

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева»

На правах рукописи

Тарнецкая Александра Викторовна



**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛЕНТОЧНОГО
КОНВЕЙЕРА НА БАЗЕ БЕЗРЕДУКТОРНОГО СИНХРОННОГО
МОТОР-БАРАБАНА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Семыкина Ирина Юрьевна

Кемерово – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВОПРОСАМ РАЗРАБОТКИ БЕЗРЕДУКТОРНОГО СИНХРОННОГО МОТОР-БАРАБАНА ДЛЯ ШАХТНОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА.....	10
1.1 Современные системы электроприводов ленточных конвейеров	10
1.2. Регулирование скорости конвейера в функции грузопотока	16
1.3 Перспективы применения безредукторного электропривода для шахтных ленточных конвейеров.....	18
1.4 Особенности управления тихоходными СДПМ	22
1.5 Выводы по главе 1 и задачи диссертационного исследования	30
ГЛАВА 2 ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТИХОХОДНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	33
2.1 Особенности конструкции тихоходного СДПМ.....	33
2.2 Получение параметров тихоходного СДПМ для безредукторного синхронного мотор-барабана.....	36
2.3 Математическая модель тихоходного СДПМ.....	42
2.4 Выводы и результаты по главе 2	46
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕЗРЕДУКТОРНЫМ СИНХРОННЫМ МОТОР-БАРАБАНОМ.....	49
3.1 Полеориентированное управление безредукторным синхронным мотор- барабаном.....	50
3.2 Прямое управление моментом синхронного безредукторного мотор- барабана.....	59
3.3 Выводы и результаты по главе 3	65

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА НА БАЗЕ БЕЗРЕДУКТОРНОГО СИНХРОННОГО МОТОР-БАРАБАНА.....	67
4.1 Математическая модель движения ленты шахтного конвейера	67
4.2 Исследование системы управления электроприводом ленточного конвейера с двумя безредукторными синхронными мотор-барабанами	76
4.3 Сравнение показателей асинхронного редукторного электропривода и безредукторного синхронного мотор-барабана	84
4.4 Выводы и результаты по главе 4	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А Конструктивные параметры тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами 690 кВт	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчет коэффициентов матриц.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ В Приблизительный расчет системы охлаждения тихоход- ного синхронного двигателя с постоянными магнитами.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Справка о внедрении результатов на предприятие ООО «Завод Электромашина»	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Горнодобывающий комплекс является одной из важнейших отраслей для экономики России. Четверть от общего объема угля добывается подземным способом, так в 2018 году на отечественных шахтах освоено 108,3 млн. тонн угля, из которых 81,9 млн. тонн добыты в Кузбассе.

Основным и наиболее эффективным типом шахтного конвейерного транспорта является ленточный конвейер (ЛК). С ростом добычи полезных ископаемых увеличиваются протяженность и производительность ленточных конвейеров, соответственно возрастают затраты на электроэнергию, потребляемую электроприводами ЛК, что сказывается на конечной стоимости тонны угля.

Традиционный тяговый электропривод (ТЭП) шахтного ленточного конвейера состоит из асинхронного двигателя, цилиндрического редуктора, соединительных муфт и тормозной системы. Регулирование скорости ленты зачастую отсутствует или производится в 2-3 ступени. Асинхронный редукторный электропривод (АРЭ) занимает значительное пространство рядом с приводным барабаном конвейера, что требует дополнительных затрат на расширение горной выработки, затрудняет проведение профилактических и ремонтных работ. Массивный многоступенчатый редуктор нуждается в периодическом техническом обслуживании, зубчатые передачи ограничивают мощность вращения и вкуче с турбомуфтами снижают общий КПД электропривода.

Эффективность шахтного ЛК определяется его производительностью, энергопотреблением, безопасностью и т.д. Механические передачи, минеральные масла в турбомуфте и смазочные материалы редуктора являются возможными источниками возгорания, а издаваемые при работе шумы и вибрации негативно влияют на рабочий персонал. Для улучшения промышленной безопасности электротехнические компоненты электропривода ленточного конвейера оборудуются взрывозащитной оболочкой и специальной аппаратурой для контроля параметров окружающей среды.

С развитием технологий и появлением энергоемких машин класса IE4 наблюдается тенденция перехода от редукторного электропривода к безредукторному, появляется возможность замены традиционных электроприводов на компактные синхронные мотор-барабаны в герметичном корпусе, что позволяет не только снизить габариты ТЭП ЛК, но повысить эффективность и промышленную безопасность электропривода. Энергопотребление ТЭП снижается за счет регулирования скорости ленты в зависимости от входного грузопотока.

Таким образом, для устранения вышеуказанных проблем предлагается применение безредукторного мотор-барабана с синхронным двигателем на постоянных магнитах (СДПМ), регулируемого в функции грузопотока ленточного конвейера. Данный тип электропривода отличается повышенной энергоэффективностью по критериям КПД, массогабаритным показателям и потребляемой и выходной мощности.

Степень разработанности. Исследования последних лет подтверждают повышение эффективности электроприводов ленточных конвейеров при внедрении синхронных машин с постоянными магнитами, безредукторных технологий и мотор-барабанов. Задачами повышения эффективности электроприводов ленточных конвейеров занимались В. Г. Дмитриев, В. К. Дьячков, В. И. Галкин, В. М. Завьялов, Е. К. Ещин, В. Г. Каширских, О. Н. Петков, И. Ю. Семькина.

Вопросы управления синхронными двигателями на постоянных магнитах рассматривались отечественными и зарубежными исследователями, такими как Э. Арройло, М. Ван, В. М. Завьяловым, А.Э. Евстратовым, А. Канарис, С. Модибо, У. Ньемандтом, Д. Осен, Ю. Перхонен, П. Раман, С.Е. Рывкиным, О. Уоллмарком и др.

Преимуществам внедрения безредукторных технологий в горной промышленности посвящены работы немецких исследователей Б. Рафман, Т. Рёш, Т. Хельмут и т.д.

Регулирование скорости движения ленты в зависимости от входного грузопотока освещается в трудах И. В. Бишеле, В. Г. Дмитриева, О. М. Зарецкого,

А. К. Лобачевой, Р. В. Мерцалова, Р. Л. Папомяна, Л. Д. Певзнера, Л. Г. Шахмейстера.

На сегодняшний день существует обширное количество трудов, посвященных вышеуказанным темам, однако вопрос разработки специализированного безредукторного мотор-барабана на базе безредукторного синхронного мотор-барабана (БСМБ) для шахтных ленточных конвейеров напрямую до сих пор не был рассмотрен. Информация о параметрах и особенностях синхронных безредукторных мотор-барабанов и тихоходных СДПМ средней и высокой мощности в открытом доступе отсутствует.

Целью диссертационной работы является разработка энергоэффективного электропривода шахтного ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана.

Основная идея работы состоит в том, что приводной барабан шахтного ленточного конвейера, внутрь которого помещается тихоходный синхронный двигатель на постоянных магнитах специальной конструкции, обеспечивает требуемые мощность и момент при КПД не ниже 90%.

Объектом исследования является безредукторный синхронный мотор-барабан шахтного ленточного конвейера, регулируемый в функции входного грузопотока, а **предметом исследования** – его параметры и показатели эффективности.

Задачи диссертационного исследования:

– произвести анализ широко применяющихся систем электроприводов шахтных ленточных конвейеров, сформулировать требования к тяговому электроприводу ленточного конвейера и предложить конструкцию энергоэффективного электропривода на базе безредукторного синхронного мотор-барабана;

– получить параметры тихоходного синхронного двигателя на постоянных магнитах на основе характеристик существующего тягового электропривода шахтного ленточного конвейера, удовлетворяющего заданным требованиям по мощности, моменту и с КПД не ниже 90%;

– обосновать выбор метода управления и разработать систему управления безредукторным синхронным мотор-барабаном, регулируемым в функции входного грузопотока;

– разработать систему электропривода ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана с показателями эффективности, превышающими показатели асинхронного редукторного электропривода идентичной мощности.

Основные научные положения:

– предложенный безредукторный синхронный мотор-барабан способен вырабатывать момент и мощность сопоставимые с асинхронным редукторным электроприводом и помещаться в габариты приводного барабана шахтного ленточного конвейера;

– разработанная система векторного управления безредукторным синхронным мотор-барабаном по схеме прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией обеспечивает выполнение всех требований, предъявляемых к системе управления ТЭП ЛК;

– применение тягового электропривода шахтного ленточного конвейера на базе энергоэффективного безредукторного синхронного мотор-барабана способствует повышению КПД электропривода не менее, чем на 5%.

Научная новизна работы:

– впервые получены параметры безредукторного синхронного мотор-барабана большой мощности, предназначенного для тягового электропривода шахтного ленточного конвейера;

– получены математическая и компьютерная модели тихоходного СДПМ для безредукторного мотор-барабана, в которой дополнительно учитываются пульсации зубцового момента;

– в качестве системы векторного управления безредукторным синхронным мотор-барабаном большой мощности, для регулирования пульсирующего момента, впервые использована схема прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией;

– предложена схема регулирования скорости в зависимости от грузопотока, в которой, в отличие от известных, задание для контура скорости формируется с помощью задатчиков интенсивности и блоков квантования грузопотока.

Теоретическая значимость работы заключается в получении параметров нового типа электропривода ленточного конвейера – безредукторного мотор-барабана на базе синхронного двигателя на постоянных магнитах, регулируемого в функции входного грузопотока.

Практическая значимость работы

Применение безредукторного мотор-барабана на базе СДПМ, регулируемого в функции входного грузопотока, на предприятиях горнодобывающего комплекса в качестве ТЭП ЛК позволит снизить капитальные и эксплуатационные затраты, может способствовать повышению надежности и промышленной безопасности, улучшению условий труда за счет снижения шума и вибраций.

Результаты работы были оценены предприятием ООО «Завод Электромашина» (г. Кемерово) и приняты для дальнейшей разработки опытного образца.

Методология и методы исследований

В качестве методов исследования применялись общенаучные методы анализа характеристик и параметров СДПМ и электроприводов конвейеров, теоретические методы построения математических моделей. Использовались методы численного решения дифференциальных уравнений, теория обобщенной электрической машины, теория автоматического управления, уравнения Лагранжа. Реализация математических моделей и необходимых расчетов производилась в программных средах MagNet Solve, Matlab и MathCad.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных в работе, подтверждается корректностью принятых исходных допущений, применением апробированных методов конечномерного моделирования, погрешность которых не превышает 10-15%. Моделирование механической системы движения ленты с

распределенными параметрами производилось с использованием известной математической модели с подтвержденной адекватностью.

Основное содержание работы, ее положения и результаты докладывались и получили одобрение на следующих конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (Кемерово, 2015 г.), Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), Второй международный инновационный горный симпозиум (г. Кемерово, 2017 г.), Всероссийская научно-практическая конференция: Энергетика и энергосбережение: теория и практика (г. Кемерово, 2017 г.), Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.).

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 12 печатных работах, в том числе в 2 статьях — в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, в 3 статьях — в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Web Of Science и Scopus).

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, 4 приложений и библиографического списка. Содержит 128 страниц машинописного текста, 58 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 135 наименований и 4 приложения на 12 страниц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВОПРОСАМ РАЗРАБОТКИ БЕЗРЕДУКТОРНОГО СИНХРОННОГО МОТОР-БАРАБАНА ДЛЯ ШАХТНОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

1.1 Современные системы электроприводов ленточных конвейеров

Ленточные конвейеры – основной и наиболее эффективный вид конвейерного транспорта в угольной промышленности, использующийся для доставки полезных ископаемых из забоя по сборным штрекам, уклонам и бремсбергам, наклонным стволам и штольням. По данным на 2013 г. крупными пользователями ленточных конвейеров в Кузбассе являются ОАО «Южкузбассуголь» – 11% от всего потребления конвейеров в угольных шахтах России, ОАО «Распадская» – 10,1%, а суммарная доля Сибирской энергетической угольной компании (СУЭК) по всем филиалам составляет более 21% [43]. Большая часть ныне действующих конвейеров России была произведена в 1950-70-е годы, средняя производительность достигает 6000 т/ч, ширина ленты 1200-2000 мм, мощность электродвигателей 600-3000 кВт. Ленточные конвейеры (ЛК) расходуют 25-30% от суммарного электропотребления совокупного оборудования всей подземной выработки, при этом главными потребителями электроэнергии являются электроприводы приводных, натяжных и хвостовых барабанов конвейера [26, 43].

Эффективность конвейера определяется его производительностью, энергопотреблением, безопасностью и т.д. По данным [36] наиболее вероятными местами возникновения пожаров в процентном соотношении являются конвейерные штреки (25,1 %) и наклонные выработки с ленточными конвейерами (14,2 %). Причины возникновения пожаров неоднозначны и трудно установимы, наибольшую возможность для возгорания представляют трение ленты при пробуксовке, электрические кабели и соединения, легковоспламеняющиеся минеральные масла в гидромуфтах и смазочные материалы редуктора [39]. Для улучшения безопасности электропривод ленточного конвейера должен быть

оборудован взрывозащитной оболочкой и специальной аппаратурой для контроля параметров окружающей среды.

В таблице 1.1 представлены данные о потребляемой мощности на 1 м длины распространенных марок стационарных шахтных ЛК, рассчитанной по методике из ГОСТ 31558-2012 [9]. Длина ветвей магистральных конвейеров составляет от 600 до 2000 м, энергопотребление некоторых превышает 1 МВт/ч. Таким образом, в разговоре об эффективности ленточных конвейеров существенное внимание уделяется системе электропривода.

Таблица 1.1 – Характеристики ленточных конвейеров

Марка ленточного конвейера	Длина конвейера, м	Производительность, т/ч	Мощность на 1 м, кВт
КЛ1000 (ОАО «ЯРКЗ»)	85	280	0,096
2ЛТ80У (ОАО «Сибсельмаш»)	600	420	0,120
КЛШ1-1000 (ЗАО "СИПР с ОП")	1000	650	0,286
2ЛК1000А-01 (ОАО «АМЗ»)	1000	850	0,378
1ЛТ1000А (ОАО «АМЗ»)	1200	890	0,402
1Л120 (ОАО «АМЗ»)	1800	1260	0,507

Традиционная система электропривода ленточного конвейера содержит следующие элементы: приводной барабан на керамической или металлической подложке, двигатель, редуктор, муфты, тормозную систему, устройство пуска, силовой преобразователь (регулятор напряжения, выпрямитель, преобразователь частоты и т.д.) и управляющее устройство. Структурная схема электропривода ЛК показана на рисунке 1.1, где U_z , U_{oc} – сигналы от задающего устройства и сигналы обратной связи соответственно.

Системы электроприводов ленточных конвейеров могут классифицироваться следующим образом:

- 1) По числу барабанов: одно-, двух-, трехбарабанные электроприводы и т.д.

2) По числу двигателей; одно-, двух-, многодвигательные с прямолинейными промежуточными приводами и т.д.

3) По виду двигателя и схеме управления:

– электропривод переменного тока с частотным преобразователем и асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (АД КЗ);

– электропривод переменного тока с асинхронно-вентильным каскадом и асинхронным двигателем с фазным ротором (АД ФР);

– электропривод постоянного тока с тиристорным выпрямителем переменного тока [61].

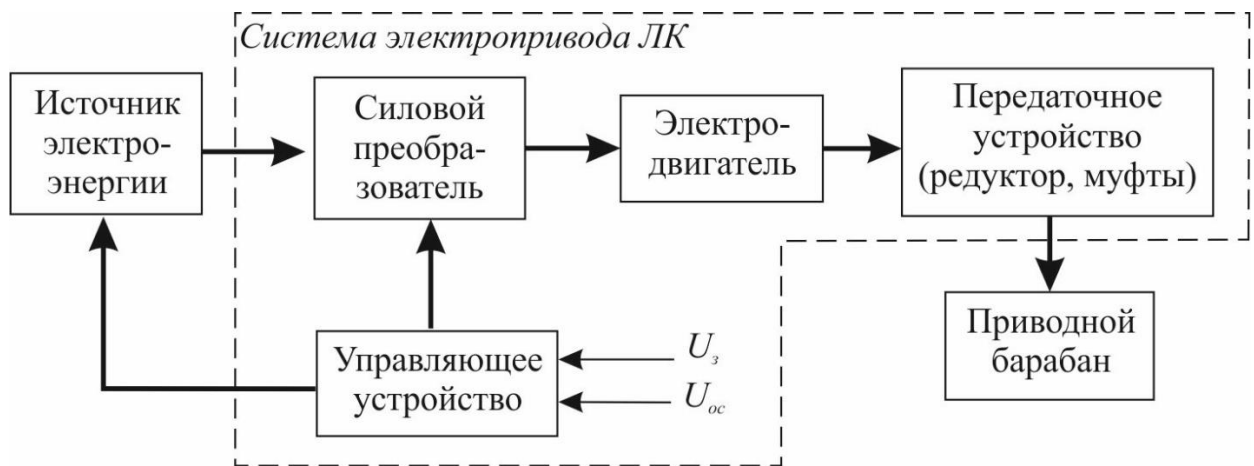


Рисунок 1.1 – Структурная схема электропривода ЛК

Основную долю современных конвейерных электроприводов составляют одно- и двухбарабанные асинхронные электроприводы с регулированием скорости в 2-3 ступени, работающие в продолжительном режиме с переменной нагрузкой [48, 49].

Однбарабанный привод с двумя электродвигателями применяется на конвейерных установках средней мощности и обеспечивает высокий коэффициент сцепления барабана с лентой. Мощные конвейерные установки большой длины и высокой производительности имеют несколько приводных барабанов. На рисунке 1.2 показан двухбарабанный привод с двумя двигателями.

Двухбарабанные приводы могут быть оборудованы тремя или четырьмя двигателями [2].

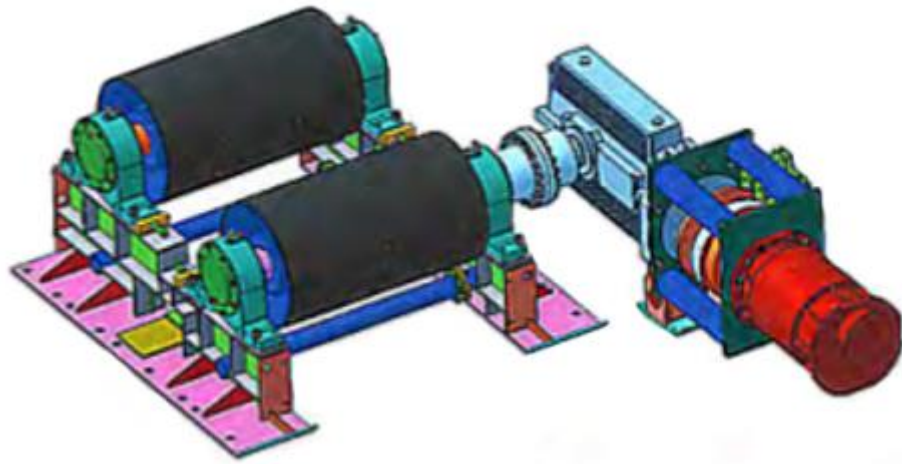


Рисунок 1.2 – Двухбарабанный привод с цилиндрическим редуктором

В электроприводе конвейеров большой длины применяются каскадные схемы с АД ФР и возможностью ступенчатого регулирования для ограничения пусковых токов и мгновенных ускорений ленты, способных привести к дополнительному натяжению и пробуксовке ленты. Существуют контакторные схемы с числом пусковых ступеней более 10 и переключением их в функции времени или в функции времени и тока, для снижения динамических нагрузок и создания начального натяжения ленты [47]. Несмотря на возможность прямого управления, АД ФР отличаются средним КПД $\sim 85\%$ и менее надежны, чем АД КЗ, для плавного пуска которых используются релейно-контакторные устройства плавного пуска или частотное управление.

Редуктор в ТЭП ЛК предназначен для преобразования скорости вращения двигателя и увеличения крутящего момента вторичного вала для обеспечения необходимого тягового усилия. Самые распространенные конструкции редукторов ленточных конвейеров:

— цилиндрический, для параллельной установки двигателя к оси ведущего барабана конвейера;

— конический, для перпендикулярной установки двигателя к оси ведущего барабана конвейера;

— червячный, позволяет сместить ось вторичного вала выше первичного.

Редуктор является наиболее массивным и дорогостоящим элементом электропривода, требующим выработки дополнительного пространства в узком тоннеле шахты. Механические передачи нуждаются в смазке, охлаждении и постоянном техническом обслуживании. Анализ поломок механического оборудования электроприводов ЛК, проведенный на шахтах Кузбасса, показывает долю поломок редукторов равной от 4,7 до 18% от общего числа поломок [31, 36]. При постепенном износе редуктора возникают дефекты в сопряжении передач и соосности валов двигателя и редуктора, увеличиваются динамические нагрузки и вибрация подшипников и вал-шестерни в области, примыкающей к соединительной муфте, что приводит к снижению КПД всей системы электропривода. Среднее время отказа шестерней редуктора электропривода ЛК составляет 3-4 года. Замена вышедших из строя подшипников требует капитального ремонта каждые 8-10 лет. Если срок эксплуатации конвейера в среднем 20-25 лет, то срок эксплуатации редуктора около 10 лет. Зубчатые передачи редуктора ограничивают мощность вращения до 3,2 МВт (500 кН·м), средний КПД конических и цилиндрических редукторов 87-92% [36, 94].

Упругие муфты служат для передачи и ограничения крутящего момента, снижения и равномерного распределения динамических нагрузок в многодвигательных системах. Применяются фрикционные, центробежные, электромагнитные муфты, однако наибольшее распространение в электроприводах ЛК большой протяженности получили турбомуфты, которые устанавливаются на входе редуктора для гашения крутильных колебаний и плавного пуска конвейера и обладают высоким КПД (до 98%). Однако в нерегулируемом электроприводе пускопредохранительные функции турбомуфты выполняются не полностью, так как достаточный момент на выходе муфты создается лишь при установившейся частоте вращения двигателя. При запуске конвейера без регулирования двигатель разгоняется до номинальной скорости на холостом ходу, вследствие чего резко

возрастают нагрузки в тяговом органе. Турбомуфты требуют дополнительного обслуживания, проверки и замены водоземлюльсии, выходят из строя из-за упругих ударов на ленте конвейера при загрузке и попадании осколков руды на роликовые опоры. Замена выплавленных вставок из-за перегрузок электропривода конвейера нередко служит причиной простоев в работе ленточных конвейеров [3, 41, 59, 75].

Из вышесказанного следует вывод, что традиционные асинхронные редукторные электроприводы ленточных конвейеров имеют ряд недостатков, связанных с большим числом компонентов, каждый из которых вносит дополнительные потери и, как следствие, снижает эффективность электропривода в целом [63]. Регулирование скорости в традиционных электроприводах осуществляется только при пуске и торможении конвейера. Многие ленточные конвейеры работают при нагрузке в 30-40% в течение всего периода эксплуатации, а движение на холостом ходу и даже кратковременные простои являются частью рабочего режима конвейера [4, 94], при таких условиях постоянная работа двигателя на номинальной мощности связана с неоправданными затратами электроэнергии. Для повышения энергоэффективности электропривода ленточного конвейера предлагаются следующие решения:

- использование современных двигателей класса IE3-IE4, таких как синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) с высоким КПД и низкими электрическими потерями;
- применение безредукторных технологий для прямой передачи момента на ленту;
- замена массивной приводной станции компактным мотор-барабаном для снижения массогабаритных показателей;
- регулирование скорости ленты в функции входного грузопотока для снижения энергопотребления [56].

Таким образом, в качестве нового типа тягового электропривода шахтного ленточного конвейера предлагается безредукторный мотор-барабан на базе СДПМ, регулируемый в функции входного грузопотока.

1.2. Регулирование скорости конвейера в функции грузопотока

Один из наиболее эффективных способов регулирования скорости электропривода ленточного конвейера – регулирование в функции входного грузопотока. Данному виду регулирования, а также способам оценки и моделирования входных грузопотоков магистральных ленточных конвейеров посвящены труды И. В. Бишеле, Ю. Н. Кожубаева, А. К. Лобачевой, Р. В. Мерцалова, Р. Л. Папояна, О. Н. Петкова, Л. Г. Шахмейстера [4, 32, 42, 45, 47, 72, 73]. В работе Р.В. Мерцалова [42] представлены различные схемы конвейерных грузопотоков, в зависимости от которых выбирается закон регулирования скорости, а в работе И. В. Бишеле и Нгуен Монг Хунг [4] рассматривается подход к выбору количества ступеней регулирования. Также вопросами формирования и оценки комплексных грузопотоков занимались В. В. Дмитриева, В. П. Дьяченко, В. П. Кондрахин, В. М. Прокуда и др. [11, 12, 13, 33, 49]

В исследованиях 1967 года Р. В. Мерцалова, Р. Л. Папояна и В. Т. Полунина [42, 45, 48] для построения коррелирующих функций используются статические данные с реальных конвейеров. Грузопоток описывается на основе вероятностного подхода, даются характеристики и определения различных видов грузопотоков, такие как «нулевой» и «единичный». Несмотря на частность рассматриваемых случаев, вероятностная модель получила широкое распространение и была задействована в дальнейших исследованиях отечественных ученых.

