристики скорости и момента при пуске 50 Гц без нагрузки

На рисунке 3.7 показаны переходные характеристики скорости и момента электродвигателя при пуске без нагрузки, $f=50$ Гц $U_{\text{л}}=380$ В; при $f=30$ Гц $U_{\text{л}}=228$ В; при $f=20$ Гц $U_{\text{л}}=152$ В; $f=15$ Гц $U_{\text{л}}=114$ В.

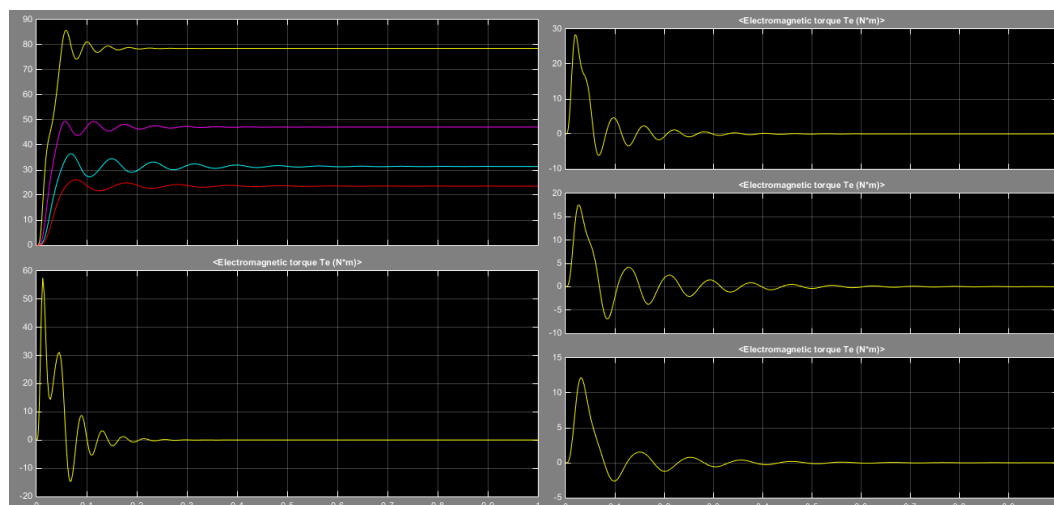


Рисунок 3.7 - Переходные характеристики скорости и момента при пуске 50,30,20,15 Гц без нагрузки

На рисунке 3.8 показаны переходные характеристики скорости и момента электродвигателя при пуске под нагрузкой 10; 5; 0 Нм, каждые 2 с при $f = 50; 30; 20; 15$ Гц

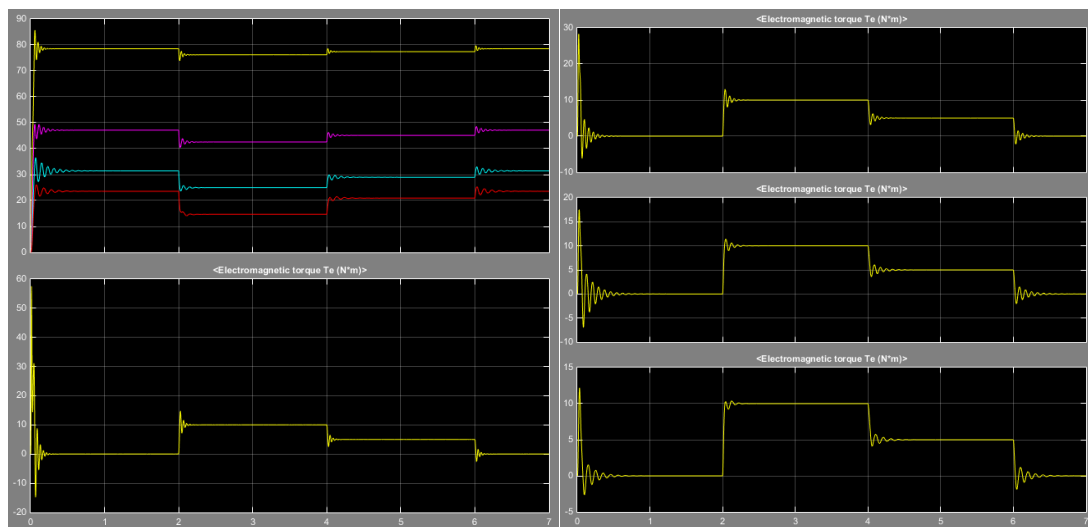


Рисунок 3.8 - Переходные характеристики скорости и момента при пуске под нагрузкой ($M=10; 5; 0$ Н·м) и при $f = 50; 30; 20; 15$ Гц

На рисунке 3.9 показаны переходные характеристики скорости и момента электродвигателя при пуске под нагрузкой 7 Нм спустя 1 с после пуска при $f = 50; 30; 20; 15$ Гц