В работе В. С. Волотковского, Е. Г. Нохрина и др. [6] 1976 года предлагается рассматривать грузопоток в виде последовательности прямоугольных импульсов различной амплитуды, где паузы между импульсами обозначают отсутствие груза на ленте. Эта последовательность имеет определенную периодичность, которая зависит от вида транспортной системы, наличия промежуточных бункеров и перегружателей. Пример подобной системы движения грузопотока показан на рисунке 1.3. Сложностью в реализации данной модели является моделирование совместного распределения длительности и амплитуды импульсов относительно всей транспортной системы в случае, когда нам ничего о ней неизвестно.

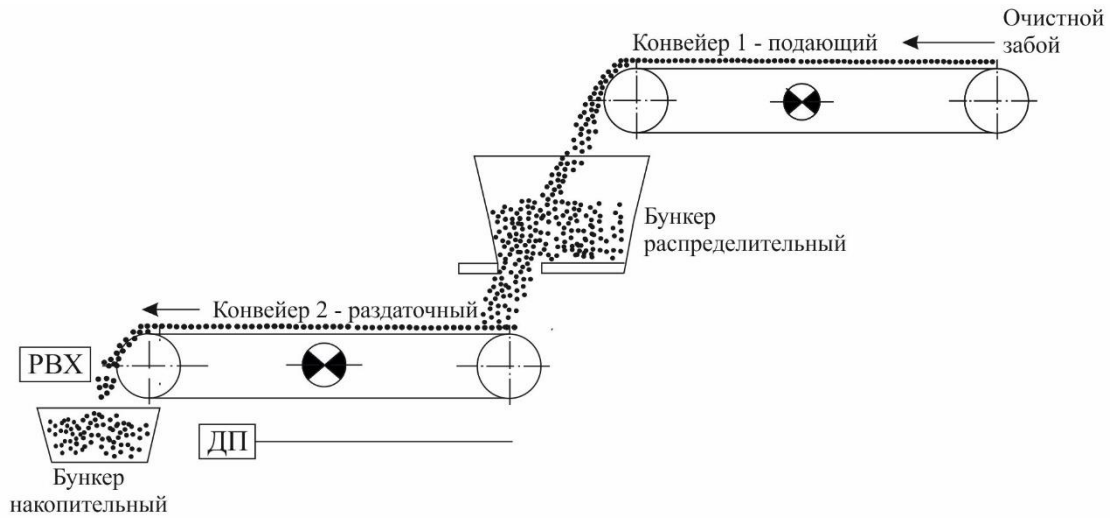


Рисунок 1.3 – Технологическая схема движения грузопотока

В. Г. Дмитриев, А. К. Лобачева и Л. Г. Шахмейстер [72, 73] предложили рассматривать грузопоток конвейера как непрерывный случайный процесс во времени $Q(t)$. Рассмотрен метод синтеза систем непрерывного и дискретного регулирования скорости для данного представления грузопотока. В качестве основных параметров дискретного регулирования выступают уровни переключения скорости, число ступеней регулирования, среднее время работы на каждой ступени и величина нагрузки.

В работах В. В. Дмитриевой, П. А. Каунга и В. В. Солодовникова [11, 12, 26, 60] грузопоток описывается с помощью эмпирических характеристик и законов распределения Гаусса. Для оценки грузопотока необходимо вычленить низкие и высокие «шумы» случайной величины грузопотока в заданном интервале сглаживания. В [60] модель грузопотока вписывается в концепцию частотного управления электроприводом и представляется в виде блока высокочастотного фильтра, на вход которого поступает случайный сигнал $X(t)$, а на выходе снимается случайная функция $Y(t)$. Данное представление наиболее удобно для совместного моделирования с электроприводами ленточного конвейера.

В [11, 26] при оценке ступеней и характеристик регулирования задействовался тяговый фактор ленточного конвейера, описывающий влияние натяжного устройства и натяжение ленты в целом, но в этих и в

проанализированных выше работах рассматривался нерегулируемый асинхронный привод и магистральные конвейеры большой протяженности. В данной работе предлагается разработать систему управления безредукторным синхронным мотор-барабаном для прямолинейного ленточного конвейера средней длины с двухбарабанным электроприводом, без промежуточных двигателей. При использовании синхронного двигателя с постоянными магнитами и преобразователя частоты высокого напряжения возможно обеспечить плавное переключение скоростей с заданной интенсивностью при постоянном натяжении ленты, что исключит пробуксовки при регулировании и снизит необходимость в стабилизации тягового фактора при регулировании скорости в функции входного грузопотока.

1.3 Перспективы применения безредукторного электропривода для шахтных ленточных конвейеров

Безредукторные технологии применяются с 70-ых годов в рудничных подъемных и мельничных установках. Благодаря обратной конструкции и прямой передаче механического момента ротор двигателя выступает рабочим органом, например, корпусом мельницы. Первый безредукторный электропривод для ленточного конвейера был разработан 26 лет назад подразделениями угольной шахты Проспер-Ханиэль (Германия). Система электропривода состояла из двух синхронных двигателей суммарной мощностью 3,8 МВт, работающих на скорости 46,9 об/мин, и прямых преобразователей частоты (циклоконвертеров) [88]. Несмотря на опыт успешного внедрения в 1986 году, безредукторные системы не получили широкого распространения из-за сложности и дороговизны изготовления циклоконвертеров. В наши дни, благодаря доступности преобразователей частоты, безредукторные электроприводы активно внедряются на магистральные ленточные конвейеры. В 2014-15 гг. аналогичные системы безредукторного электропривода с двумя синхронными двигателями на постоянных магнитах суммарной мощностью 6,2 МВт были установлены на надземных ленточных конвейерах в Антапаккай (Перу) и Ою-Толгой (Монголия) [78, 88, 97, 107, 130].

Поскольку многополюсные СДПМ имеют малую частоту вращения и высокий момент, необходимость в механическом преобразовании скорости и момента отсутствует, редуктор из системы электропривода можно исключить. На рисунке 1.4 показаны упрощенные кинематические схемы редукторного и безредукторного электроприводов, где 1 – двигатель, 2 – упругая муфта, 3 – редуктор, 4 – зубчатая муфта, 5 – приводной барабан ЛК. Как видно, применение безредукторных технологий позволяет значительно сократить число компонентов, и, как следствие, улучшить массогабаритные показатели электропривода.

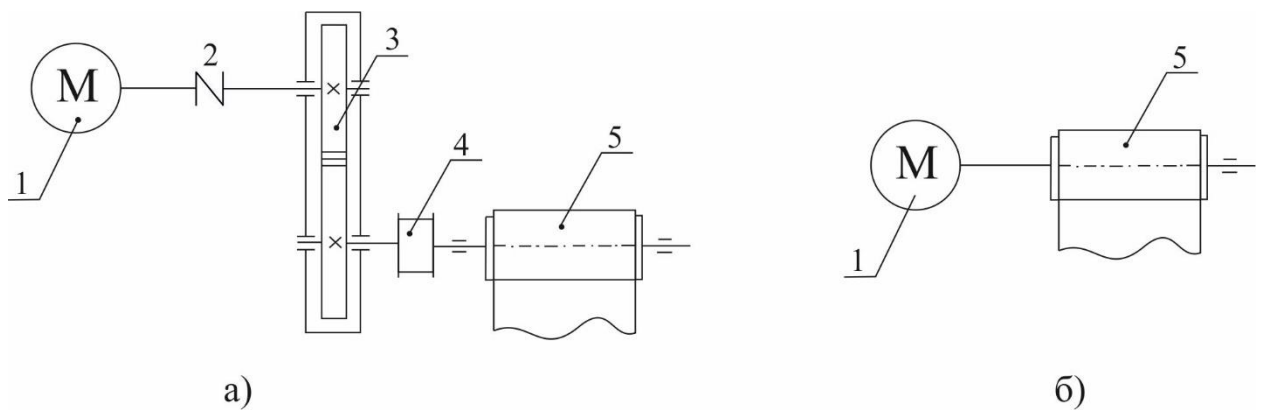


Рисунок 1.4 – Упрощенные кинематические схемы: а) асинхронного редукторного электропривода; б) безредукторного синхронного электропривода

В 2014 было произведено сравнение показателей качества асинхронных редукторных и синхронных безредукторных электроприводов ленточных конвейеров [121], согласно которому ликвидация механических и электрических компонентов способствует увеличению надежности и эффективности электропривода. Результаты показаны на рисунке 1.5, где приведены энергетические характеристики сравниваемых типов электроприводов. Как видно из рисунка 1.5, эффективность синхронных электроприводов выше традиционных электроприводов с АД. Также эксплуатация асинхронных двигателей сопряжена с нерациональным энергопотреблением при работе в области малых нагрузок до 60-70% от номинальной величины [99, 116, 120]. КПД синхронных двигателей

возрастает при частичной загрузке в 40-45%, максимум КПД совпадает с рабочим диапазоном ленточного конвейера.

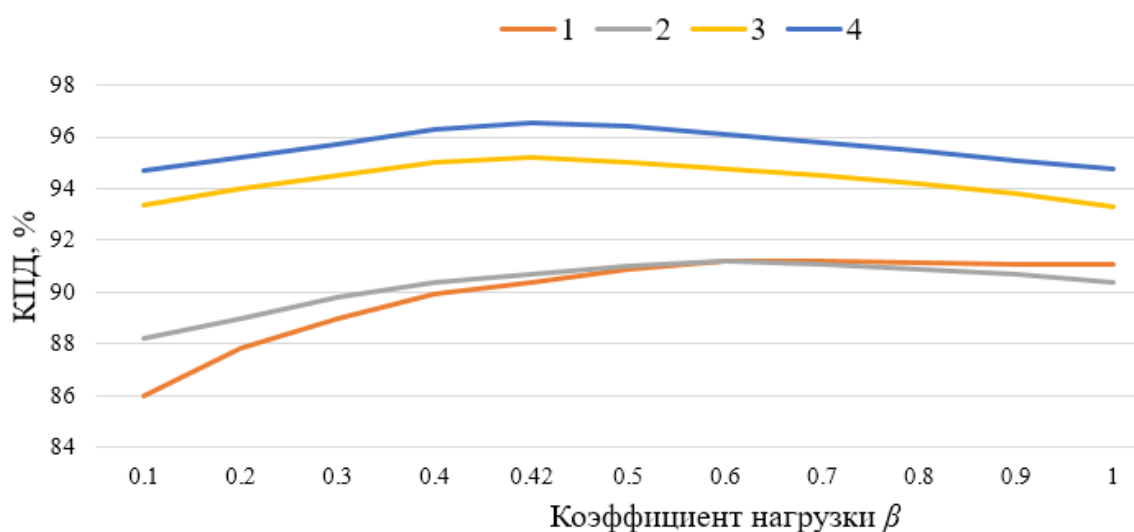


Рисунок 1.5 – Энергетические характеристики электроприводов:

1 – регулируемый редукторный привод с АД КЗ; 2 – нерегулируемый редукторный привод с АД ФЗ; 3 – регулируемый безредукторный привод с двумя СДПМ по 3000 кВт; 4 – безредукторный привод с одним СДПМ 6000 кВт

В 2017 производилось сравнение технико-экономических показателей синхронного безредукторного и асинхронного редукторного электроприводов ЛК мощностью 500 кВт [99]. Указывается, что суммарная эффективность безредукторного синхронного электропривода может быть на 30% выше по сравнению с традиционным асинхронным, а годовое энергопотребление понижается на 83 000 кВт.

В исследованиях [99, 121] синхронный двигатель непосредственно вращает приводной барабан, как показано на рисунке 1.4, б), и занимает пространство рядом с конвейером. В логистической и легкой промышленности на конвейерах малой мощности, где предъявляются высокие требования к массе и габаритам, уже несколько десятилетий применяются мотор-барабаны, которые обладают следующими преимуществами:

– компактность;

– установка мотор-барабана не требует вспомогательного оборудования, изготовления валов и подшипниковых узлов и т.д., так как наружные компоненты электропривода отсутствуют;

– повышенный КПД за счет прямой передачи механического момента ленте конвейера;

– отсутствие внешних подвижных частей, что снижает травмоопасность для персонала и упрощает техническое обслуживание;

– пониженный уровень шума;

– отсутствие деталей, подверженных быстрому износу;

– герметичный корпус мотор-барабана защищает оборудование от коррозии, препятствует попаданию пыли и влаги в барабан, вытеканию масла наружу, что снижает вероятность возникновения пожара [23, 68, 78].

Охлаждение и смазка мотор-барабана осуществляются из масляной ванны, во всех существующих конструкциях имеются отверстия для залива и слива масла. Замена масла в среднем производится раз в 4-5 лет.

В ходе анализа продукции известных производителей мотор-барабанов, таких как Sparks, Rulmeca, ABB (США), ПромЭК-Урал, ОДО «Энергоэлектропривод» (Россия), Interroll, LAT, MTA Systems, Siemens (Германия), Van der Graaf (Канада) [78, 85, 87, 89, 91] была выявлена тенденция замены асинхронных двигателей на синхронные. Существуют синхронные мотор-барабаны с КПД более 93 % [91].

В 2016 компания Van der Graaf (Канада) произвела сравнение традиционного асинхронного электропривода и синхронного мотор-барабана малой мощности. В результате замены эффективность повысилась на 27,2%, что при малой мощности двигателя 3,67 кВт составляет экономию до 9,56 кВт·ч/год [68].

Несмотря на постоянное совершенствование и наращивание мощностей, прецеденты разработки и внедрения безредукторных синхронных мотор-барабанов средней и большой мощности на шахтные ленточные конвейеры на данный момент отсутствуют или информация о них в открытом доступе отсутствует.

1.4 Особенности управления тихоходными СДПМ

Промышленный интерес к СДПМ появился в 80-е годы прошлого века, с появлением полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ) и улучшением характеристик постоянных магнитов (ПМ). Для изготовления ПМ используются сплавы алюминия, никеля и кобальта (AlNiCo), стронция и феррита, бария и феррита, самария и кобальта (первое поколение редкоземельных магнитов SmCo); спеченные магниты из неодима и бора с железом (второе поколение NdFeB) [37, 110]. На рисунке 1.6 показаны кривые размагничивания различных ферромагнитных материалов. Магниты из SmCo имеют наибольшую плотность магнитного потока и самую высокую стоимость. В промышленных электродвигателях устанавливаются неодимовые и спеченные магниты с остаточной магнитной индукцией $B_r = 1,1-1,3$ Тл, коэрцитивной силой $H_c = 720-800$ кА/м и температурой точки Кюри $T_c = 320$ °С [90, 124]. Благодаря высокой индуктивности синхронные машины с постоянными магнитами способны развивать высокий крутящий момент при относительно небольших электрических потерях, однако отсутствие обмотки возбуждения затрудняет управление СДПМ.

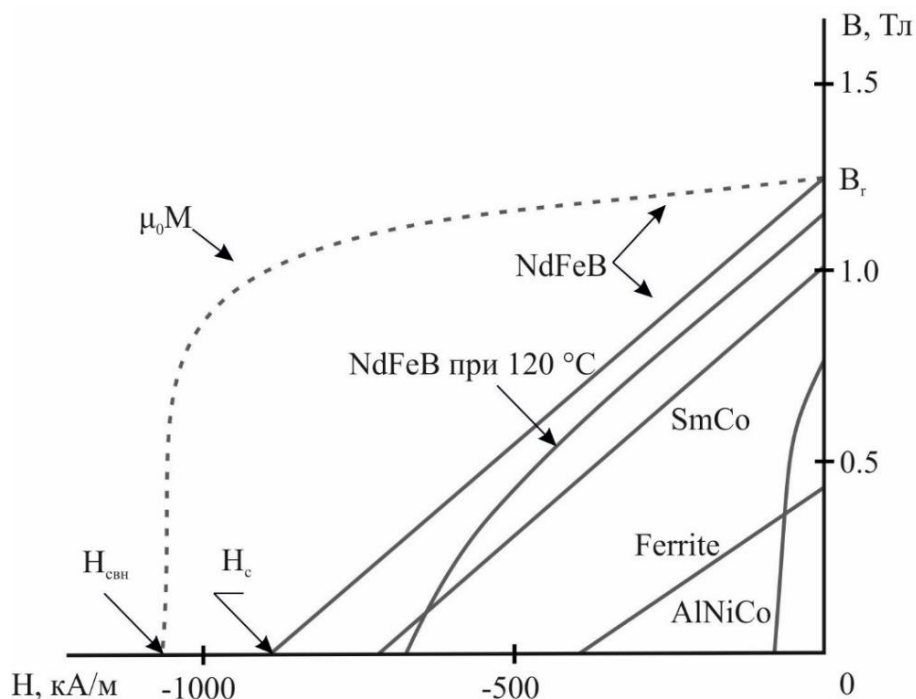


Рисунок 1.6 – Кривые размагничивания различных материалов ПМ

В последние десятилетия вопросам управления СДПМ посвящаются все больше отечественных и зарубежных работ. В 1986 Т. Янс, Дж. Климан и Т. Нейманн предложили специальную конструкцию СДПМ со встроенными магнитами, позволяющую осуществлять плавное управление моментом при регулировании скорости [92]. В тот же год исследователи М. Рахман, Дж. Слемон внедрили высокоэффективные ПМ для улучшения энергетических характеристик двигателя и разработали эквивалентную схему замещения, учитывающую особенности электромагнитного момента СДПМ [114].

В 1994 С. Моримото, И. Тун и Т. Хираса предложили способ повышения эффективности СДПМ, основанный на оптимальном управлении вектора тока с учетом рабочей скорости и характера нагрузки двигателя [103]. Предложенный алгоритм управления был протестирован на экспериментальной системе привода с СДПМ и реализован на цифровом сигнальном процессоре.

В 1997 Ким Дж-М. и Сул С-К. представили новую схему управления, основанную на ослаблении магнитного потока для предотвращения насыщения магнитной цепи, включающую внешний контур напряжения и ПИ-регулятор тока [95]. Преимущества данной схемы заключаются в гарантированном регулировании тока при любых рабочих условиях вне зависимости от параметров машины. Опубликованы результаты испытаний в различных условиях эксплуатации, в том числе при предаварийных расстроенных параметрах для проверки осуществимости предложенной схемы управления.

В 2001 С. Бовэнь, Ц. Цзихуа и Ж. Чжан получили модель СДПМ с питанием от шестиступенчатого непрерывного инвертора [80]. Математическая модель в неподвижной системе координат приводилась к подвижной системе координат ротора через преобразование Парка-Горева. Обширные результаты моделирования показали, что данный метод весьма эффективен при идентификации начальных условий.

В работе отечественных исследователей А. И. Байкова, М. В. Андрюхина и И. В. Бобылева в математической модели СДПМ предусмотрено воспроизведение заранее неопределенных переключений ключей силовой схемы, координатных

преобразований в структуре системы управления и особенностей выполнения аналого-цифровых функций. Модель подходит для анализа энергетических показателей в условиях несинусоидальных токов и напряжений [1].

При моделировании СДПМ большинство исследователей отдает предпочтение классической двухфазной модели электрической машины по осям d - q , которая подходит для векторного управления многофазными двигателями. Особенности управления СДПМ существенно зависят от рабочего органа, в данном случае — приводного барабана шахтного ленточного конвейера, трудности в управлении которым сопряжены с технологическим процессом транспортировки груза.

При разработке электропривода ЛК необходимо учитывать высокий статический момент сопротивления и неравномерные динамические нагрузки, вызванные протяженностью и массой частей конвейера, застыванием смазки, заштыбовкой ленты и т.д. К электроприводу ЛК предъявляются высокие требования по надежности, плавного пуска и плавного торможения.

Основная проблема управления тихоходным СДПМ и моделирования процессов пуска заключается в отсутствии управляющей обмотки на роторе, что делает невозможным контроль угловой скорости и угла поворота ротора [64]. Из-за наличия постоянных магнитов СДПМ обладает большой ЭДС остаточной намагниченности E_0 , В. При пуске и коротком замыкании возникает значительный пусковой ток якоря I_a , А, который рассчитывается по (1.1):

$$I_a = \frac{U + E_0}{x_d}, \quad (1.1)$$

где U – напряжение сети, В;

x_d – собственная индуктивность СДПМ вдоль поперечной оси статора, Ом.

Большие значения пусковых токов приводят к существенному нагреву машины и повышают вероятность аварийного режима. Другим следствием является реакция якоря, обладающая таким размагничивающим действием, что при пуске двигателя постоянные магниты могут практически полностью потерять свои магнитные свойства. Максимальное размагничивание имеет место в том случае,

когда поле ротора, вращаясь со скоростью близкой к синхронной, находится под углом $\theta = 180^\circ$ относительно поля статора. Реакцию якоря СДПМ при пуске компенсируют снижением расстояния между наконечниками полюсов ротора – таким образом магнитный поток реакции якоря замыкается не через магниты, а через полюсные наконечники. Также для осуществления пуска на полюсные наконечники устанавливаются демпферные обмотки в виде короткозамкнутых «беличьих клеток» [7].

Из-за неодинаковости магнитного сопротивления ПМ, при их различном положении относительно обмоток статора, на низких скоростях и при разгоне СДПМ возникает дополнительный реактивный тормозной момент M_T , Н·м, являющийся причиной неравномерного вращения вала и повышенного момента при пуске. При разгоне СДПМ магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами, наводит в обмотке статора ЭДС с изменяющейся частотой $f = f_1(1 - s)$, которая индуцирует вихревые токи, создающие потери. Эти потери покрываются механической мощностью P_T , Вт, подводимой к ротору двигателя, а сам реактивный тормозной момент для скорости вращения ротора ω_1 , рад/с, рассчитывается по формуле (1.2):

$$M_T = \frac{P_T}{\omega_1(1-s)}. \quad (1.2)$$

Полезный пусковой момент M_{II} вычисляется по (1.3)

$$M_{II} = M - M_T, \quad (1.3)$$

где M – асинхронный момент машины, Н·м.

При угле поля ротора относительно поля статора $0^\circ < \theta < 90^\circ$ реактивная составляющая тормозного момента уменьшает полезный пусковой момент, а при значениях $90^\circ < \theta < 180^\circ$ – увеличивает, что приводит к эффекту «залипания» ротора в магнитном поле и ухудшению пусковых процессов [16].

Таким образом, чтобы промоделировать пуск, торможение и другие переходные процессы СДПМ, необходимо учитывать следующие факторы:

– начальное положение ротора в зависимости от пуска под нагрузкой или на холостом ходу;

- зависимость индуктивностей от положения ротора в поле статора;
- значительную реакцию якоря и наличие тормозящего реактивного момента.

Так, например, в работе [35] рассмотрен равноускоренный частотный пуск СДПМ, где в качестве контролируемого параметра выступает разница между углом поворота ротора θ и вращающимся полем статора φ . При этом крайне важным является начальное положение ротора и угол отставания ротора от поля статора. Математическая модель при равноускоренном пуске (1.4):

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{\max} \sin(p(\theta - \varphi)) - M_H \quad (1.4)$$

где J – момент инерции СДМП, кг·м²;

M_{\max} – максимальный синхронизирующий момент двигателя, Н·м;

M_H – момент нагрузки, Н·м;

p – число пар полюсов двигателя;

φ – угол поворота вращающегося поля статора, эл. град.

Для равноускоренного разгона необходимо обеспечить постоянную составляющую синхронизирующего момента двигателя, для чего нужно поддерживать постоянный угол отставания между углом поворота ротора и углом поворота поля статора. При этом, при большом начальном значении угла θ пуск СДПМ становится невозможен. Это объясняется тем, что начальное вращение ротора направлено в противоположную сторону вращению поля статора, и угол отставания увеличивается еще быстрее, так как $\sin(p(\theta - \varphi))$ стремится к нулю. Очевидно, что при большом угле отставания между θ и φ решение уравнения (1.4) выше становится приближенным. Данный метод не подходит для тихоходных СДПМ, так как разгон сопровождается колебаниями ускорения, которые являются причиной собственных физических колебаний двигателя и накладываются на синхронизирующий момент, что затрудняет точность моделирования.

Наиболее возможный вариант пуска – это частотный пуск с помощью автономного инвертора и плавного нарастания частоты. Необходимо тщательно проработать задание частоты, поскольку при повышенной частоте СДПМ будет

выпадать из синхронизма, а слишком медленное повышение приведет к «залипанию» ротора и снижению быстродействия электропривода в целом.

Непостоянство и нелинейность индуктивностей создают определенные трудности и при моделировании динамических режимов СДПМ. Индуктивности и потокосцепления СДПМ зависят не от электрических величин, а являются функциями от параметра θ , который необходимо измерить и оценить. В датчиковом управлении для измерения угла поворота на ротор устанавливаются датчики Холла, резольверы или инкрементальные энкодеры, определяющие θ с высокой точностью. При бездатчиковом управлении используется косвенная оценка θ , но при работе на низких и близких к нулю скоростях реализация методов оценивания затруднена большим количеством обратных связей в контуре и дополнительными вычислениями в блоке оценивания, из-за чего время отклика системы возрастает и увеличивается погрешность управления [62, 132]. В 2010 датский исследователь К. Буска опубликовал сравнительный анализ, подтвердив, что качество в определении угла поворота ротора при бездатчиковом методе может быть сопоставлено с точностью датчика лишь на скоростях более 200 об/мин [79]. Таким образом, для тихоходных СДПМ датчиковое управление обеспечивает наибольшую точность и интенсивность регулирования.

Среди разнообразия работ, посвященных системам управления СДПМ, большинство исследователей концентрируется на полеориентированном управлении (ПОУ) и прямом управлении моментом (ПУМ). В методе ПОУ электромагнитный момент и потокосцепление статора контролируются косвенно посредством управления составляющими вектора тока статора. Суть метода ПУМ заключается в выборе вектора напряжения для одновременного управления моментом и потокосцеплением статора. Так, например, работы Э. Карилло Арройло [81], А. Амер [75], П. Анвеша [76], А.Э. Евстратова [14], Д.С. Кришна [122], И. Моримото [103], М.А. Рахман [113, 114], Д. Осен [106], Ю. Перхонен [110] и Ё. Чжан [135] и посвящены системам управлениями СДПМ на основе метода ПУМ. Системами управления СДПМ по методу ПОУ занимались Д. Муноз [104], Ю. Перхонен [110], С. Субин [125], О. Уоллмарк [131] и другие.

Исследователи Дж. Агравал и С. Бодхе исследовали управление СДПМ при постоянном угле электромагнитного момента $\delta = 90^\circ$ между полем ротора и фазой тока статора. При таком управлении инвертор в схеме ПОУ управляется токовым гистерезисным или ШИМ-контроллером. Данный принцип рекомендуется для неявнополюсных машин, в которых индуктивности по осям приблизительно равны ($L_d \approx L_q$) [93].

В.М. Завьялов, А. Рефки исследовали систему управления СДПМ по принципу дифференциального управления, при котором алгоритм управления формируется исходя из знака производных регулируемых величин. В их работах проводился сравнительный анализ характеристик дифференциального управления по сравнению с другими распространенными принципами [17, 51].

Принципу скользящего управления посвящены труды Д. Б. Изосимова, В. Матича [21, 22], В. И. Уткина [69], С. Е. Рывкина [117], Дун Цзян и Чжэнмин Чжао [86]. При скользящем управлении знак управления меняется при пересечении поверхности скольжения, представляющей собой специальным образом составленное уравнение, в которое входят переменные состояния объекта.

Среди разнообразия трудов наибольший интерес представляют исследования, посвященные управлению СДПМ на низких и близких к нулю скоростях. Лю Цзинхуа в 2005 сравнил методы полеориентированного управления и прямого управления моментом в широком диапазоне скоростей на примере схемы замещения СДПМ со встроенными ПМ [112]. Согласно [112] преимущество метода ПОУ справедливо только для двигателей малой мощности, также экспериментально подтверждено, что применение схемы ПУМ с пространственно-векторной модуляцией (ПВМ) на базе ШИМ дает лучшие результаты.

В работе М-С. Вана, И-Ш. Куна и Т.Н. Нгуена 2011 года рассматривается адаптивное управление СДПМ на близких к нулю скоростях. Предлагается увеличить точность определения угла ротора, связанную с периодом квантования сигнала энкодера, при помощи эталонной модели. Идентификация параметров для сравнения с моделью производилась методом наименьших квадратов [133].

Высокое качество управления отличает градиентное управление на основе метода скоростного градиента, гарантирующего изменение управляющего воздействия пропорционально градиенту скорости изменения функционала, задающего цель управления. Градиентным управлением занимались А. Баламурали, В.М. Завьялов, В.Г. Каширских, И.Ю. Семькина, А.Л. Фрадков [77, 18, 28, 52, 71].

В последние десятилетия большую популярность получили методы управления с прогнозирующей моделью (Model Predictive Control), основной принцип которых заключается в формировании в определенный момент времени последовательности управляющих воздействий, которая будет приложена к объекту для обеспечения максимального совпадения траектории прогнозируемых значений выхода с рекомендуемой траекторией движения. Для управления нелинейными нестационарными процессами строятся прогнозирующие модели на основе адаптивного и самоадаптивного управления, аппаратов искусственного интеллекта (нечеткая логика, нейронные сети и т.д.) [10, 24]. В работах М.-Л. Тан, Ш. Чжуан и Ш. Чай, Л. Ван реализовано прогнозирующее управление СДПМ, демонстрирующее высокое качество управление и снижение пульсаций момента в диапазоне низких скоростей [81, 127]. В исследованиях [111, 121] экспериментально подтверждается, что прогнозирующее управление маломощным СДПМ позволяет значительно снизить пульсации момента в сравнении с методами ПОУ и ПУМ.

Каждый из перечисленных принципов управления отличается характеристиками регулирования, технической базой и математическим аппаратом. Для обоснования выбора наиболее подходящего метода управления электроприводом ленточного конвейера произведен сравнительный анализ представленных выше методов по следующим критериям [128]:

1. Быстродействие по времени переходного процесса (низкое — 1-2 мс, среднее — 500-1000 мкс, высокое — 100-200 мкс);

2. Точность регулирования по статической ошибке (низкая — 7-10%, средняя — 5-7%, высокая — 2-5%);

3. Пульсации момента и тока по максимальной амплитуде пульсаций при $f = 10$ кГц (низкие — 5-10%, средние — 10-15%, высокие — 15-20%);

4. Требуемая вычислительная мощность по требованиям к преобразователю частоты, напряжению и сложности в реализации схемы.

5. Практическое применение: возможность реализации управления на существующих промышленных высоковольтных преобразователях частоты.

Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 1.2.

Наилучшими точностью регулирования и быстродействием обладают методы дифференциального, градиентного, скользящего управления и управления при оптимальном моменте на ампер, однако возможность практической реализации является важным критерием при разработке системы управления электроприводом шахтного ЛК, для разработки системы управления и дальнейшего сравнения выбраны методы ПОУ-ШИМ и ПУМ-ПВМ.

1.5 Выводы по главе 1 и задачи диссертационного исследования

Повышение эффективности электроприводов шахтных ленточных конвейеров и улучшение условий промышленной безопасности является актуальной задачей для предприятий горнодобывающего комплекса. Оптимизация массогабаритных и улучшение энергетических показателей производятся путем внедрения безредукторных технологий, моторизированных блоков и мотор-барабанов, применяются двигатели большей энергоемкости, такие как синхронные двигатели на основе постоянных магнитов. Уменьшение количества звеньев электропривода и прямая передача момента на ленту конвейера повышает общий КПД электропривода. Традиционные асинхронные электроприводы ленточных конвейеров, в состав которых входят механический редуктор и турбомуфты по сравнению с безредукторным синхронным электроприводом имеют меньший КПД при больших размерах и энергопотреблении.

Переключение скоростей на эффективных уровнях входного грузопотока способствует рациональному потреблению электрической мощности, минимизации энергозатрат при работе на холостом ходу, что снижает вероятность

Таблица 1.2 – Сравнение методов управления для тихоходного СДПМ

Принцип управления	Быстродействие	Точность регулирования	Пульсации момента и тока	Требуемая вычислительная мощность	Практическое применение
Полеориентированное управление с ШИМ	Среднее	Средняя	Низкие	Средняя	+
Прямое управление моментом с таблицей переключений	Среднее	Средняя	Высокие	Средняя	+
Прямое управление моментом с ПВМ	Высокое	Высокая	Средние	Высокая	+
Дифференциальное управление	Высокое	Высокая	Средние	Высокая	–
Скользящее управление	Среднее	Высокая	Низкие	Высокая	–
Адаптивное управление	Среднее	Высокая	Низкие	Высокая	–
Управление при постоянном угле момента	Высокое	Средняя	Низкие	Средняя	–
Управление при оптимальном моменте на ампер	Высокое	Средняя	Низкие	Средняя	–
Управление при постоянных потокоцеплениях рассеяния в зазоре	Среднее	Средняя	Средние	Высокая	–
Градиентное управление	Среднее	Высокое	Низкие	Средняя	–
Классическое управление с прогнозирующей моделью	Высокое	Высокое	Низкие	Средняя	–
Нейросетевое инверсивное управление	Среднее	Высокая	Низкие	Высокая	–
Управление по принципам нечеткой логики	Высокое	Высокая	Низкие	Высокая	–

блокировок груза, приводящих к заштыбовке и сходу ленты, лучшему распределению груза по ширине ленты, и, как следствие, ее равномерному натяжению по всей длине конвейера. Регулирование скорости позволяет продлить срок эксплуатации самого дорогостоящего элемента – ленты конвейера.

Исходя из вышесказанного целью работы является разработка системы энергоэффективного электропривода ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана, регулируемого в функции входного грузопотока. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- произвести анализ широко применяющихся систем электроприводов шахтных ленточных конвейеров, сформулировать требования к тяговому электроприводу ленточного конвейера и предложить конструкцию энергоэффективного электропривода на базе безредукторного синхронного мотор-барабана;

- с помощью конечномерного моделирования получить параметры тихоходного синхронного двигателя на постоянных магнитах на основе характеристик существующего тягового электропривода шахтного ленточного конвейера, удовлетворяющего заданным требованиям по мощности, моменту и с КПД не ниже 90%;

- обосновать выбор метода управления и разработать систему управления безредукторным синхронным мотор-барабаном, регулируемым в функции входного грузопотока;

- разработать систему электропривода ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана и исследовать показатели его эффективности в сравнении с асинхронным редукторным электроприводом идентичной мощности.

При получении параметров тихоходного СДПМ для безредукторного мотор-барабана в качестве заданных параметров, накладывающих ограничения на конструкцию, будут использованы данные об электроприводе и приводных барабанах магистрального конвейера предприятия ООО «Шахта «Талдинская-Кыргайская», г. Новокузнецк.

ГЛАВА 2 ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТИХОХОДНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Тихоходный синхронный двигатель с постоянными магнитами специальной конструкции располагается внутри корпуса безредукторного мотор-барабана. Его выходные параметры, такие как мощность, механический момент и частота вращения должны соответствовать заданным характеристикам тягового электропривода ленточного конвейера. В качестве заданных параметров для получения параметров тихоходного СДПМ рассматриваются параметры приводного барабана асинхронного электропривода главного ленточного конвейера шахты ООО «Талдинская-Кыргайская» (г. Новокузнецк): длина барабана $l = 1,2$ м, диаметр барабана $d = 1$ м. Параметры АД КЗ, вращающего приводной барабан: $U_{m1} = 6$ кВ, $P = 630$ кВт, скорость вращения барабана $n = 60$ об/мин, номинальный момент $M_n = 6$ кН·м.

2.1 Особенности конструкции тихоходного СДПМ

Тихоходные СДПМ, которые устанавливаются в приводных и натяжных барабанах, отличаются особой конструкцией, позволяющей им производить достаточную для работы загруженного ленточного конвейера высокую мощность при относительно небольших размерах. Быстродействие СДПМ характеризуется большим соотношением вращающего момента к моменту инерции ротора, а отсутствие обмотки возбуждения снижает суммарные электрические потери. Редкоземельные магниты создают магнитный поток высокой плотности, благодаря чему СДПМ может вырабатывать высокую удельную мощность на относительно небольшую единицу объема.

Для тихоходных СДПМ применяют конструкции с радиальными поверхностными или встроенными магнитами (рисунок 2.1). У машин со встроенными ПМ наиболее высокий коэффициент использования магнитов, но низкая перегрузочная способность и повышенные пульсации момента, вызванные высокими индуктивностями. У машин с поверхностными магнитами значения индуктивностей гораздо ниже, а перегрузочная способность, при которой не

происходит выпадение из синхронизма, может достигать 160% [83, 79]. Ротор тихоходной машины должен быть тонким и выполняться из листовой стали для снижения потерь на вихревые токи.

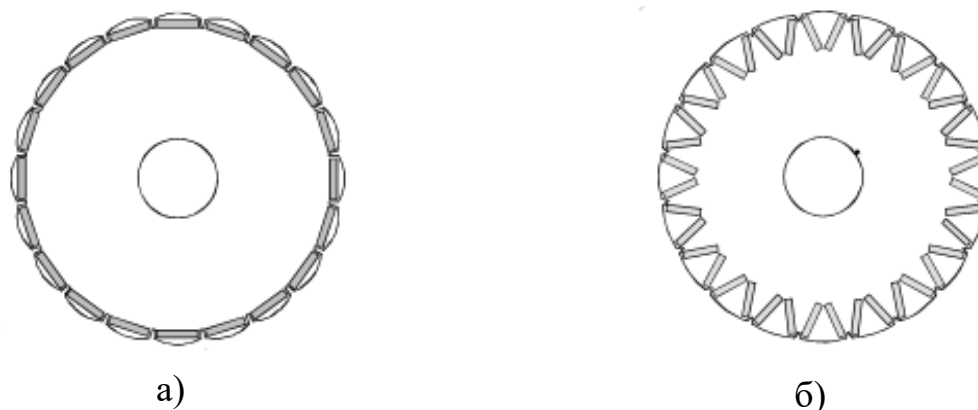


Рисунок 2.1 – Конструкции тихоходных СДПМ: а) с внешними радиальными ПМ; б) со встроенными ПМ

Число пазов на полюс и фазу по оси q может быть дробным или равным единице. На каркасе размещают ПМ радиальной формы, магнитный поток которых распространяется в радиальном направлении (рисунок 2.1, а). Полюсные наконечники служат для равномерного распределения синусоидального магнитного потока в воздушном зазоре машины и защиты полюсов от размагничивания. Магнитный угол влияет на величину зубцовых гармоник — так абсолютно сглаженные полюсные края способствуют неравномерному магнитному потоку в воздушном зазоре. Из-за большой магнитной индукции (свыше 1,8...1,9 Тл) в тихоходных СДПМ присутствует значительная реакция якоря, которую компенсируют уменьшением расстояния между наконечниками полюсов ротора. Таким образом, магнитный поток реакции якоря замыкается не через постоянные магниты, а через полюсные наконечники [79, 98, 101].

От конструкции и материала обмотки статора зависят значения токов, потокосцеплений и электромагнитного момента. У многополюсных машин количество пазов на статоре кратно количеству полюсов и может превышать его в несколько раз, из-за чего сами пазы получаются узкими, а их расширение за счет

уменьшения зубцовой зоны приводит к перенасыщению материала зубцов. Для достижения синусоидальной формы магнитной индукции в пазы статора укладывается многослойная распределенная обмотка с большим числом параллельных ветвей a для снижения эквивалентного сопротивления обмотки и потерь в меди. Число слоев зависит от площади сечения проводника, которая рассчитывается из значений токов короткого замыкания и мощности ПМ, а также коэффициента заполнения обмотки. Длина СДПМ для мотор-барабана ленточного конвейера больше длины воздушного зазора: у таких машин длина лобовых частей обмоток значительно меньше длины секции. Стоит помнить, что для создания высокого момента потокосцепление ПМ ψ_{PM} должно быть велико, а собственные индуктивности обмоток L и взаимные M должны быть малы. Большие значения индуктивностей приведут к снижению коэффициента мощности $\cos\varphi$ при работе СДПМ на номинальной скорости [19, 123].

Основной трудностью в управлении мощными тихоходными СДПМ на близких к нулю скоростях являются пульсации момента. Вращающий момент СДПМ зависит от положения ротора в магнитном поле статора и состоит из полезного и пульсирующего реактивного моментов. Пульсации момента вызваны несинусоидальным распределением магнитного потока в воздушном зазоре и наличием зубцового момента, возникающего из-за неравномерной магнитной проницаемости статора под воздействием магнитного поля ПМ. В тихоходных машинах пульсации зубцового момента значительно искажают форму вращающего момента, особенно при работе на низких скоростях [67, 68, 134].

Существуют следующие способы компенсации зубцового момента:

- уменьшение длины воздушного зазора;
- изменение соотношения количества пазов на полюс;
- уменьшение зубцовых выступов;
- увеличение коэффициента обмотки;
- использование магнитов специальной формы;
- ослабление магнитного потока;
- введение вспомогательных зубцов и пазов.

При разработке конструкции СДПМ рекомендуется сочетать различные способы компенсации таким образом, чтобы сохранить мощностные характеристики двигателя.

Разработка конструкции будет производиться методом конечно-элементного моделирования (МКЭ) в специализированном приложении MagnetSolve, обеспечивающем достаточную точность моделирования электромагнитных процессов.

2.2 Получение параметров тихоходного СДПМ для безредукторного синхронного мотор-барабана

Прежде, чем приступить к получению параметров тихоходного СДПМ с помощью МКЭ, требуется провести предварительный расчет основных размеров. Статор СДПМ схож со статором асинхронной машины, что позволяет определить основные размеры по типовым формулам [27, 34]. Внешний диаметр статора D_1 должен равняться диаметру приводного барабана, т.е. $D_1 = d = 1000$ мм. Длина статора L равна длине приводного барабана, $L = l = 1200$ мм. Количество пар полюсов $p = 12$ (при скорости движения ленты $v = 2$ м/с).

Внутренний диаметр статора D_2 рассчитывается по формуле (2.1)

$$D_2 = D_1 k_D, \quad (2.1)$$

где k_D – табличный коэффициент, характеризующий соотношение внутреннего диаметра статора к внешнему [8].

При $p \geq 12$ коэффициент $k_D = 0,75$, предварительный внутренний диаметр статора $D_2 = 750$ мм.

Предварительное значение полюсного деления τ считается по (2.2). Предварительный диапазон числа прямоугольных пазов по (2.3).

$$\tau = \frac{\pi D_2}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,75}{24} = 98 \text{ мм}. \quad (2.2)$$

$$Z_{1\min} \dots Z_{1\max} = \frac{\pi D_2}{t_{z1\max}} \dots \frac{\pi D_2}{t_{z1\min}} = \frac{3,14 \cdot 0,75}{0,03} \dots \frac{3,14 \cdot 0,75}{0,024} = 78 \dots 98, \quad (2.3)$$

где $t_{z1\min}$, $t_{z1\max}$ – границы возможных значений зубцовых делений статора, м.

Расчетное значение тока обмотки статора I_{Sh} (2.4):

$$I_{S_n} = \frac{P_2}{mU_{S_n}\eta\cos\varphi} = \frac{630000}{3 \cdot 6000 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 48,61 \text{ A}, \quad (2.4)$$

где P_2 – выходная мощность двигателя, Вт; m – число фаз; U_{S_n} – номинальное входное напряжение, В; $\cos\varphi$ – предполагаемый коэффициент мощности. Предварительное число витков находят по (2.5).

$$w_1 = \frac{A \cdot \pi \cdot D_2}{2I_{S_n} \cdot m} = \frac{50000 \cdot 3,14 \cdot 0,75}{2 \cdot 48,61 \cdot 3} = 374 \text{ витка}, \quad (2.5)$$

где A – расчетная линейная нагрузка, А/м.

Разработка СДПМ осуществляется в программных продуктах MotorSolve и Magnet компании Infolytica с помощью МКЭ. В основе метода конечных элементов лежит принцип разбиения области решений дифференциальных и интегральных уравнений с частными производными на конечное количество элементов. Сосредоточенные параметры полученной модели тихоходного СДПМ представлены в таблице 2.1, трехмерная модель показана на рисунке 2.2.

Для компенсации зубцового момента использовалась специальная форма ПМ с уменьшенным магнитным углом, также были уменьшены зубцовые выступы до 2,45 мм и длина воздушного зазора до 5,56 мм. Коэффициент обмотки равен 80% [55].

Таблица 2.1 – Параметры тихоходного СДПМ 690 кВт

Название параметра и единицы измерения	Значение
Номинальное питающее напряжение U , В	6000
Номинальная входная мощность P_{H1} , кВт	690
Номинальная выходная мощность P_{H2} , кВт	650
Номинальный ток статора I_{S_n} , А	72,6
Номинальная угловая скорость n_n , об/мин	60
Активное сопротивление цепи статора R_s , Ом	2,367
Продольное индуктивное сопротивление цепи статора L_d , Гн	0,579
Поперечное индуктивное сопротивление цепи статора L_q , Гн	0,496
Номинальный вращающий момент M_n , Н·м	109500
Потокоцепление постоянных магнитов Ψ_{PM} , Вб	52,49
Количество полюсов p_n	12
Момент инерции J , кг·м ²	110
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,72

Продолжение таблицы 1.2

Название параметра и единицы измерения	Значение
Коэффициент полезного действия η , %	93,8
Внешний диаметр $d_{внеш}$, мм	1000
Внутренний диаметр $d_{внутр}$, мм	675,5
Толщина воздушного зазора $d_{вз}$, мм	5,56
Масса, кг	6500

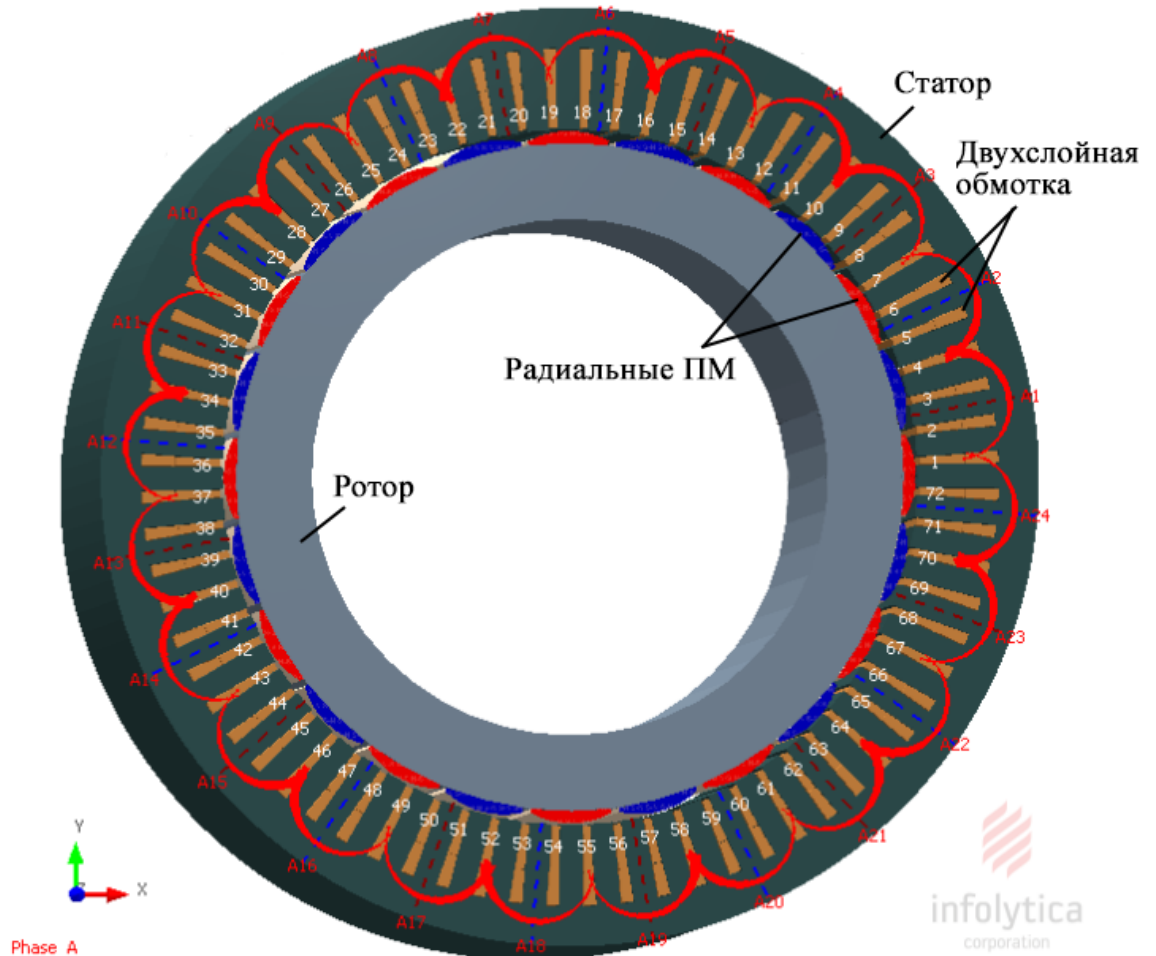


Рисунок 2.2 – Трёхмерная модель тихоходного СДПМ 690 кВт

На рисунке 2.3 представлена картина распределения индукции электромагнитного поля B в магнитопроводах статора и ротора при номинальной нагрузке. Наибольшее количество линий магнитной индукции B пронизывает зубцовые зоны статора, из-за высокой коэрцитивной силы ПМ материал зубцовых зон сильно намагничивается ($B = 1,89$ Тл). Это обуславливает неравномерный

магнитный поток в воздушном зазоре, с пиками в районе зубцов, и появление высших гармоник большой амплитуды.