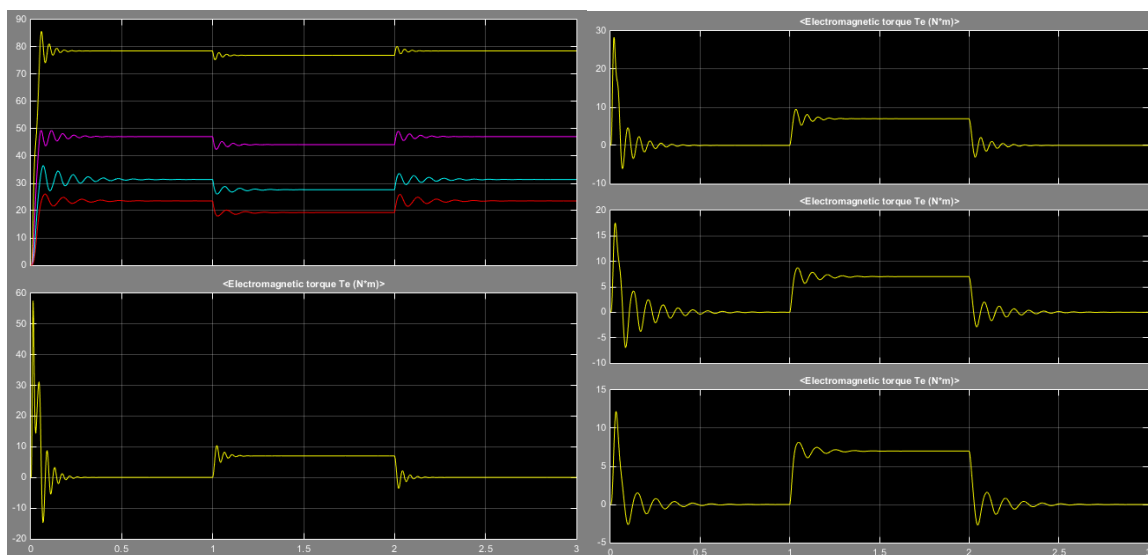


Рисунок 3.9 - Переходные характеристики скорости и момента при пуске под нагрузкой ($M=7 \text{ Н}\cdot\text{м}$) и при $f = 50; 30; 20; 15 \text{ Гц}$

На основании полученных переходных характеристик можно сделать вывод о том, что при пропорциональном снижении напряжения и частоты снижается соответствующим образом значение номинальной скорости и время достижения этой скорости. Электродвигатель может обеспечить номинальный момент

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе представлены обобщённые сведения о назначении, классификации и конструктивных особенностях различных типов конвейерных установок. Проведён анализ условий их эксплуатации, режимов работы, а также рассмотрены применяемые на практике варианты электроприводов, используемых в конвейерных системах.

В рамках технической части диплома был выполнен тяговый расчёт привода подвешенного конвейера, по результатам которого произведён выбор асинхронного электродвигателя требуемой мощности. На основе его параметров построены естественные и искусственные механические и электромеханические характеристики, отражающие поведение двигателя при различных режимах нагрузки.

Также осуществлён выбор частотного преобразователя, выполнены расчёты его основных параметров и определён перечень вспомогательного оборудования, необходимого для стабильной и безопасной работы системы. Разработана электрическая схема подключения ПЧ к асинхронному двигателю и сети питания.

Выполнен расчёт энергетических характеристик выбранного электропривода, включая его эффективность, потребляемую мощность и коэффициент полезного действия.

Сформирована структурная схема замкнутой автоматизированной системы управления электроприводом, в рамках которой были определены передаточные функции основных силовых компонентов. Для анализа динамики работы системы создана виртуальная модель электропривода с использованием программного комплекса Matlab/Simulink, на основе которой были исследованы переходные процессы асинхронного двигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Системы автоматизирования электроприводом: Учеб. Пособие / Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Е.П. Раткевич, О.Л. Симоненкова; Под общ. Ред. Ю.Н. Петренко. – Мн.: Новое знание, 2004. -384 с.: ил.
- 2 Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебн. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
- 3 Шеховцев П.В. Расчет и проектирование ОУ и электроустановок промышленных механизмов / М.:ФОРУМ, 2010.-352с.
- 4Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М: Издательский центр “Академия”, 2004. – 576 с.
- 5 Белов М.П., Новиков А.Д., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов - 236 с
- 6 Системы автоматизированного управления электроприводом: Учеб. Пособие / Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Е.П. Раткевич, О.Л. Симоненкова; Под общ. Ред. Ю.Н. Петренко. – Мн.: Новое знание, 2004. -384 с.: ил.
- 7 Шеховцев В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование: Учебник. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М. 2004. – 407 с.: ил. – (Профессиональное образование).
- 8 Конвейеры: Справочник/Р. А. Волков, А. Н. Гнутов, В. К. Дьячков и др. Под общ. ред. Ю. А. Пертена. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. 367 с., с ил.
- 9 Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / [М. П. Белов, О. И. Зементов, А. Е. Козярук и др.] ; под ред. В. А. Новикова, Л. М. Чернигова. – М. : Издательский центра “Академия”, 2006. – 368 с.
- 10 Баскаков В.И. Пожары на конвейерном транспорте / В.И. Баскаков, Г.К. Герасимов, В.С. Лудзиш // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – № 1. – С.41-43.
- 11 Пожаробезопасность ленточных конвейеров и нормы безопасности на шахтные конвейерные ленты / А.И. Субботин, Л.А. Беляк, Л.А. Чубаров, Ю.И. Григорьев // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 5. – С.18-23.
12. СТ КазННТУ – 09 – 2023. Учебная работа. Общие требования к структуре, оформлению, изложению и содержанию текстовых и графических материалов.