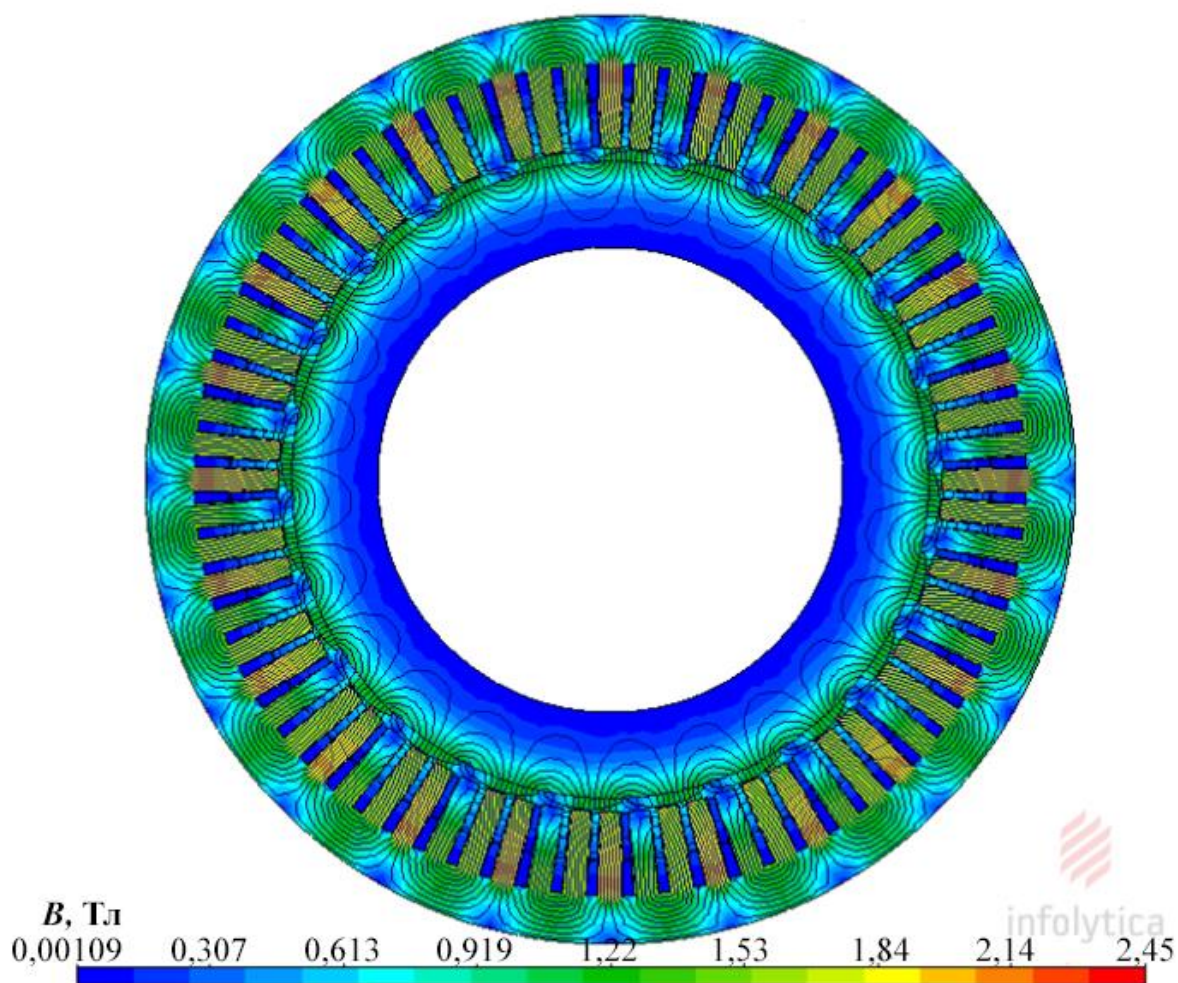


Рисунок 2.3 – Картина электромагнитного поля СДПМ 690 кВт

Полученная средствами MotorSolve модель соответствует заданным выходной мощности, номинальному моменту и КПД. Неравномерность насыщения, а также высокая индуктивность обмотки являются причинами низкого коэффициента мощности ($\cos\varphi = 0,72$), однако при получении характеристик требовалось добиться достаточных значений мощности, КПД и момента для исходных габаритов, увеличение $\cos\varphi$ возможно только при увеличении диаметра статора и ширины пазов.

На рисунке 2.4 представлены графики зависимостей тока I_s , напряжения U_1 , мощности P_2 , потерь $P_{пт}$, электромагнитного момента $M_{эм}$ от угла поворота ротора при номинальном токе статора, прямом включении СДПМ от сети и на холостом

ходу. Все характеристики статора, в частности электромагнитный момент, имеют несинусоидальное распределение. Из-за неявнополюсности СДПМ реактивная мощность искажает угловую характеристику (рисунок 2.4) [102, 96, 105].

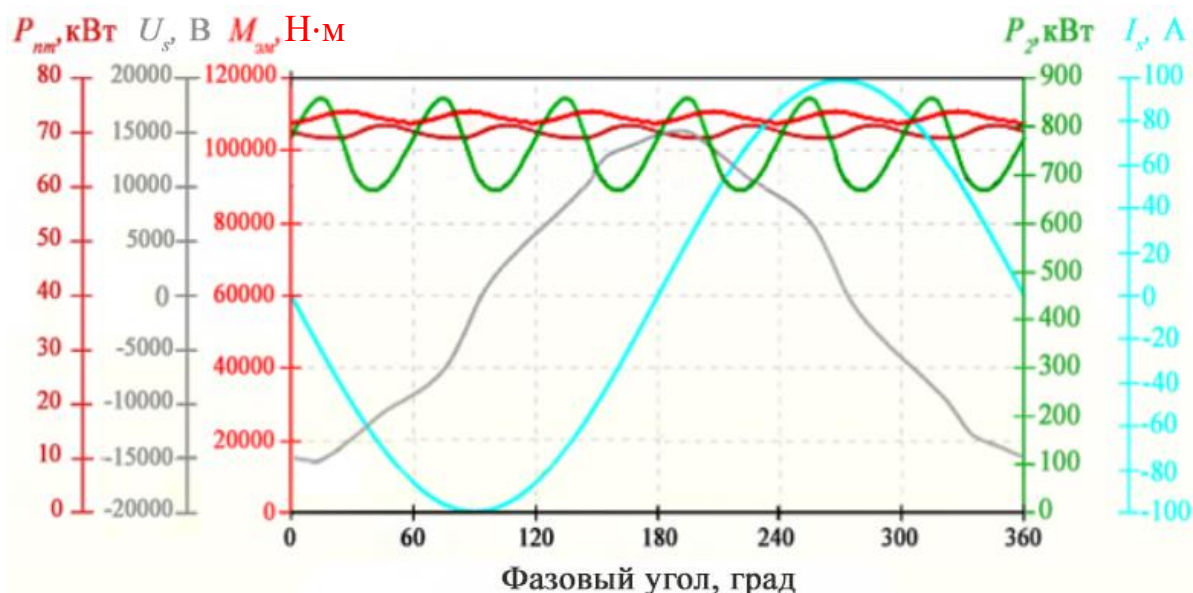


Рисунок 2.4 – Угловые характеристики СДПМ при номинальном токе статора и прямом запуске двигателя от сети

На рисунке 2.5 представлен график зависимости электромагнитного момента $M_{эм}$ от угла поворота ротора при номинальном токе статора и управлении от Н-моста с ШИМ, который используется в MotorSolve по умолчанию при моделировании электромагнитных процессов двигателя. Значение электромагнитного момента смещено из-за отсутствия начального угла ротора, дополнительный реактивный момент проявляется в виде 3-ей гармоники с увеличенной амплитудой.

На рисунке 2.6 представлен график зависимости зубцового момента M_z от положения ротора при управлении от встроенного в MotorSolve Н-моста с ШИМ. Как видно из графика, неравномерность магнитного поля в воздушном зазоре проявляется в виде пиков зубцового момента при повороте ротора на 30° и появлении высших гармоник электромагнитного момента из-за несинусоидальных ЭДС в обмотках статора.

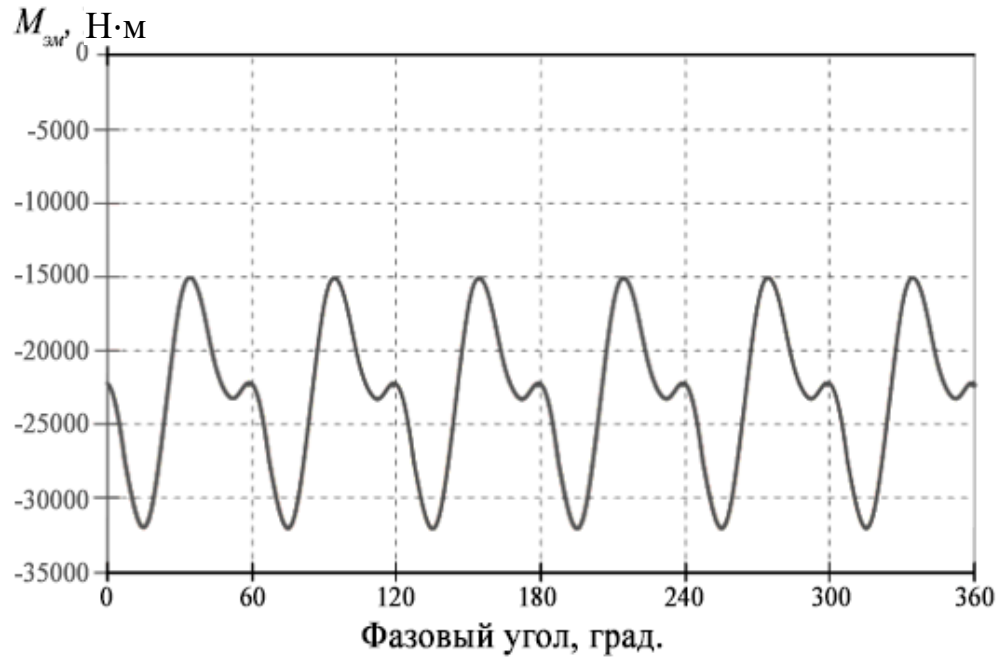


Рисунок 2.5 – Зависимость $M_{эм}$ от фазового угла при управлении от встроенного Н-моста с ШИМ

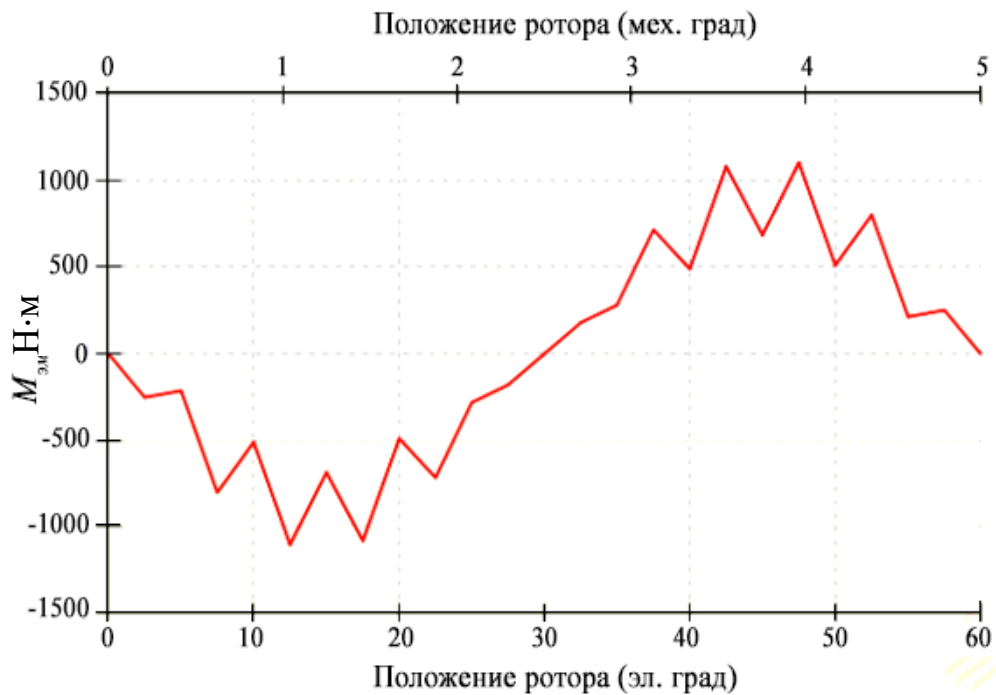


Рисунок 2.6 – Зависимость M_3 от положения ротора при управлении от встроенного Н-моста с ШИМ

Аналитический метод расчёта зубцового момента (2.6) единичного зубца основывается на методе суперпозиции. Для обнаружения высших гармоник,

искажающих форму электромагнитного момента, было произведено разложение зубцового момента тихоходного СДПМ в ряд Фурье графоаналитическим методом:

$$\begin{aligned}
 M_z = & 421,6 \sin(\omega t + 89,6^\circ) + 43,9 \sin(3\omega t + 23,5^\circ) + 66,9 \sin(5\omega t + 72,9^\circ) + \\
 & + 30,5 \sin(7\omega t - 74,7^\circ) + 60,5 \sin(9\omega t - 45,97^\circ) + 10,9 \sin(11\omega t + 19,3^\circ) + \\
 & + 16,8 \sin(13\omega t + 10,98^\circ) + 76,6 \sin(15\omega t - 23,3^\circ) + 36,4 \sin(17\omega t - 39,1^\circ).
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Исходя из гармонического состава на конечную форму зубцового момента тихоходного СДПМ существенно влияют 5-ая, 9-ая и 15-я гармоники. При математическом моделировании тихоходного СДПМ следует учитывать зубцовый момент, который искажает форму тока, вызывает пульсации момента и скорости, что может привести к трудностям при управлении двигателем.

Более подробно конструктивные параметры разработанного тихоходного СДПМ 690 кВт представлены в Приложении А.

2.3 Математическая модель тихоходного СДПМ

Математическая модель СДПМ без демпферной обмотки строится на основе теории обобщенной электрической машины со следующими допущениями:

- 1) Насыщение ферромагнитного материала не учитывается.
- 2) ЭДС в обмотках статора имеет синусоидальную форму.
- 3) Вихревые токи и потери на гистерезис пренебрежимо малы.
- 4) Динамика обмотки возбуждения отсутствует.

Поскольку магнитная проницаемость стали ротора гораздо выше, чем магнитная проницаемость постоянных магнитов, можно считать, что насыщение машины зависит только от ПМ. Насыщение магнитной цепи СДПМ практически не зависит от режима работы, магнитный поток машины является постоянным, и его конфигурация определяется воздушным зазором, вследствие чего можно пренебречь нелинейностью магнитной цепи, так как индуктивности статорных обмоток не зависят от величины и знака протекающего в них тока.

На рисунке 2.7 показана модель СДПМ в системе отсчета $d-q$. В каждый момент времени между углом между вращающейся d -осью ротора и неподвижной осью статора равен угловому положению ротора.

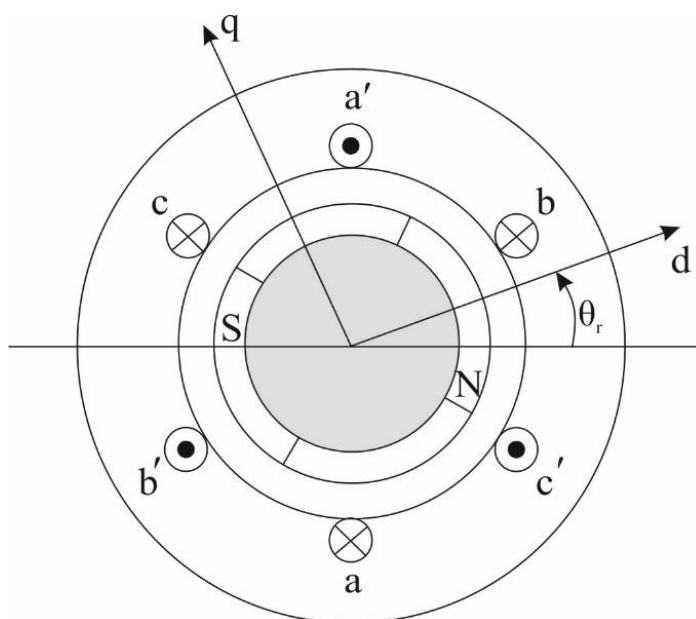


Рисунок 2.7 – Схема СДПМ в двухфазной системе $d-q$

Схема замещения СДПМ так же строится в системе координат $d-q$, связанных с вращающимся ротором. На рисунке 2.8 представлена эквивалентная схема замещения, аналогичная схемам замещения для машин с параллельным возбуждением. Постоянные магниты представляются в виде источника тока i_{PM} в цепи ротора, который создает потокосцепление рассеяния ψ_{PM} в воздушном зазоре.

Уравнения напряжения СДПМ в осях $d-q$ относительно ротора (2.7), полученные на основе уравнений для обобщенной электрической машины [8, 74]:

$$\begin{aligned} \overline{u}_{sd} &= R_s \overline{i}_{sd} - \frac{d\overline{\psi}_{sd}}{dt} = R_s \overline{i}_{sd} + L_{sd} \frac{d\overline{i}_{sd}}{dt} - \omega_{0el} L_{sq} \overline{i}_{sq}, \\ \overline{u}_{sq} &= R_s \overline{i}_{sq} - \frac{d\overline{\psi}_{sq}}{dt} = R_s \overline{i}_{sq} + L_{sq} \frac{d\overline{i}_{sq}}{dt} + \omega_{0el} L_{sd} \overline{i}_{sd} + \omega_{0el} \overline{\psi}_{PM}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где u_{sd}, u_{sq} – напряжения обмотки статора по осям $d-q$, В;

R_s – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

i_{sd}, i_{sq} – токи обмотки статора по осям $d-q$, А;

L_{sd}, L_{sq} – индуктивности обмотки статора по осям $d-q$, Гн;

ψ_{sd}, ψ_{sq} – потокосцепления рассеяния обмотки статора по осям $d-q$, Вб;

ω_{0el} – угловая скорость вращающегося магнитного поля, рад/с.

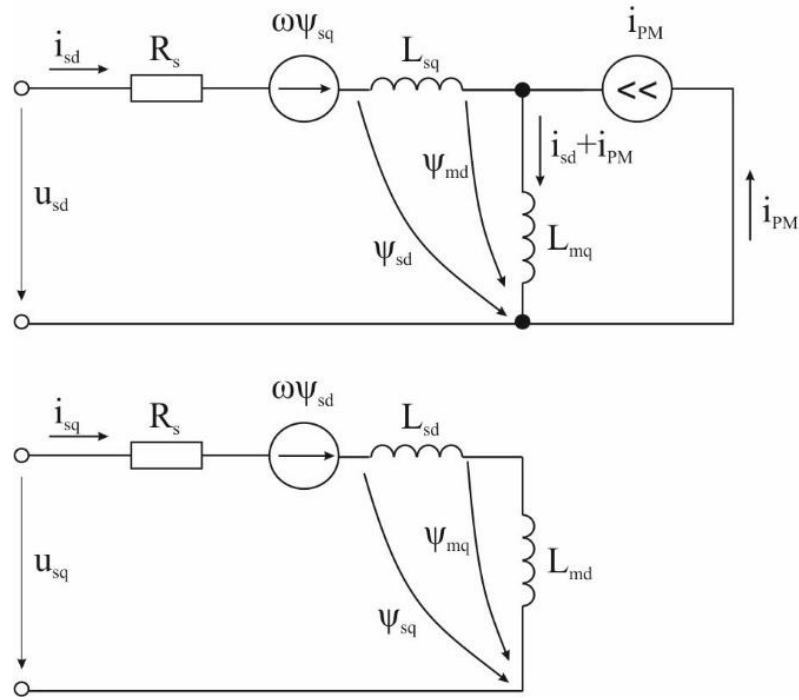


Рисунок 2.8 – Эквивалентная схема замещения СДПМ в осях d - q

Потокосцепления рассеяния обмотки статора и постоянных магнитов (2.8):

$$\begin{aligned} \overline{\psi_{sd}} &= L_{sd} \overline{i_{sd}} + L_{md} \overline{i_d} + \overline{\psi_{PM}}, & \overline{\psi_{sq}} &= L_{sq} \overline{i_{sq}} + L_{mq} \overline{i_q}, \\ \overline{\psi_d} &= L_{md} \overline{i_{sd}} + L_d \overline{i_d} + \overline{\psi_{PM}}, & \overline{\psi_q} &= L_{mq} \overline{i_{sq}} + L_q \overline{i_q}, & \overline{\psi_{PM}} &= L_{md} \overline{i_{PM}}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Из-за высокой магнитной индукции постоянных магнитов потокосцепление рассеяния ПМ ψ_{PM} , а также взаимные индуктивности L_{md} и L_{mq} можно считать постоянными. Векторная диаграмма для СДПМ в осях статора x - y и ротора d - q представлена на рисунке 2.9.

Уравнения для электромагнитного момента $M_{эм}$ и механической части СДПМ (2.9) строятся по аналогии с синхронными машинами с параллельным возбуждением:

$$\begin{aligned} M_{эм} &= \frac{3}{2} p_n \left[\overline{\psi_{PM} i_{sd}} + (L_{sd} - L_{sq}) \overline{i_{sd} i_{sq}} \right] + M_c, \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_{эм} - M_c, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где M_c – момент сопротивления на валу двигателя, Н·м.

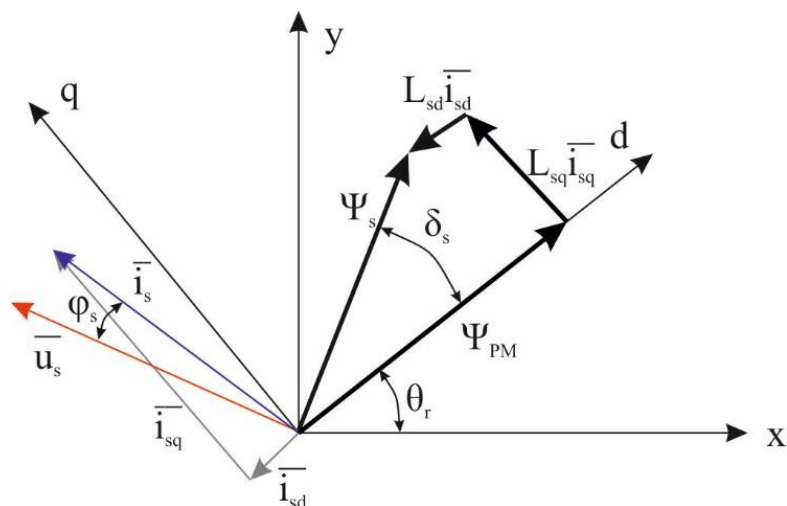


Рисунок 2.9 – Векторная диаграмма СДПМ статора x - y и ротора d - q

Электромагнитный момент $M_{эм}$ состоит из двух составляющих. Первая зависит от потокосцепления рассеяния ПМ и тока статора, направленного перпендикулярно потокосцеплению рассеяния ПМ. Вторая составляющая складывается из разности индуктивностей по осям d - q [16, 40, 74]. Для тихоходных СДПМ большой мощности дополнительно учитывается третья составляющая – зубцовый момент (2.6). На рисунке 2.10 показана структурная схема математической модели тихоходного СДПМ (2.7-2.8).

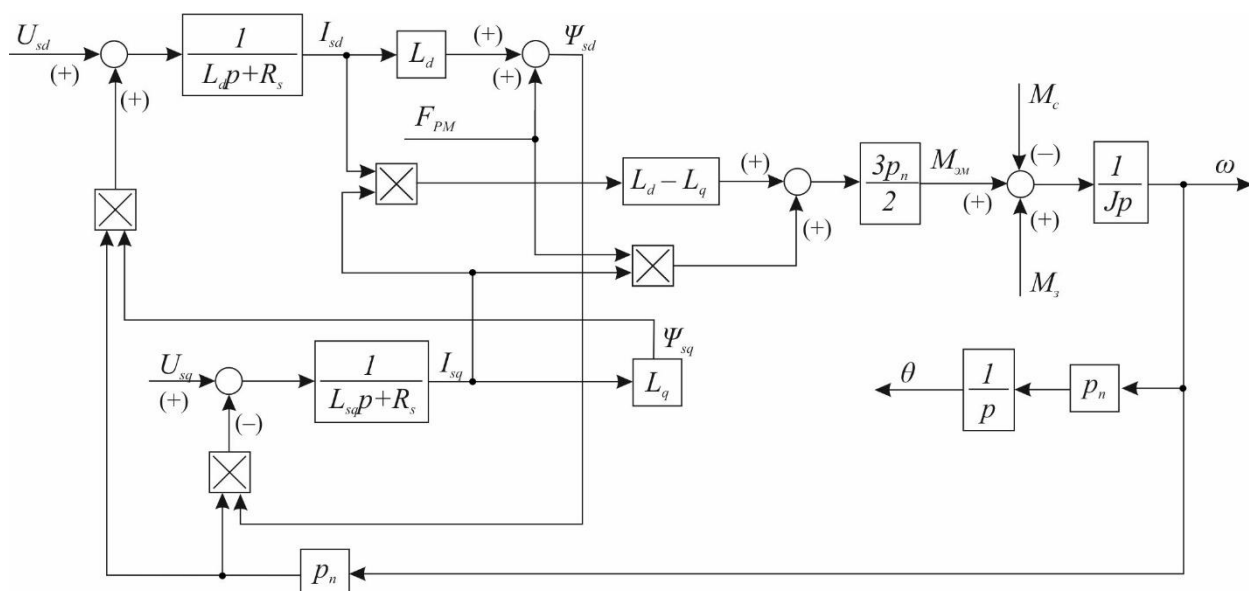


Рисунок 2.10 – Структурная схема математической модели СДПМ

На рисунке 2.11 представлены графики переходных процессов угловой частоты и электромагнитного момента, плавный пуск тихоходного СДПМ на

холостом ходу производился по закону скалярного управления, плавным наращиванием частоты в течение $t_{\text{пуск}} = 4$ с. Как видно из рисунка 2.11 при скалярном управлении возникают перепады скорости во время набора частоты, колебания скорости сохраняются на уровне 7-8% и усиливаются при выходе на постоянную частоту вращения, что связано со значительными пульсациями электромагнитного момента [119]. Необходимо разработать систему векторного управления, обеспечивающую допустимые пульсации момента в пределах 5-10%, в которой бы осуществилось плавное переключение скорости с минимальным перерегулированием.

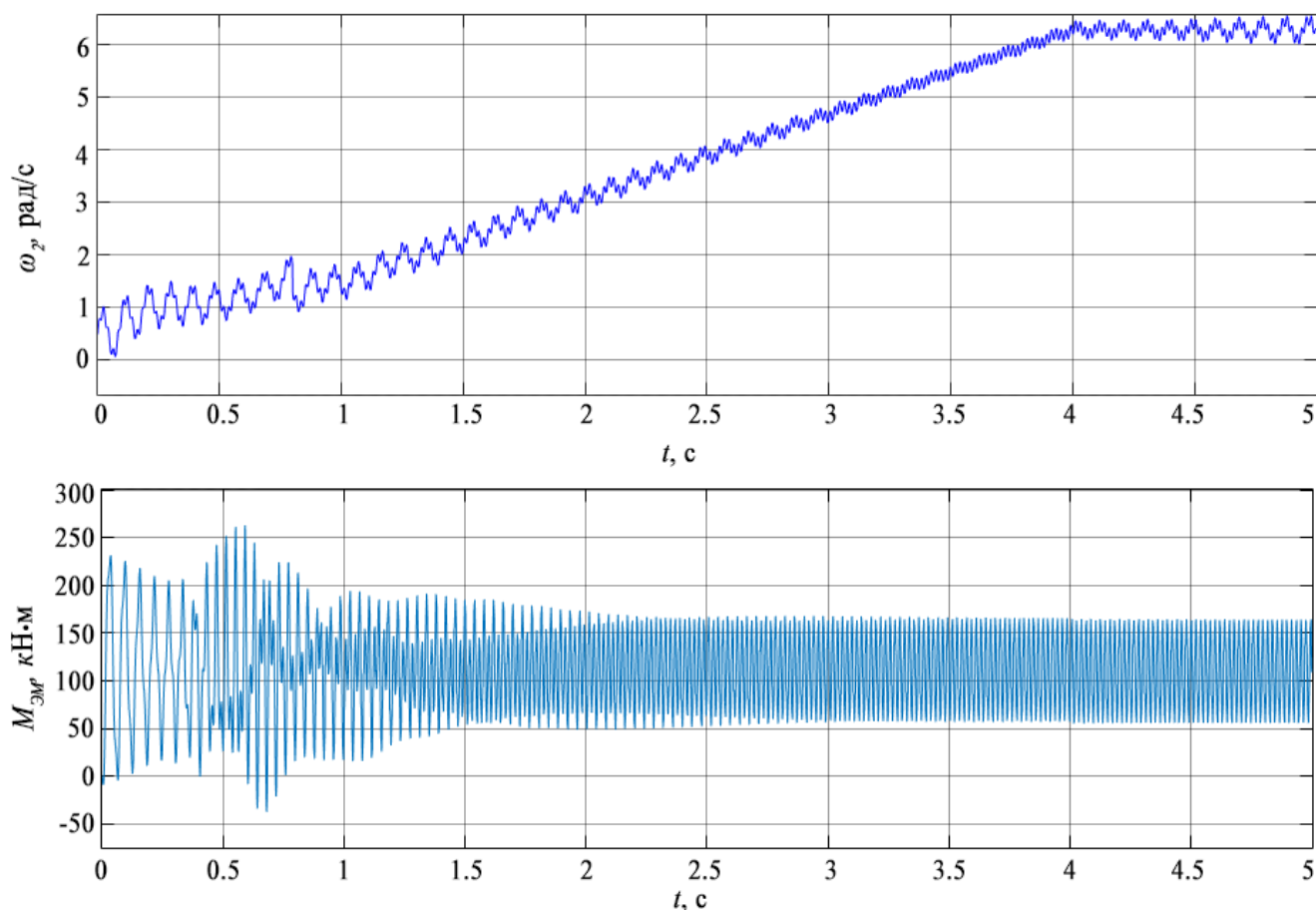


Рисунок 2.11 – Переходные процессы угловой скорости и электромагнитного момента при запуске тихоходного СДПМ

2.4 Выводы и результаты по главе 2

В ходе анализа выявлено, что готовые решения о конструкции и характеристиках тихоходных СДПМ средней и высокой мощности, подходящих

для использования внутри безредукторного мотор-барабана, в открытом доступе отсутствуют.

В данной главе получены параметры тихоходного СДПМ на основе заданных параметров привода ленточного конвейера с шахты ООО «Талдинская-Кыргайская». При выборе конструкции учитывались различные способы компенсации зубцового момента, появляющегося вследствие большой намагниченности материала зубцовой зоны статора. Был произведен предварительный расчет основных размеров статора. Компьютерное моделирование тихоходного СДПМ осуществлялось с помощью метода конечных элементов в программе MotorSolve Infolytica. Выходные параметры разработанного тихоходного СДПМ соответствуют заданным значения по скорости, мощности и электромагнитному моменту при заданных габаритах, КПД двигателя составляет 93,8% при номинальной мощности 690 кВт. Данная конструкция обладает большим потенциалом для совершенствования, что может являться предметом дальнейших исследований. Она может быть оптимизирована, например, с целью повышения коэффициента мощности, однако в рамках поставленной цели диссертационного исследования параметры разработанной конструкции являются удовлетворительными и достаточными.

На основе полученных характеристик было получено уравнение зубцового момента графоаналитическим методом, который дополнительно учитывается в математической модели тихоходного СДПМ. Промоделирован плавный пуск по законам скалярного управления. Анализируя графики угловой скорости и электромагнитного момента можно сделать вывод, что вследствие большой массы и большого числа высших гармоник ЭДС, наводящихся в зубцовой зоне, при разомкнутом управлении СДПМ без регулирования возникают перепады скорости недопустимой величины, а пульсации электромагнитного момента достигают 45%, при допустимом значении – 5% [3]. Для устойчивого управления и во избежание возникновения упругих ударов в ленте необходимо разработать систему векторного управления с контурами регулирования скорости и электромагнитного момента, обеспечивающую необходимые выходные параметры и с показателями

качества, удовлетворяющими требованиям, предъявляемым к системам управления электроприводом шахтного ленточного конвейера.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕЗРЕДУКТОРНЫМ СИНХРОННЫМ МОТОР-БАРАБАНОМ

В соответствии с требованиями [2, 3] система управления безредукторным синхронным мотор-барабаном (БСМБ) ленточного конвейера должна выполнять следующие действия:

1. Плавный пуск и плавный останов конвейера с контролем времени.
2. Реверс приводного барабана и запуск конвейера в противоположном направлении для устранения блокировки на ленте.
3. Регулирование скорости конвейера в зависимости от величины грузопотока.
4. Автоматическая защита и останов при нарушении режима работы ленты.

Блок-схема системы управления безредукторным синхронным мотор-барабаном показана на рисунке 3.1.

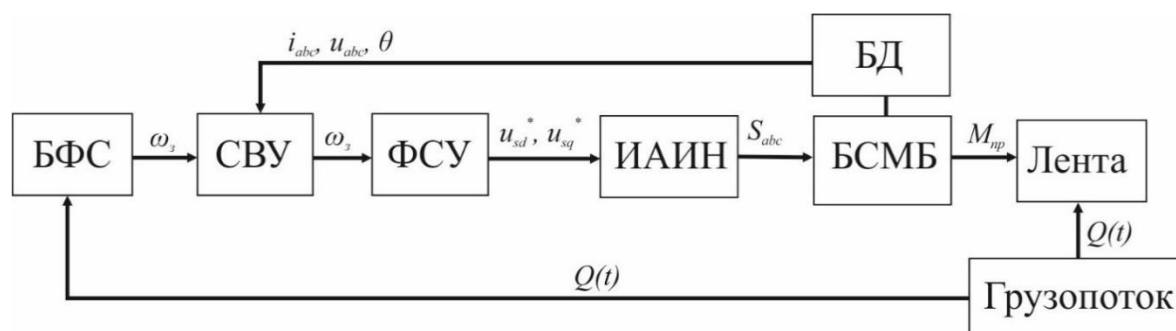


Рисунок 3.1 – Блок-схема системы управления БСМБ

На схеме приняты следующие обозначения:

БФС — блок формирования скорости мотор-барабана;

СВУ — система векторного управления мотор-барабаном;

ФСУ — формирователь сигнала управления;

ИАИН — инвертор с автономным источником постоянного напряжения;

БСМБ – безредукторный синхронный мотор-барабан;

БД – блок датчиков.

БФС формирует задание скорости для СДПМ в зависимости от загруженности ленты и режима работы конвейера. Формирование сигналов

управления ключами инвертора с автономным источником напряжения производится посредством пространственно-векторной модуляции, ШИМ-модуляции или таблицы переключений. Выбор ФСУ зависит от метода векторного управления.

3.1 Полеориентированное управление безредукторным синхронным мотор-барабаном

При полеориентированном управлении СДПМ управляется посредством ориентированной в пространстве МДС статора и вектора тока в функции потокосцепления ротора. С помощью информации о положении ротора, поступающей с датчика положения ротора, вычисляют трехфазные токи i_{abc} и рассчитывают двухфазные токи i_d и i_q [110]. Постоянство этих токов схоже с постоянством токов якоря и обмотки возбуждения в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением. Ток по оси q полностью эквивалентен току якоря; ток по оси d — току возбуждения, но частично, другая его часть формируется за счет поля постоянных магнитов — эквивалентного источника тока. По этой причине ток по оси q называется током статора, создающим электромагнитный момент, а ток по оси d — током статора, создающим потокосцепление [5, 25].

На рисунке 3.2 показана принципиальная схема ПОУ-ШИМ с датчиком положения ротора. Формирование сигналов управления S_{abc} осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции, т.е. регулирования ширины импульса при постоянстве частоты следования и амплитуды импульса для создания синусоидального сигнала. Для управления тихоходным СДПМ 690 кВт был выбран трехфазный многоуровневый инвертор (МУИ) с 5-ю уровнями, каждый из которых состоит из трех одноименных фазам ячеек (мостовых IGBT-инверторов), разработанный сотрудниками кафедры электропривода и автоматизации КузГТУ (г. Кемерово) [44].

Сигналы управления в МУИ формируются при сравнении несущих и модулирующего сигналов. Несущими являются высокочастотные (4 кГц), треугольной формы сигналы, при этом для управления левыми и правыми группа-

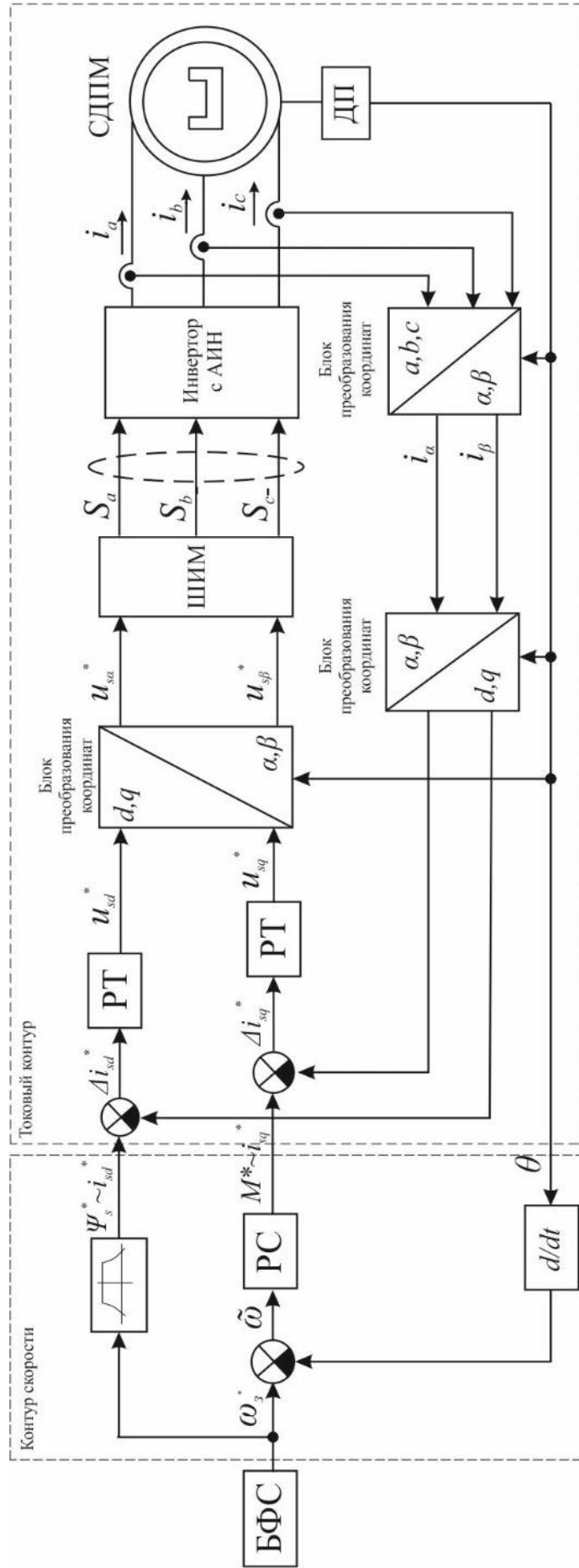


Рисунок 3.2 – Структурная схема датчикового ПДУ-ШИМ

ми ключей используются треугольные сигналы, сдвинутые друг относительно друга на 180 градусов. Пятиуровневая схема преобразователя (рисунок 3.3) обладает наименьшим коэффициентом нелинейных искажений напряжения – 6,86%, двухуровневая схема – 26,97%, одноуровневая – 52,32% [44]. Таким образом, мы можем с допустимой погрешностью считать сигнал на выходе преобразователя частоты синусоидальным.

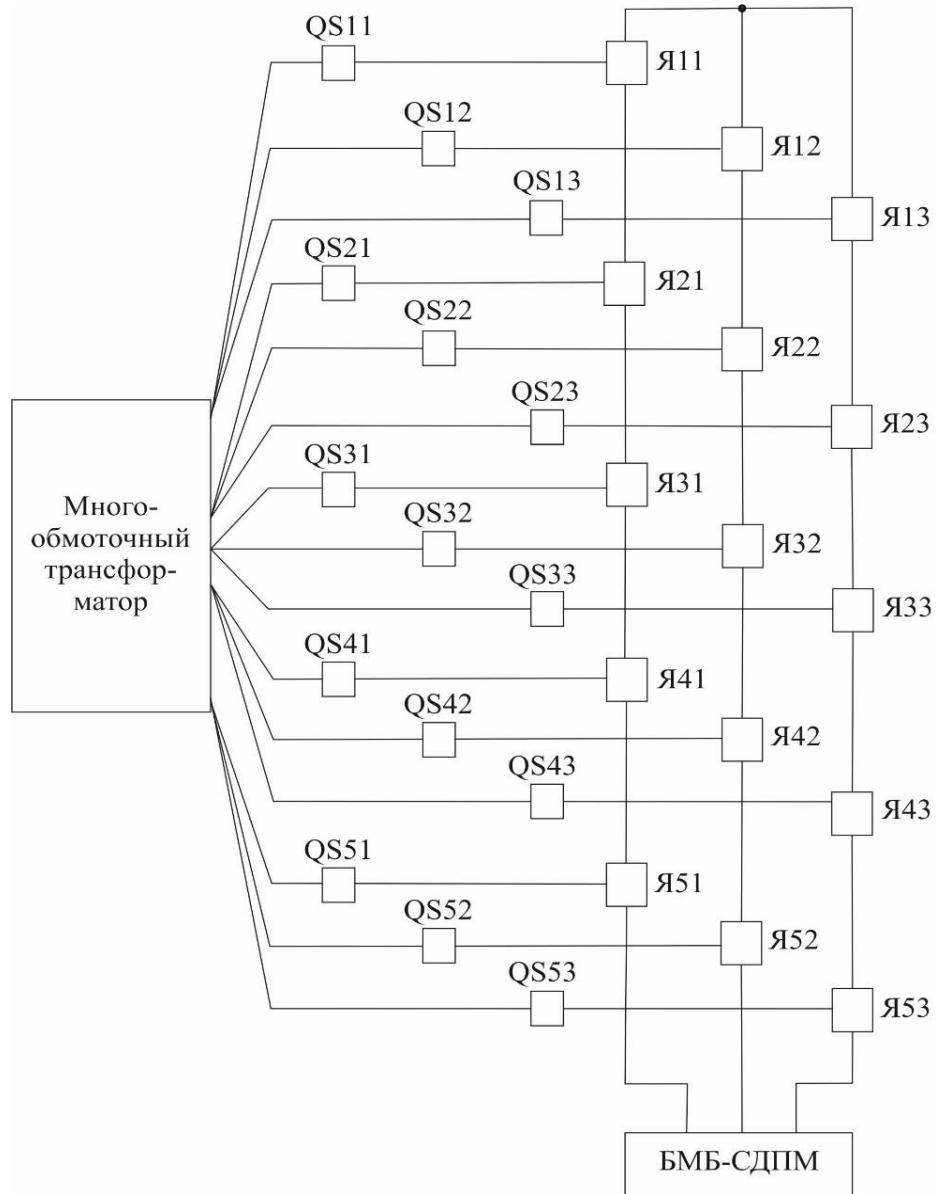


Рисунок 3.3 – Схема трехфазного преобразователя с пятиуровневым инвертором

Схема ячейки трехфазного преобразователя с пятиуровневым инвертором показана на рисунке 3.4.

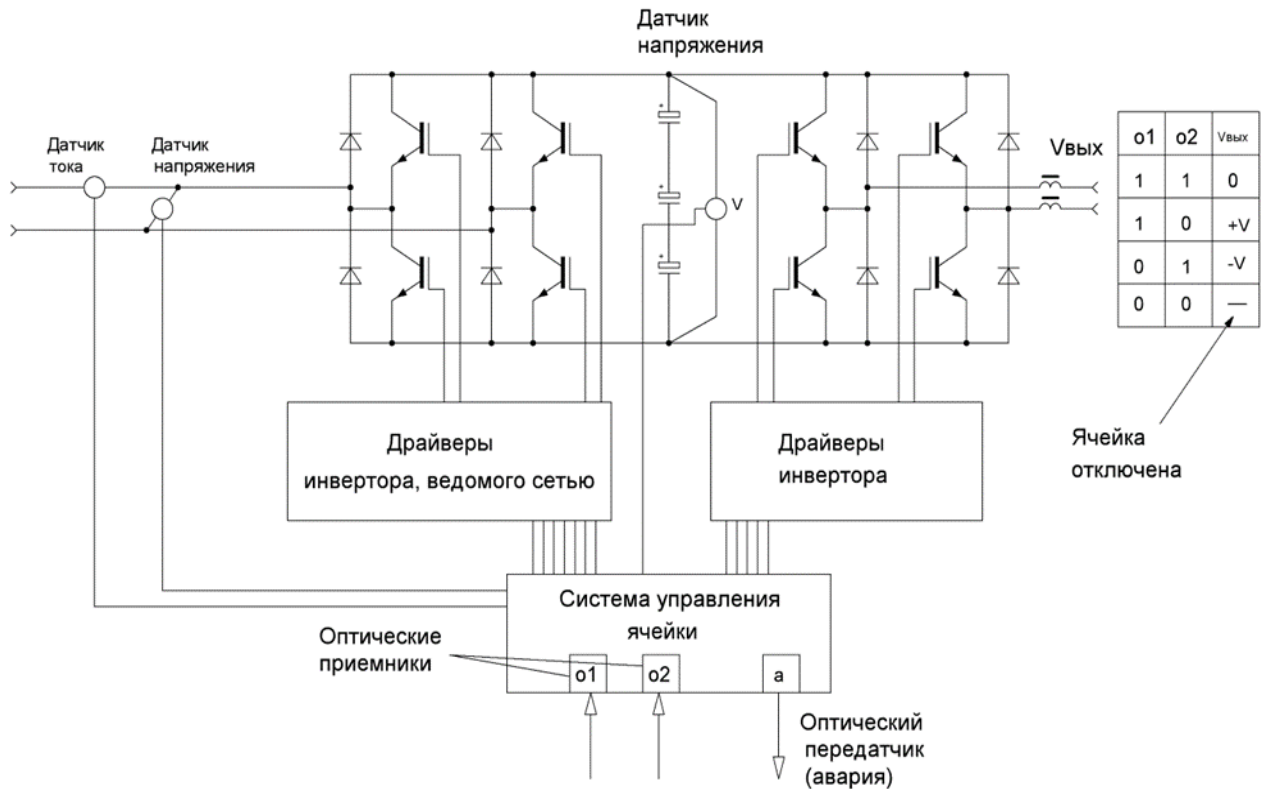


Рисунок 3.4 – Схема ячейки трехфазного преобразователя с пятиуровневым инвертором

Управление по схеме ПОУ-ШИМ производится через контуры регулирования токов статора и контур регулирования скорости. Преобразование координат abc - $\alpha\beta$ производится по уравнениям Кларк (3.1):

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Уравнения прямого преобразования Кларк из подвижной системы координат ротора d - q к неподвижной системе координат статора α - β (3.2):

$$\begin{aligned} u_\alpha &= u_d \cos(\theta_r) - u_q \sin(\theta_r), \\ u_\beta &= u_d \sin(\theta_r) + u_q \cos(\theta_r). \end{aligned} \quad (3.2)$$

Уравнения обратного преобразования Кларк из неподвижной системы координат статора α - β к подвижной системе координат ротора d - q (3.3):

$$\begin{aligned} u_d &= u_\alpha \cos(\theta_r) + u_\beta \sin(\theta_r), \\ u_q &= -u_\alpha \sin(\theta_r) + u_\beta \cos(\theta_r). \end{aligned} \quad (3.3)$$

На рисунке 3.5 показана векторная диаграмма полеориентированного управления СДПМ, построенная по уравнениям (2.6-2.7).

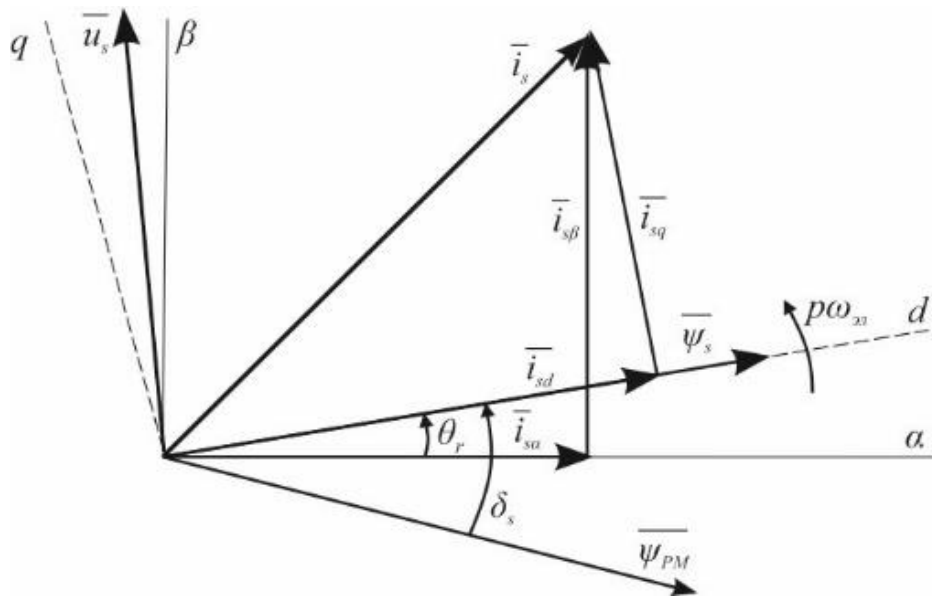


Рисунок 3.5 – Векторная диаграмма для установившегося состояния СДПМ при полеориентированном управлении

Передаточные функции контуров тока по осям d - q (3.4) рассчитываются как отношение выходного сигнала к входному из уравнений (2.6):

$$\begin{aligned} W_{i_d}(p) &= \frac{i_d(p)}{u_d(p)} = \frac{1}{L_d p + R_s} = \frac{1/R_s}{T_d p + 1}, \\ W_{i_q}(p) &= \frac{i_q(p)}{u_q(p)} = \frac{1}{L_q p + R_s} = \frac{1/R_s}{T_q p + 1}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где $T_d = L_d/R_s = 0,243$ с, $T_q = L_q/R_s = 0,21$ с – постоянные времени контуров тока по осям d - q соответственно.

Как видно из (3.4), электромагнитная часть СДПМ представляется в виде апериодического звена первого порядка.

Токи статора имеют несинусоидальное распределение, а высокая частота ШИМ способствует зашумлению тока на входе регулятора. Требуется, чтобы регулятор тока имел дифференциальную составляющую для прогнозирования отклонения от задания и увеличения быстродействия контура.

Произведем аналитический расчет коэффициентов регуляторов и их настройку на технический оптимум стандартным образом для режима холостого хода [53, 66].

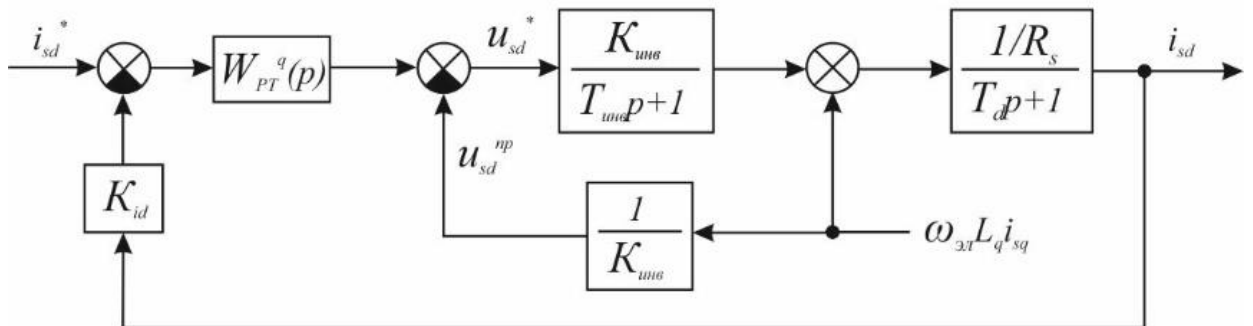


Рисунок 3.6 – Контур регулирования тока i_{sd}

Контур регулирования тока статора по оси d (рисунок 3.6) содержит передаточные функции инвертора с ШИМ, обмотки статора с выходом тока i_{sd} , отрицательную обратную связь по току с коэффициентом компенсации отклонения K_{id} и регулятор тока. Также присутствует контур компенсации нелинейных перекрестных связей, сигнал которого по (3.5) равен

$$u_{sd}^{np} = \frac{\omega_{эл} L_q i_{sq}}{K_{инв}}, \quad (3.5)$$

где $K_{инв}$ – коэффициент усиления инвертора.

Передаточная функция контура регулирования тока i_{sd} при работе на холостом ходу и с учетом компенсации перекрестных связей (3.6):

$$W_{id}^o(p) = \frac{W_{PT}^d(p) K_{инв} R_s^{-1} K_{id}}{(T_{инв} p + 1)(T_d p + 1)}, \quad (3.6)$$

Постоянную времени T_μ можно приравнять к малой постоянной времени инвертора $T_\mu = T_{инв} = 0,0005$ с. Передаточная функция регулятора тока при настройке на симметричный оптимум:

Постоянную времени T_μ можно приравнять к малой постоянной времени инвертора $T_\mu = T_{инв} = 0,0005$ с. Передаточная функция регулятора тока при настройке на симметричный оптимум (3.7):

$$W_{PT}^d(p) = \frac{(4T_\mu p + 1)(T_d p + 1)}{8K_{инв} R_S^{-1} K_{id} T_\mu p} \quad (3.7)$$

Передаточная функция регулятора тока после преобразований (3.8):

$$W_{PT}^d(p) = \frac{4T_\mu + T_d}{8K_{инв} R_S^{-1} K_{id} T_\mu} + \frac{T_d p}{2K_{инв} R_S^{-1} K_{id}} + \frac{1}{8K_{инв} R_S^{-1} K_{id} T_\mu p} \quad (3.8)$$

При настройке контура на симметричный оптимум получаем ПИД-регулятор со значениями коэффициентов $k_{sd}^p = 0,22$, $k_{sd}^I = 0,36$, $k_{sd}^D = 0,0015$.

Передаточная функция замкнутого контура тока по оси d (3.9):

$$W_{PT}^z(p) = \frac{K_{id}^{-1}}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} \quad (3.9)$$

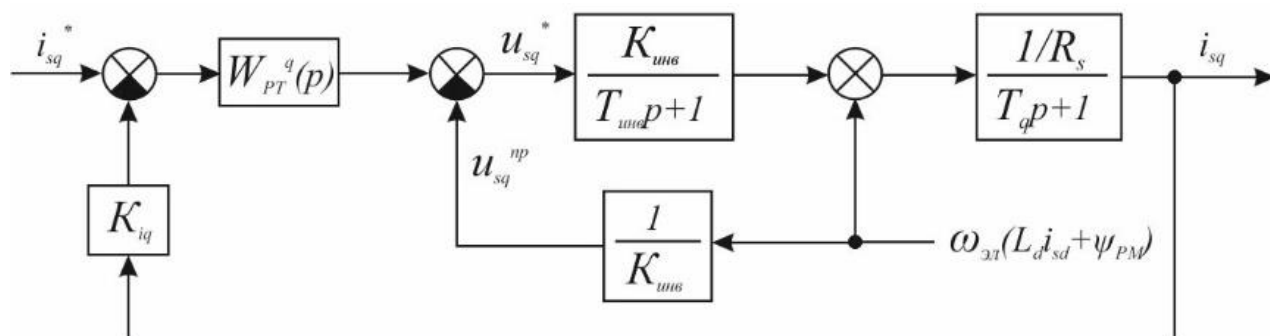


Рисунок 3.7 – Контур регулирования тока i_{sq}

Контур регулирования тока статора по оси q (рисунок 3.7) строится по аналогии с контуром тока по оси d , сигнал контура компенсации нелинейного возмущения рассчитывается по (3.10):

$$u_{sq}^{np} = \frac{\omega_{эл} (L_d i_{sd} + \psi_{PM})}{K_{инв}}. \quad (3.10)$$

Передаточная функция контура регулирования тока i_{sq} при учёте компенсации нелинейных перекрёстных связей получается по аналогии с (3.7). При настройке на симметричный оптимум получаем передаточную функцию ПИД-регулятора тока i_{sq} (3.11):

$$W_{PT}^q(p) = \frac{4T_\mu + T_q}{8K_{инв} R_S^{-1} K_{iq} T_\mu} + \frac{T_q p}{2K_{инв} R_S^{-1} K_{iq}} + \frac{1}{8K_{инв} R_S^{-1} K_{iq} T_\mu p}. \quad (3.11)$$

Значения коэффициентов $k_{sd}^p = 0,2$, $k_{sd}^I = 0,34$, $k_{sd}^D = 0,0015$.

Схема контура регулирования скорости показана на рисунке 3.8.

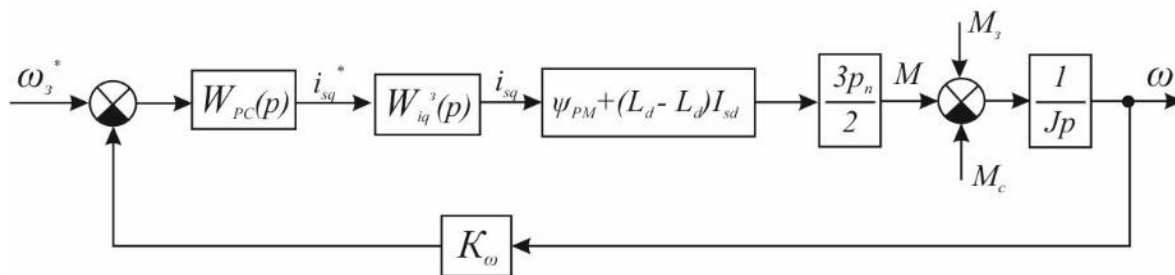


Рисунок 3.8 – Контур регулирования скорости

Передаточная функция контура регулирования скорости (3.12):

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{iq} J p}{6K_\omega p_n W_M(p)} + \frac{K_{iq} J}{6T_\mu K_\omega p_n W_M(p)} + \frac{K_{iq} J}{12T_\mu^2 K_\omega p_n W_M(p) p}. \quad (3.12)$$

Поскольку в математической модели системы управления тихоходный СДПМ является непрерывным нелинейным элементом, а трехфазный преобразователь частоты — нелинейным дискретным элементом, это обуславливает отклонения показателей качества системы управления от заложенных при аналитическом расчете коэффициентов регуляторов. Дополнительная корректировка регуляторов осуществлялась методом минимизации целевой функции с помощью инструментов Matlab. Конечные значения коэффициентов ПИД-регулятора угловой скорости $k_\omega^p = 95$, $k_\omega^I = 2381$, $k_\omega^D = 1,039$.

На рисунках 3.9-3.10 показаны графики переходных процессов угловой скорости, электромагнитного момента и токов СДПМ 690 кВт при частоте модуляции 4 кГц. Пуск производился в течение 3-х секунд на холостом ходу.

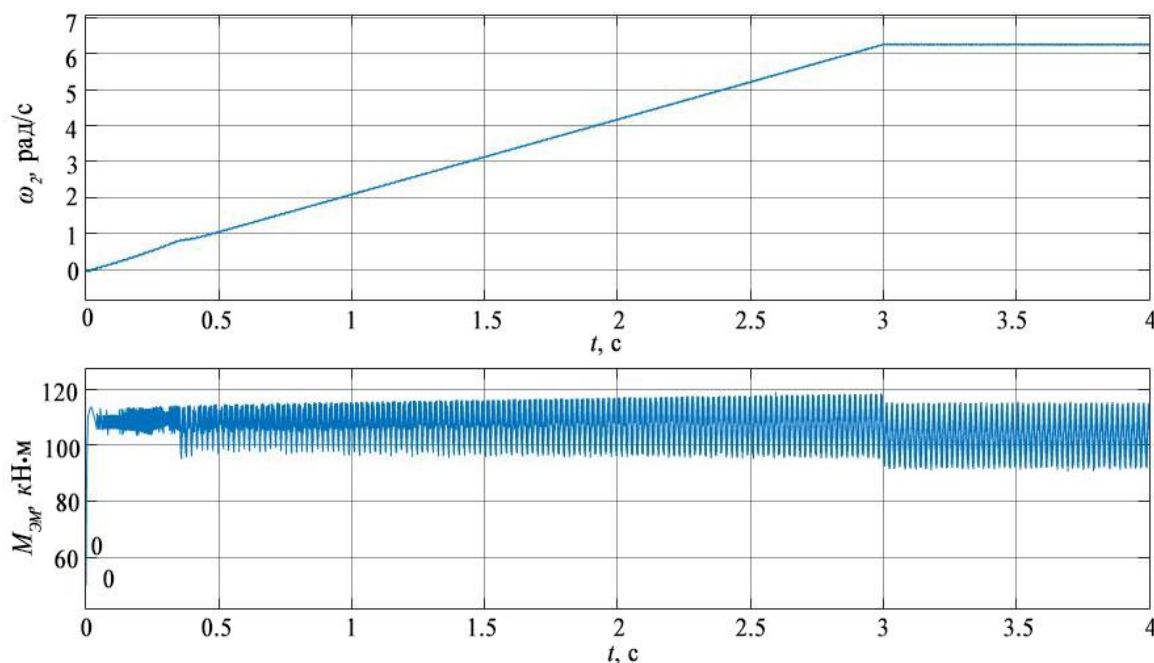


Рисунок 3.9 – Переходные процессы $\omega_{эл}$ и $M_{эл}$ при плавном пуске тихоходного СДПМ при ПОУ-ШИМ

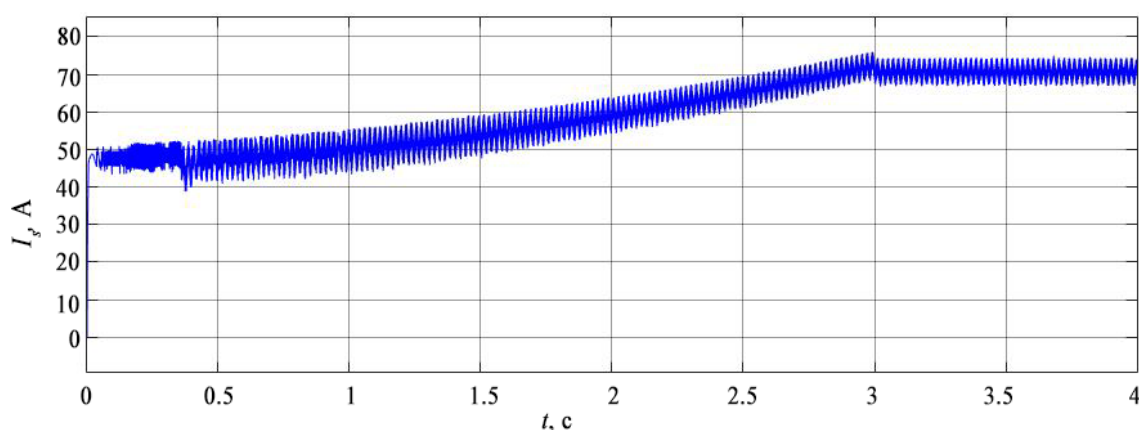


Рисунок 3.10 – Переходные процессы тока статора при плавном пуске тихоходного СДПМ при ПОУ-ШИМ

При управлении ПОУ-ШИМ скорость увеличивается линейно в соответствии с заданием, колебания существенно снизились, перерегулирование отсутствует. При косвенном регулировании электромагнитного момента через составляющую

тока статора наблюдаются значительные пульсации момента 25% от действующего значения $M_{эл}$ при пульсациях тока статора до 15%, что является недопустимым при управлении электроприводом ленточного конвейера. Из-за пульсаций, вносимых зубцовым моментом, требуется регулировать электромагнитный момент напрямую [57].

3.2 Прямое управление моментом синхронного безредукторного мотор-барабана

Принцип прямого управления моментом двигателя заключается в выборе вектора напряжения для одновременного управления моментом и потокосцеплением статора. Измеренные токи статора и напряжения инвертора используются для оценки потокосцепления и момента. Оцененные значения потокосцепления статора $\hat{\psi}_s$ и момента \hat{M} сравниваются с управляющими сигналами потокосцепления статора ψ_s^* и момента двигателя M^* с помощью компаратора. Блок задания скорости определяет заданную скорость в зависимости от грузопотока и режима работы конвейера [46, 115].

Схема прямого управления с пространственно-векторной модуляцией безредукторным синхронным мотор-барабаном показана на рисунке 3.11. Для подачи импульсов необходимой величины используется пространственно-векторная модуляция, основанная на ШИМ-модуляции вместо таблицы переключений используется ШИМ, гистерезисные компараторы заменяются ПИ-регуляторами по аналогии со схемой ПОУ (рисунок 3.2). Так как момент и потокосцепление управляются напрямую в замкнутом контуре, необходима точная оценка потока и момента двигателя [79]. При отсутствии гистерезисных компараторов ПУМ-ПВМ работает на постоянной частоте переключения, что значительно уменьшает пульсации момента и тока, позволяет уверенно работать на низких скоростях, однако динамические характеристики электропривода снижаются.

При ПВМ с ШИМ трехфазное напряжение, создающее вращающееся магнитное поле в воздушном зазоре СДПМ, может быть представлено как единст-

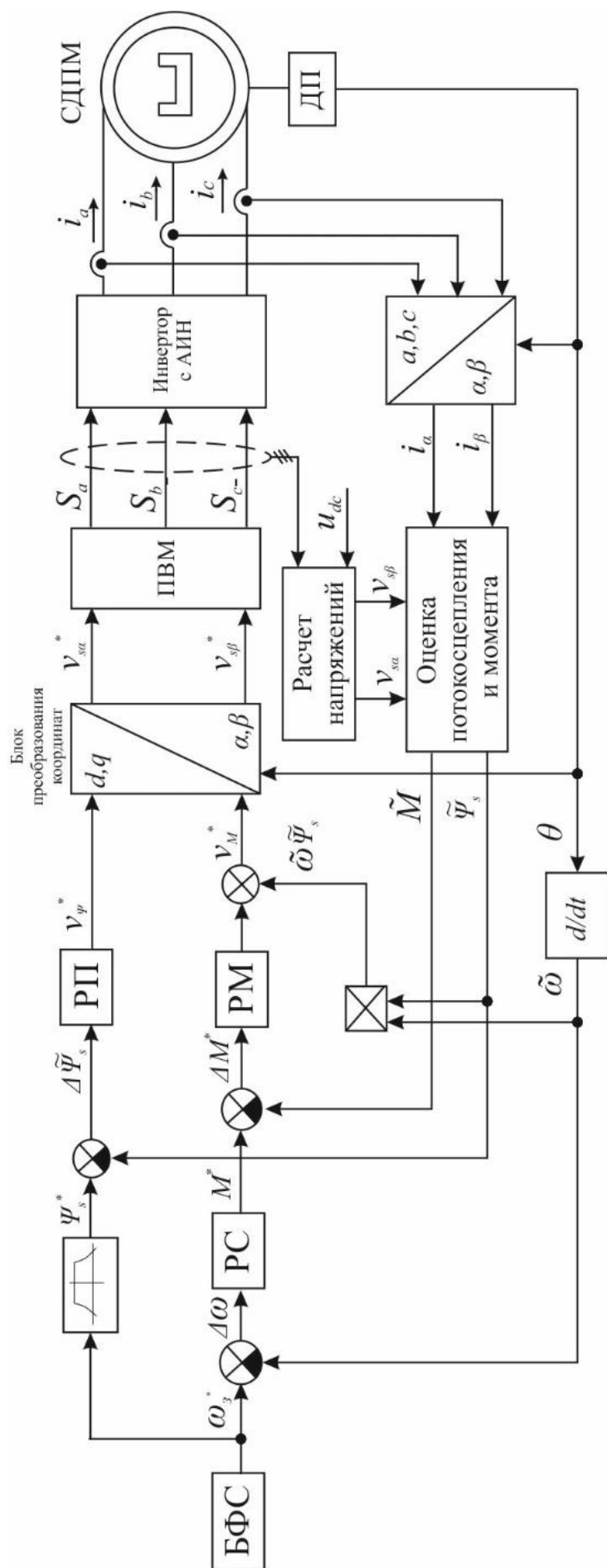


Рисунок 3.11 – Структурная схема датчикового ПУМ-ПВМ

венный вращающийся вектор напряжения. Величину и угол поворота вектора напряжения определяют с помощью преобразования (3.1). В результате имеются шесть ненулевых векторов (V1-V6) и два нулевых вектора (V0 и V7). Векторы V1-V6 формируют оси шестиугольника, как показано на рисунке 3.12, и подают питание на нагрузку [100, 126]. Векторы V0 и V7 находятся в начале координат и подают нулевое напряжение на нагрузку. Пространственные векторы V0-V7 формируют на d - q плоскости требуемый вектор опорного напряжения v_{ref} (3.13-3.14).

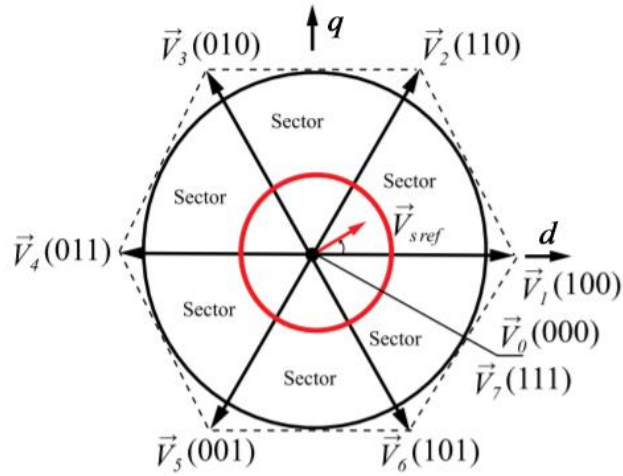


Рисунок 3.12 – Диаграмма пространственного вектора напряжения

Цель метода ПВМ состоит в аппроксимации вектора опорного напряжения $v_{ref} = [V_{ref}, \varphi_{ref}]$ с использованием восьми моделей переключения и управления коммутационными состояниями инвертора S_a, S_b, S_c (3.13-3.14):

$$v_{ref} = \sqrt{v_{sd_ref}^2 + v_{sq_ref}^2}, \quad \varphi_{ref} = \arctg \frac{v_{sq_ref}}{v_{sd_ref}}, \quad (3.13)$$

$$v_{sd_ref} = \frac{\psi_{sref} \cos(\gamma_s + \Delta\delta) - \psi_{sref} \cos(\gamma_s)}{T_s} + R_S i_{sd}, \quad (3.14)$$

$$v_{sq_ref} = \frac{\psi_{sref} \cos(\gamma_s + \Delta\delta) - \psi_{sref} \cos(\gamma_s)}{T_s} + R_S i_{sq},$$

где $\Delta\delta$ – угол между потокоцеплениями статора и ротора, γ_s – положение ротора, T_s – период квантования.

Компьютерная модель, реализующая ПВМ-ШИМ, показана на рисунках 3.13 – 3.14.

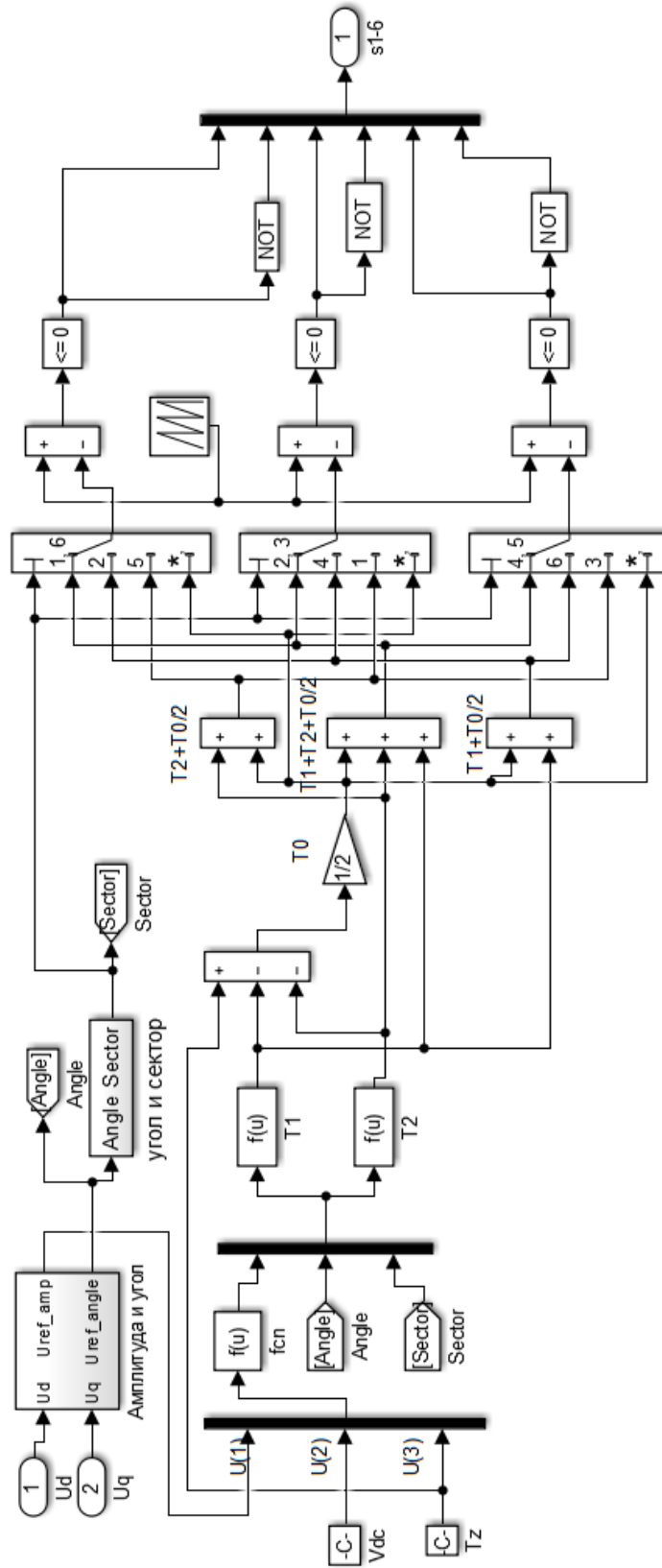


Рисунок 3.13 – Блок пространственно-векторной модуляции с ШИМ в Simulink

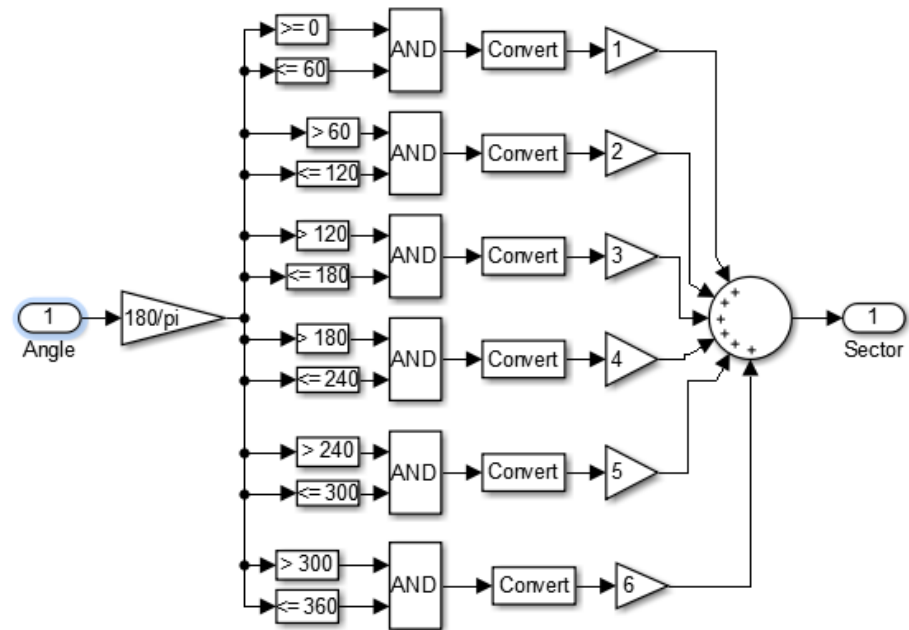


Рисунок 3.14 – Блок формирования сектора на $d-q$ плоскости в Simulink

Управление по схеме ПУМ-ПВМ производится через контуры регулирования потокосцепления статора, момента и контура регулирования скорости. Принципиальная схема блока оценивания момента и потокосцепления статора показана на рисунке 3.15.

Поскольку аналитический расчет регуляторов скорости, потокосцепления и электромагнитного момента в системе векторного управления не может быть произведен без ряда допущений, настройка регуляторов производилась методом оптимизации целевой функции средствами Matlab.

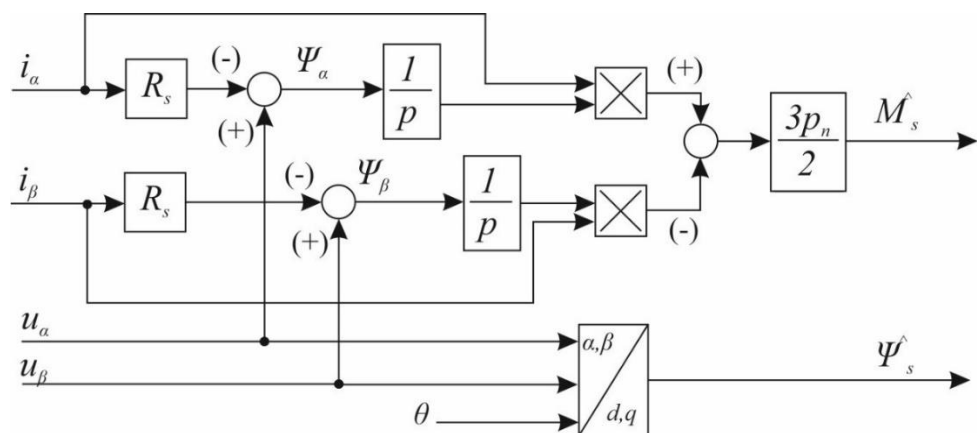


Рисунок 3.15 – Структурная схема блока оценивания момента и потокосцепления статора

Результаты моделирования плавного пуска безредукторного синхронного мотор-барабана при прямом управлении моментом с ПВМ-ШИМ показаны на рисунках 3.16-3.17. Время пуска 4 секунды, частота модуляции 4 кГц. При прямом регулировании момента амплитуда пульсаций снизилась до допустимых 5-7% от действующего значения, время регулирования $t_p = 0,55$ с.

Угловая скорость возрастает линейно в соответствии с заданием, однако при запуске наблюдаются небольшие колебания, перерегулирование $y = 3,5\%$, длительность переходного процесса 0,25 с. Как видно из рисунка 3.16, в начальный момент времени возникает скачок момента амплитудой 160 кН·м, однако, с учетом инерционности и демпфирующих способностей механической системы конвейера, показатели качества системы управления ПУМ-ПВМ удовлетворяют требованиям, предъявляемым к системам управления электроприводами ленточных конвейеров [65, 118].

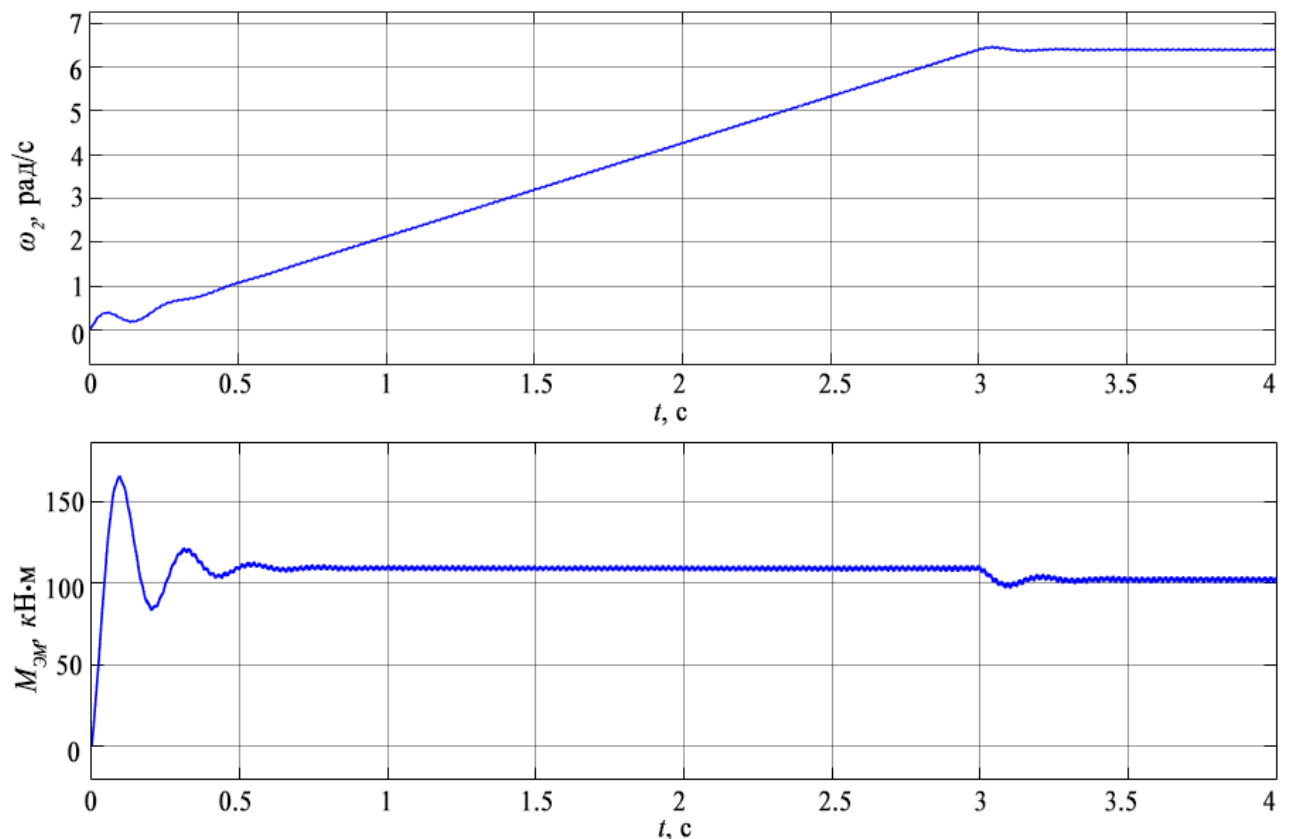


Рисунок 3.16 – Переходные процессы $\omega_{эл}$ и $M_{эл}$ при плавном пуске тихоходного СДПМ при ПУМ-ПВМ

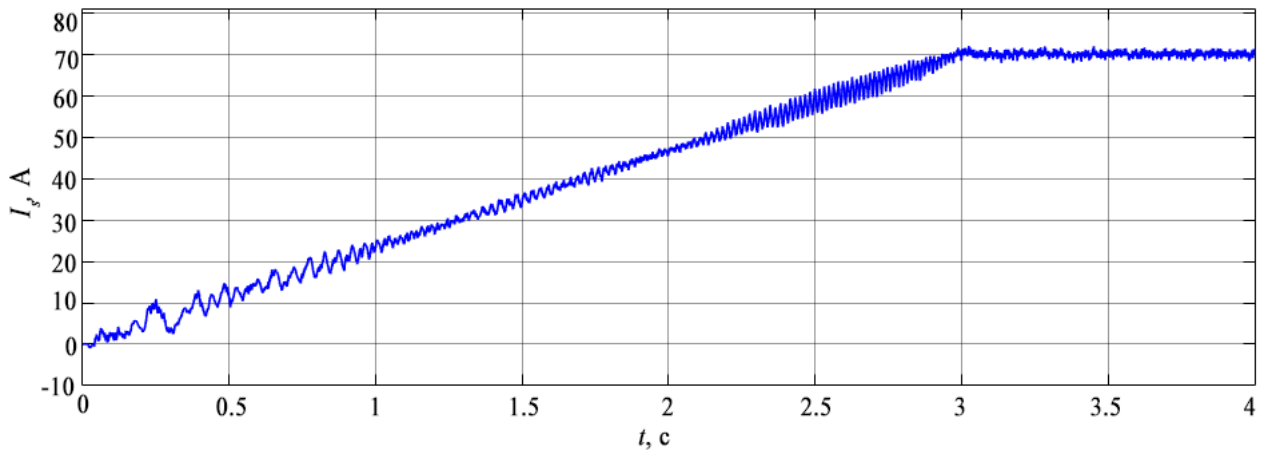


Рисунок 3.17 – Переходные процессы тока статора при плавном пуске тихоходного СДПМ при ПУМ-ПВМ

3.3 Выводы и результаты по главе 3

В данной главе разработана система векторного управления тихоходным СДПМ. В качестве преобразователя частоты выбран трехфазный преобразователь с многоуровневым инвертором, конструкция которого позволяет решать задачу преобразования частоты с IGBT-транзисторами меньших номинальных параметров при малом коэффициенте нелинейных искажений напряжения.

Было произведено моделирование систем векторного управления тихоходным СДПМ по двум векторным принципам: полеориентированное управление с ШИМ-модуляцией и прямое управление моментом с пространственно-векторной модуляцией на основе ШИМ. По результатам моделирования плавного пуска тихоходного СДПМ показатели переходного процесса для угловой скорости $\omega_{эл}$ в системе ПОУ-ШИМ лучше, чем в системе ПУМ-ПВМ, где присутствует перерегулирование 3,5%. Но при косвенном регулировании момента в системе ПОУ-ШИМ сохраняются значительные пульсации электромагнитного момента $M_{эм}$ до 25% в то время, как при прямом регулировании момента пульсации $M_{эм}$ менее 5%, а показатели качества системы управления удовлетворяют требованиям, предъявляемым к СУЭП ЛК [3].

Для улучшения показателей качества системы управления, устранения перерегулирования момента в начальный момент времени, снижения пульсаций

тока статора и т.д. могут рассматриваться другие принципы векторного управления большей вычислительной мощности (адаптивное, скользящее, дифференциальное управление и т.д.), а также иные типы регуляторов скорости и момента (нечеткие, прогнозные, гибридные регуляторы и т.д.). В рамках данного исследования разработанная система векторного управления тихоходным СДПМ по принципу ПУМ-ПВМ является удовлетворительной, так как может быть реализована на промышленном высоковольтном преобразователе частоты, и ее оптимизация будет являться предметом дальнейших исследований.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА НА БАЗЕ БЕЗРЕДУКТОРНОГО СИНХРОННОГО МОТОР- БАРАБАНА

4.1 Математическая модель движения ленты шахтного конвейера

Ленточный конвейер представляют собой многомассовую механическую систему с распределенными параметрами, динамические свойства которой зачастую описываются моделями, учитывающими вязкоупругие свойства конвейерных лент [38, 29, 73]. Переходные процессы в ленте рассматриваются с точки зрения распространения волн напряжения и деформации. Существуют различные способы описания волновых уравнений: метод последовательных приближений, учитывающий нелинейный характер скорости распространения волн и дающий представление о распределении волн по всему контуру ленты и конечно-разностный, позволяющий заменить волновые уравнения системой дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода [32, 45].

В данной работе для моделирования ленточного конвейера используется принцип кусочно-линейной аппроксимации, заключающийся в условном разбиении контура ленты на некоторое количество участков, в границах которых закон изменения скорости деформации по длине предполагается линейным [11, 26, 45]. В рамках исследования показателей качества разработанной системы векторного управления безредукторным синхронным мотор-барабаном точность представления конечно-разностного метода является достаточной.

При построении уравнений движения ленточного конвейера принимаются следующие допущения:

- трасса конвейера прямолинейна, угол наклона конвейера $\beta = 0^\circ$;
- лента представляется в виде упруговязкого стержня;
- масса ленты и вращающихся частей роlikоопор равномерно распределена (отсутствует провес ленты между роlikоопорами);
- общие коэффициенты сопротивления движения ленты на грузовой и порожней ветвях постоянны, $w_2 = \text{const}$, $w_n = \text{const}$;

– силы внутреннего трения пропорциональны скорости деформации.

Поскольку в электроприводе на основе безредукторного синхронного мотор-барабана отсутствуют механические передачи, трансмиссионные валы и муфты, он представляется в виде одной сосредоточенной массы.

Расчетная схема ленточного конвейера с двумя мотор-барабанами и натяжным устройством показана на рисунке 4.1. Здесь m_1, m_2, m_3 – сосредоточенные массы грузенной части ленты; m_4, m_5 – сосредоточенные массы порожней части ленты; G_{ny} – вес натяжного устройства, расположенного в хвосте конвейера. Приводной барабан 1 является ведущим и передает на ленту угловую скорость ω и момент M_{np1} , ведомый приводной барабан 2 передает только момент M_{np2} , провес ленты между барабанами отсутствует, участок промежуточной ветви мал [61].

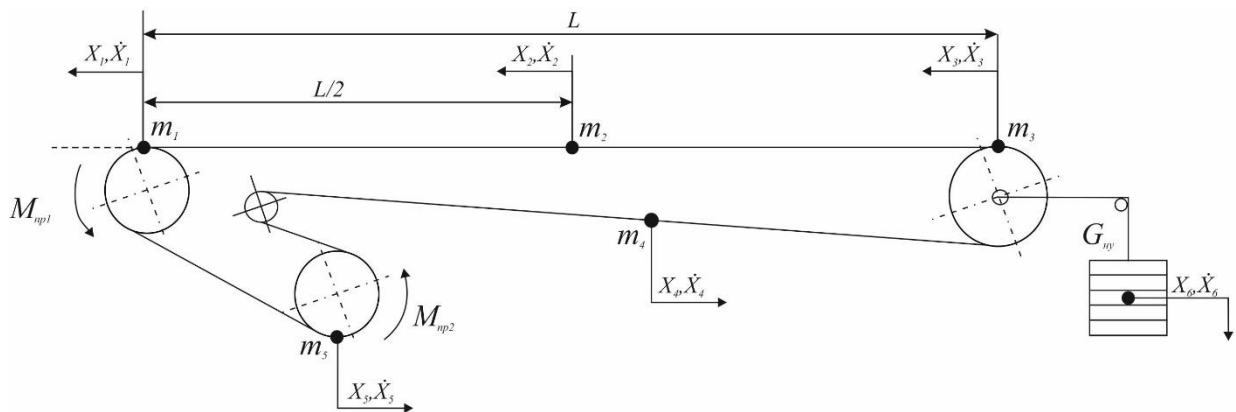


Рисунок 4.1 – Расчетная схема механической системы ленточного конвейера с двумя мотор-барабанами и натяжным устройством

Многомассовая система ленточного конвейера моделируется на основе уравнений Лагранжа и представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений второго рода (4.1):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{x}_i} + \frac{\partial A}{\partial \dot{x}_i} = 0, \quad (4.1)$$

где T – кинетическая энергия участка конвейера;

Π – потенциальная энергия участка;

A – работа внешних и внутренних сил на участке.

В качестве обобщенных координат принимаются перемещения точек x_i и скорости перемещения \dot{x}_i . Система описывается вектором состояний с 12-тью координатами $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, \dot{x}_5, \dot{x}_6]$, где x_{1-5}, \dot{x}_{1-5} – координаты состояния ленточного конвейера, x_6, \dot{x}_6 – перемещение и скорость перемещения натяжного устройства [58, 14].

На рисунке 4.2 показана схема замещения участка с распределенными параметрами сосредоточенной массой.

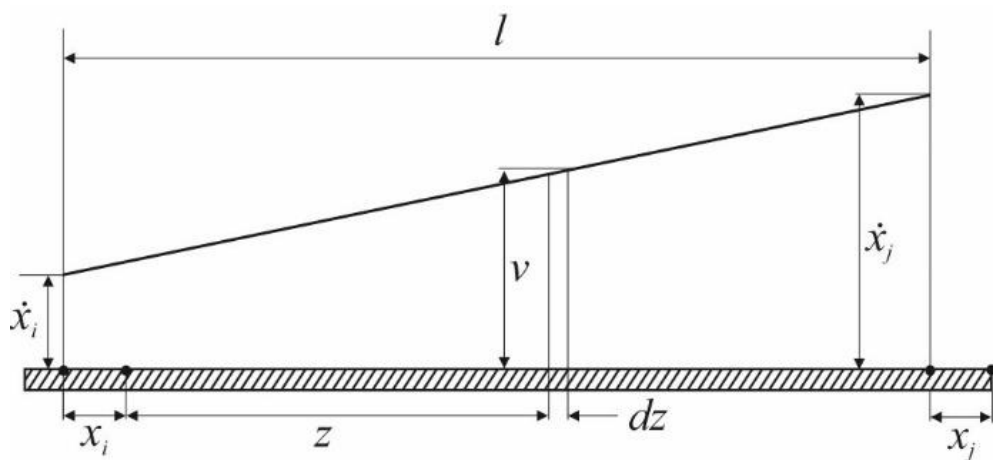


Рисунок 4.2 – Схема замещения участка ленты с распределенными параметрами сосредоточенной массой

Если на участке ленты x_i - x_j обозначить элементарный участок dz на расстоянии z от точки отсчета, и скорость перемещения этого участка равна v , то на основании схемы замещения скорость рассчитывается по (4.2) как

$$v = \dot{x}_i - \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_j}{l} z. \quad (4.2)$$

Кинетическая энергия элементарного участка dz длиной l с распределенной массой G_{ij}/g (4.3):

$$dT_{ij} = \frac{G_{ij} v^2}{2g} dz = \frac{G_{ij} \left(\dot{x}_i - \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_j}{l} z \right)^2}{2g} dz, \quad (4.3)$$

где G_{ij} – вес ленты, вращающихся роликов и груза на участке x_i - x_j ;

g – ускорение свободного падения.

Интеграл от кинетической энергии для распределенных масс каждого участка в пределах от 0 до l (4.4):

$$T_{ij} = \int_0^l \frac{G_{ij} \left(\dot{x}_i - \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_j}{l} z \right)^2}{2g} dz = \frac{G_{ij} l}{6g} (\dot{x}_i^2 + \dot{x}_i \dot{x}_j + \dot{x}_j^2). \quad (4.4)$$

Кинетическая энергия электропривода с двумя безредукторными синхронными мотор-барабанами по типу «ведущий-ведомый» (4.5):

$$T_{np} = \frac{m_{np} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_5^2)}{2}, \quad (4.5)$$

где m_{np} – масса приводного барабана, равная для обоих устройств.

Кинетическая энергия натяжного устройства (4.6):

$$T_{ny} = \frac{G_{ny} \dot{x}_6^2}{2g}, \quad (4.6)$$

где G_{ny} – вес натяжного устройства.

Выражение для полной кинетической энергии механической системы, показанной на рисунке 4.1, на основе уравнения (4.4) запишется как (4.7):

$$\begin{aligned} T_{\Sigma} = & \frac{G_2 l}{6g} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_1 \dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) + \frac{G_2 l}{6g} (\dot{x}_2^2 + \dot{x}_2 \dot{x}_3 + \dot{x}_3^2) + \frac{G_n l}{6g} (\dot{x}_3^2 + \dot{x}_3 \dot{x}_4 + \dot{x}_4^2) + \\ & + \frac{G_n l}{6g} (\dot{x}_4^2 + \dot{x}_4 \dot{x}_5 + \dot{x}_5^2) + \frac{G_n l_{np}}{6g} (\dot{x}_5^2 + \dot{x}_5 \dot{x}_1 + \dot{x}_1^2) + \frac{m_{np} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_5^2)}{2} + \frac{G_{ny} \dot{x}_6^2}{2g}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где G_2 , G_n – вес груженого и порожнего участка ленты, l_{np} – длина участка промежуточной ветви.

Частные производные полной кинетической энергии по времени для всех обобщенных координат (4.8):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_1} T_{\Sigma} \right) = \frac{G_2 l}{6g} (2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + \frac{G_n l_{np}}{6g} (2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_5) + m_{np} \ddot{x}_1, \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_2} T_\Sigma \right) &= \frac{G_e l}{6g} (2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1) + \frac{G_e l}{6g} (2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_3), \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_3} T_\Sigma \right) &= \frac{G_e l}{6g} (2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_2) + \frac{G_n l}{6g} (2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_4), \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_4} T_\Sigma \right) &= \frac{G_n l}{6g} (2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_3) + \frac{G_n l}{6g} (2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_5), \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_5} T_\Sigma \right) &= \frac{G_n l}{6g} (2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_4) + \frac{G_e l_{np}}{6g} (2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_1) + m_{np} \ddot{x}_5, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_6} T_\Sigma \right) &= \frac{G_{ny} \dot{x}_6}{g}.
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Потенциальная энергия прямолинейного участка dz длиной l представляется как энергия упругих деформаций в ленте (4.9):

$$\Pi_{ij} = C_{ij} \frac{(x_i - x_j)^2}{2}, \tag{4.9}$$

где C_{ij} – жесткость ленты на участке ij .

Полная потенциальная энергия механической системы представляется как сумма потенциальной энергии упругих деформаций замкнутого контура Π_κ и потенциальной энергии канатов натяжного устройства Π_{ny} .

Потенциальная энергия упругой деформации системы равна (4.10):

$$\begin{aligned}
\Pi_\kappa = C \frac{(x_1 - x_2)^2}{2} + C \frac{(x_2 - x_3)^2}{2} + C \frac{(x_3 - x_4)^2}{2} + \\
+ C \frac{(x_4 - x_5)^2}{2} + C \frac{(x_5 - x_1)^2}{2}.
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Потенциальная энергия положения и канатов натяжного устройства (4.11):

$$\Pi_{ny} = 0,5 \left(\frac{x_3 - x_4}{2} - x_6 \right)^2 C_\kappa + G_{ny} x_6, \tag{4.11}$$

где C_κ – коэффициент жесткости канатов натяжного устройства.

Частные производные полной потенциальной энергии для всех обобщенных координат (4.12):

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x_1} \Pi &= C(x_1 - x_2) + C(x_1 - x_5) = C(2x_1 - x_2 - x_5), \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \Pi &= C(x_2 - x_1) + C(x_2 - x_3) = C(2x_2 - x_1 - x_3), \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \Pi &= C(x_3 - x_2) + C(x_3 - x_4) + 0,25C_k(x_3 - x_4) - 0,5C_k x_6 = \\ &= C(2x_3 - x_2 - x_4) + 0,25C_k(x_3 - x_4 - 2x_6), \\ \frac{\partial}{\partial x_4} \Pi &= C(x_4 - x_3) + C(x_4 - x_5) + 0,25C_k(x_4 - x_3) + 0,5C_k x_6 = \\ &= C(2x_4 - x_3 - x_5) + 0,25C_k(x_4 - x_3 + 2x_6), \\ \frac{\partial}{\partial x_5} \Pi &= C \frac{(x_5 - x_4)}{2} + C \frac{(x_5 - x_1)}{2} = C(2x_5 - x_1 - x_4), \\ \frac{\partial}{\partial x_6} \Pi &= 0,5C_k(x_4 - x_3 + 2x_6) + G_{ny}.\end{aligned}\tag{4.12}$$

Работа внешних сил на участке ленты ij создается силами сопротивления движению ленты (4.13):

$$A_{ij} = G_{ij} l_{ij} w \frac{x_i + x_j}{2},\tag{4.13}$$

где w – коэффициент сопротивления движению ленты на роlikоопорах, постоянный для грузенной и порожней ветвей.

Работа внутренних сил на участке ленты ij определяется из допущения, что силы внутреннего трения пропорциональны скоростям деформации (4.14):

$$A_{ij} = \eta \frac{(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})(x_i - x_{i+1})}{2} + \eta \frac{(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{2},\tag{4.14}$$

где η – коэффициент вязкости ленты.

Работа движущих сил электропривода с двумя мотор-барабанами (4.15):

$$A_{np} = -\frac{M_{np1}}{R_{\sigma}} x_1 - \frac{M_{np2}}{R_{\sigma}} x_5, \quad (4.15)$$

где R_{σ} – радиус безредукторных синхронных мотор-барабанов.

Работа внешних сил сопротивления в замкнутом контуре ленты (4.16):

$$\begin{aligned} A_k = G_z l w \frac{x_1 + x_2}{2} + G_z l w \frac{x_2 + x_3}{2} + G_n l w \frac{x_3 + x_4}{2} + \\ + G_n l w \frac{x_4 + x_5}{2} + G_n l_{np} w \frac{x_5 + x_1}{2}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Силы сопротивления против движения ленты (4.17):

$$W_i = G_{ij} l_{ij} w \cdot \operatorname{sgn} \dot{x}_i. \quad (4.17)$$

Работа сил сопротивления движению натяжного груза (4.18):

$$A_{ny} = \pm G_{ny} f x_6, \quad (4.18)$$

где f – приведенный коэффициент сопротивления движению натяжных грузов.

Частные производные от работы внутренних и внешних сил для обобщенных координат (4.19):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_1} A &= -\frac{M_{np1}}{R_{\sigma}} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1) + 0,5 G_z l w \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + 0,5 G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_1, \\ \frac{\partial}{\partial x_2} A &= G_z l w \operatorname{sgn} \dot{x}_2, \\ \frac{\partial}{\partial x_3} A &= 0,5 G_z l w \operatorname{sgn} \dot{x}_3 + 0,5 G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_3, \\ \frac{\partial}{\partial x_4} A &= G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_4, \\ \frac{\partial}{\partial x_5} A &= -\frac{M_{np2}}{R_{\sigma}} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5) + 0,5 G_z l w \operatorname{sgn} \dot{x}_5 + 0,5 G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_5, \\ \frac{\partial}{\partial x_6} A &= G_n f \operatorname{sgn} \dot{x}_6. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Работа сил внутреннего трения в замкнутом контуре ленты (4.20):

$$A_{\kappa} = \eta \frac{(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)(x_1 - x_2)}{2} + \eta \frac{(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)(x_2 - x_3)}{2} + \\ + \eta \frac{(\dot{x}_3 - \dot{x}_4)(x_3 - x_4)}{2} + \eta \frac{(\dot{x}_4 - \dot{x}_5)(x_4 - x_5)}{2} + \eta \frac{(\dot{x}_5 - \dot{x}_1)(x_5 - x_1)}{2}. \quad (4.20)$$

Частные производные по обобщенным координатам от работы сил внутреннего трения (4.21):

$$\frac{\partial}{\partial x_1} A_{\kappa} = \eta \frac{(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)}{2} + \eta \frac{(\dot{x}_1 - \dot{x}_5)}{2}, \quad \frac{\partial}{\partial x_2} A_{\kappa} = \eta \frac{(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)}{2} + \eta \frac{(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)}{2}, \\ \frac{\partial}{\partial x_3} A_{\kappa} = \eta \frac{(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)}{2} + \eta \frac{(\dot{x}_3 - \dot{x}_4)}{2}, \quad \frac{\partial}{\partial x_4} A_{\kappa} = \eta \frac{(\dot{x}_4 - \dot{x}_5)}{2} + \eta \frac{(\dot{x}_4 - \dot{x}_3)}{2}, \\ \frac{\partial}{\partial x_5} A_{\kappa} = \eta \frac{(\dot{x}_5 - \dot{x}_4)}{2} + \eta \frac{(\dot{x}_5 - \dot{x}_1)}{2}, \quad \frac{\partial}{\partial x_6} A_{\kappa} = 0. \quad (4.21)$$

На основе уравнения (4.1) и полученных частных производных кинетической, потенциальной энергии и работы внешних и внутренних сил сопротивления в ленте, составим систему дифференциальных уравнений для обобщенных координат (4.22):

$$1) m_2(2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_n(2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_5) + m_{np}\ddot{x}_1 + C(2x_1 - x_2 - x_5) - \frac{M_{np1}}{R_{\sigma}} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1) + \\ + 0,5G_2lw \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + 0,5G_nlw \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + \eta'(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \eta'(\dot{x}_1 - \dot{x}_5) = 0, \\ 2) m_2(2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1) + m_2(2\ddot{x}_2 + \ddot{x}_3) + C(2x_2 - x_1 - x_3) + \\ + G_2lw \operatorname{sgn} \dot{x}_2 + \eta'(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \eta'(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = 0, \\ 3) m_2(2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_2) + m_n(2\ddot{x}_3 + \ddot{x}_4) + C(2x_3 - x_2 - x_4) + C(2x_3 - x_2 - x_4) + \\ + 0,25C_k(x_3 - x_4 - 2x_6) + 0,5G_2lw \operatorname{sgn} \dot{x}_3 + 0,5G_nlw \operatorname{sgn} \dot{x}_3 + \eta'(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + \eta'(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) = 0, \\ 4) m_n(2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_3) + m_n(2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_5) + C(2x_4 - x_3 - x_5) + \\ + 0,25C_k(x_4 - x_3 + 2x_6) + G_nlw \operatorname{sgn} \dot{x}_4 + \eta'(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) + \eta'(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) = 0, \\ 5) m_n(2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_4) + m_o(2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_1) + m_{np}\ddot{x}_5 + C(2x_5 - x_1 - x_4) - \frac{M_{np2}}{R_{\sigma}} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5) + \\ + 0,5G_2lw \operatorname{sgn} \dot{x}_5 + 0,5G_nlw \operatorname{sgn} \dot{x}_5 + \eta'(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + \eta'(\dot{x}_5 - \dot{x}_1) = 0, \quad (4.22)$$

$$6) \frac{G_{ny} \ddot{x}_6}{g} + 0,5C_k(x_4 - x_3 + 2x_6) + G_{ny} + G_n f \operatorname{sgn} \dot{x}_6 = 0 \quad (4.22)$$

В систему дифференциальных уравнений введены следующие обозначения:
 $m_2 = G_2 l / 6g$, $m_n = G_n l / 6g$, $m_0 = G_n l_{np} / 6g$.

Преобразуем систему уравнений (4.22) и получаем систему из шести дифференциальных нелинейных уравнений (4.23):

$$\begin{aligned} & 1) (2m_2 + 2m_n + m_{np}) \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + m_n \ddot{x}_5 + 2\eta' \dot{x}_1 - \eta' \dot{x}_2 + 2Cx_1 - \\ & + 0,5G_2 l w \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + 0,5G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + \eta'(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \eta'(\dot{x}_1 - \dot{x}_5) = 0, \\ & 2) m_2 \ddot{x}_1 + 4m_2 \ddot{x}_2 + m_2 \ddot{x}_3 - \eta' \dot{x}_1 + 2\eta' \dot{x}_2 - \eta' \dot{x}_3 - \\ & - Cx_1 + 2Cx_2 - Cx_3 + G_2 l w \operatorname{sgn} \dot{x}_2 = 0, \\ & 3) m_2 \ddot{x}_2 + (2m_2 + 2m_n) \ddot{x}_3 + m_n \ddot{x}_4 - \eta' \dot{x}_2 + 2\eta' \dot{x}_3 - \eta' \dot{x}_4 - Cx_2 + \\ & + (2C + 0,25C_k) x_3 - (C + 0,25C_k) x_4 - 0,5C_k x_6 + 0,5l w (G_2 + G_n) \operatorname{sgn} \dot{x}_3 = 0, \\ & 4) m_n \ddot{x}_3 + 4m_n \ddot{x}_4 + m_n \ddot{x}_5 - \eta' \dot{x}_3 + 2\eta' \dot{x}_4 - \eta' \dot{x}_5 - (C + 0,25C_k) x_3 + \\ & + (2C + 0,25C_k) x_4 - Cx_5 + 0,5C_k x_6 + G_n l w \operatorname{sgn} \dot{x}_4 = 0, \\ & 5) m_0 \ddot{x}_1 + m_n \ddot{x}_4 + (2m_n + 2m_0 + m_{np}) \ddot{x}_5 - \eta' \dot{x}_1 - \eta' \dot{x}_4 + 2\eta' \dot{x}_5 - \\ & - Cx_1 - Cx_4 + 2Cx_5 + 0,5l w (G_2 + G_n) \operatorname{sgn} \dot{x}_5 = \frac{M_{np2}}{R_6} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5), \\ & 6) \frac{G_{ny} \ddot{x}_6}{g} - 0,5C_k x_3 + 0,5C_k x_4 + C_k x_6 + G_{ny} + G_n f \operatorname{sgn} \dot{x}_6 = 0. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Приведем систему уравнений (4.23) к матричному виду относительно вектора обобщенных координат X (4.24):

$$\begin{aligned} & A_1 \ddot{X} + A_2 \dot{X} + CX + D \operatorname{sgn} \dot{X} + EG_{ny} = \\ & = M_1 M_{np1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1) + M_2 M_{np2} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5). \end{aligned} \quad (4.24)$$

Умножим систему (4.24) на обратную матрицу A_1^{-1} , чтобы привести к каноническому виду (4.25):

$$\begin{aligned} \ddot{X} + A_2 A_1^{-1} \dot{X} + C A_1^{-1} X + D A_1^{-1} \operatorname{sgn} \dot{X} + E A_1^{-1} G_{ny} = \\ = M_1 A_1^{-1} M_{np1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1) + M_2 A_1^{-1} M_{np2} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5). \end{aligned} \quad (4.25)$$

На рисунках 4.3-4.4 показана математическая модель ленточного конвейера с двумя безредукторными синхронными мотор-барабанами, реализованная по методу из [15]. Расчеты коэффициентов матриц представлены в Приложении Б.

4.2 Исследование системы управления электроприводом ленточного конвейера с двумя безредукторными синхронными мотор-барабанами

Для исследования системы векторного управления электропривода ленточного конвейера с двумя безредукторными синхронными мотор-барабанами использовались параметры ленточного конвейера Л1000КУ, представленные в таблице 4.1. Принципиальная схема системы управления ленточным конвейером представлена на рисунке 4.5.

Таблица 4.1 – Параметры ленточного конвейера Л1000КУ

Длина ленты L , м	1000
Масса участка порожней ветви m_n , кг	350
Масса участка промежуточной ветви m_o , кг	25
Масса синхронного безредукторного мотор-барабана m_{np} , кг	6500
Радиус синхронного безредукторного мотор-барабана R_{δ} , м	0,5
Вес груза натяжного устройства G_{ny} , кг	60000
Жесткость ленты C , Н/м	1200
Жесткость канатов натяжного устройства C_k , Н/м	60000
Вязкость ленты η , кг/(м·с)	1100
Коэффициент сопротивления движению w	0,03
Коэффициент сопротивления движению канатов груза f	0,3

При регулировании и движении конвейера с пониженной скоростью обеспечивается максимальное сечение груза на всём протяжении ленты и снижение энергопотребления [97].

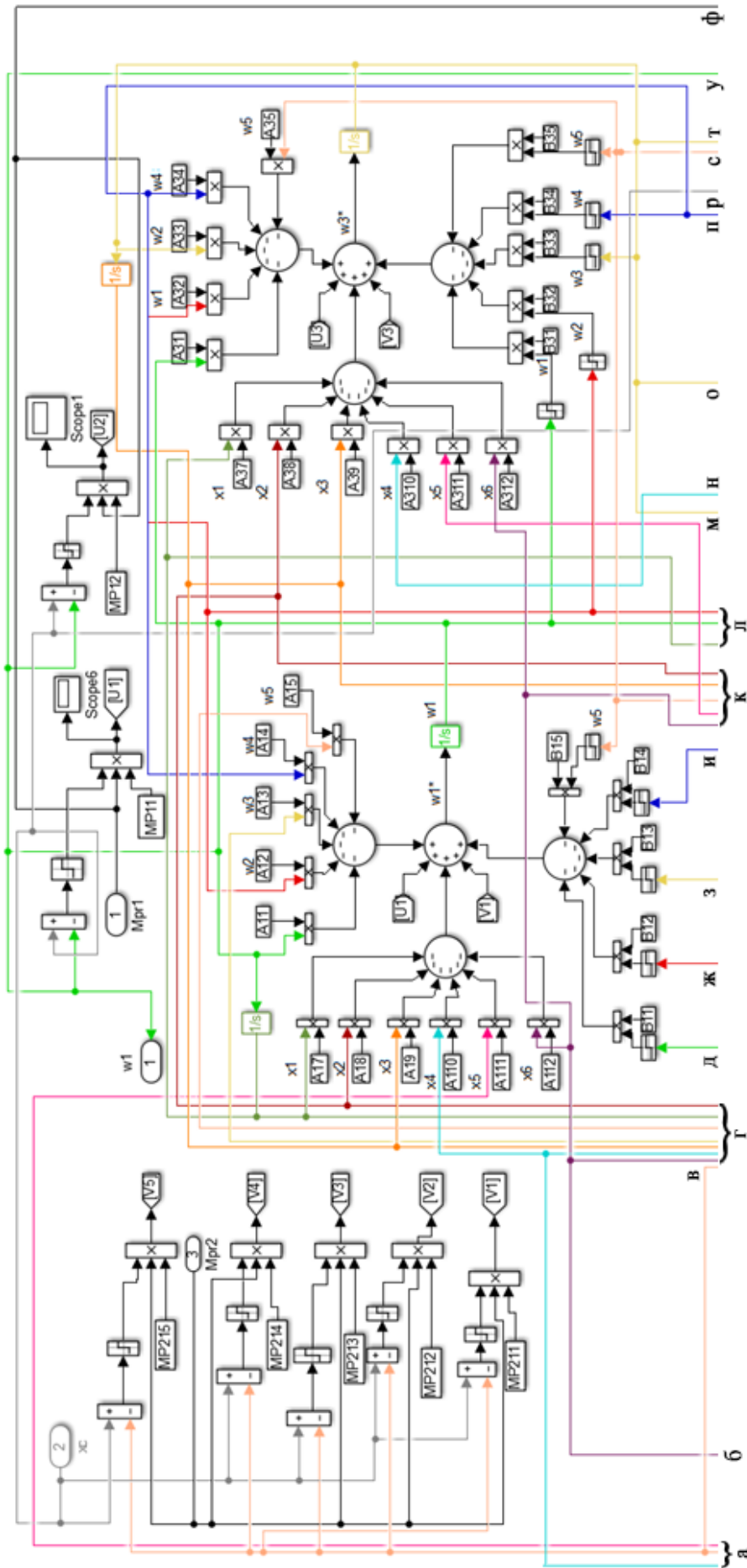


Рисунок 4.3 – Схема ленточного конвейера с двумя синхронными безредукторными мотор-барабанами в Simulink (часть 1)

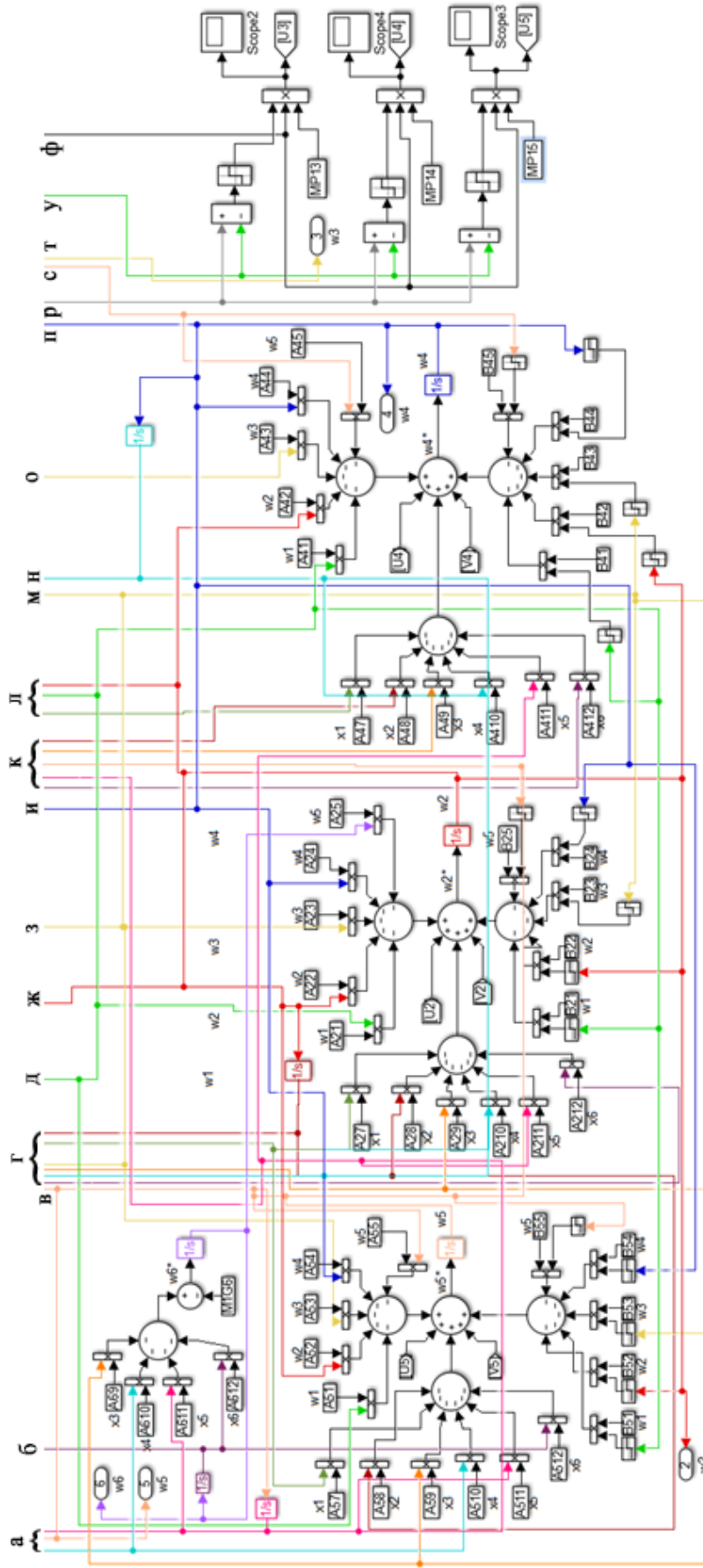


Рисунок 4.4 – Схема ленточного конвейера с двумя синхронными безредукторными мотор-барабанами в Simulink (часть 2)

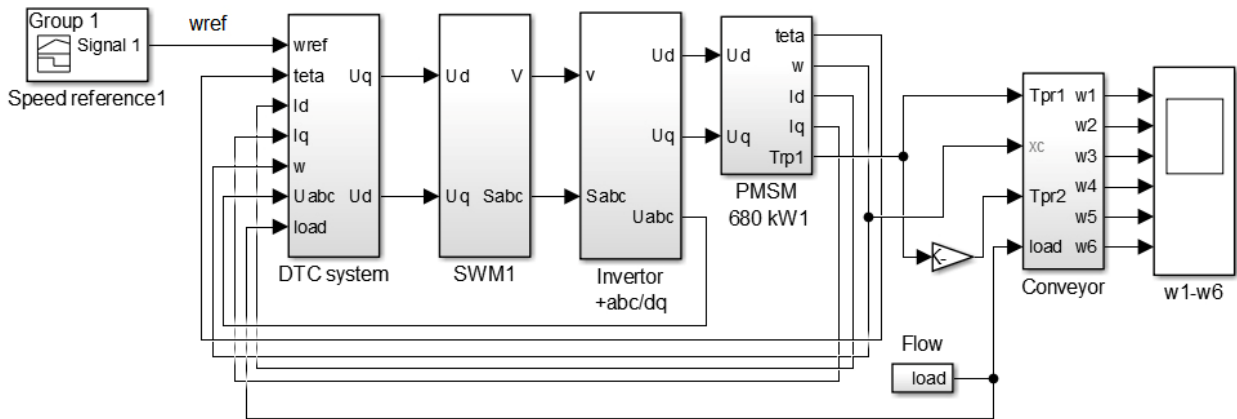


Рисунок 4.5 – Схема системы управления электроприводом ленточного конвейера в Simulink

На рисунке 4.6 показаны переходные процессы в ленте при плавном пуске с загруженной лентой. Во избежание упругих ударов и распространения колебаний вдоль ленты время плавного пуска до номинальной скорости вращения $\omega = 6,28$ рад/с принимается равным 12 с. Длительность переходного процесса при пуске под нагрузкой составляет 47 с [54].

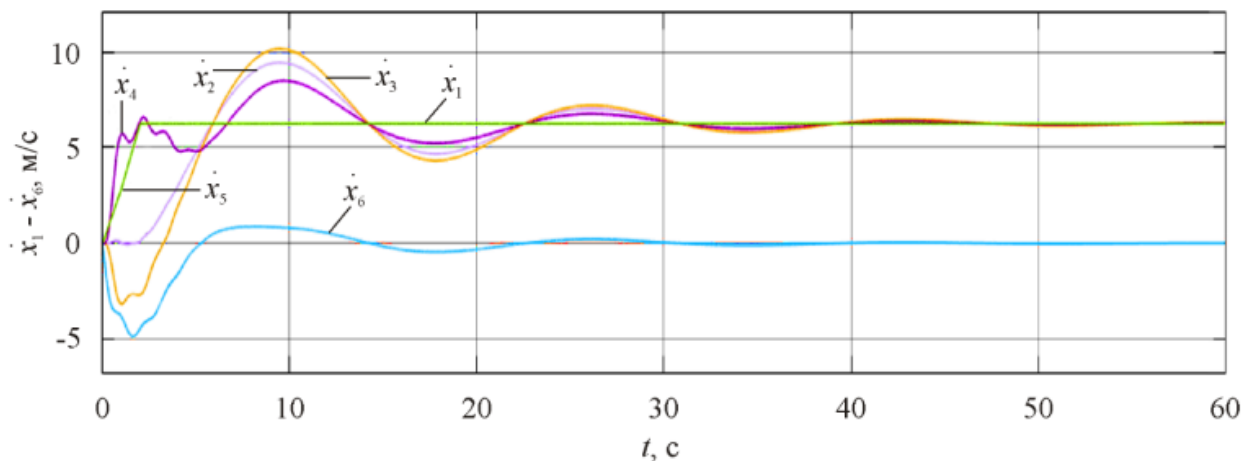


Рисунок 4.6 – Переходные процессы на участках конвейера при плавном пуске, на холостом ходу

Для исследования возможностей регулирования скорости ленты в системе управления с безредукторным синхронным мотор-барабаном и разработки задатчика скорости используется поминутный грузопоток магистрального

конвейера на шахте им. С.М. Кирова (г. Ленинск-Кузнецкий), показанный на рисунке 4.7.

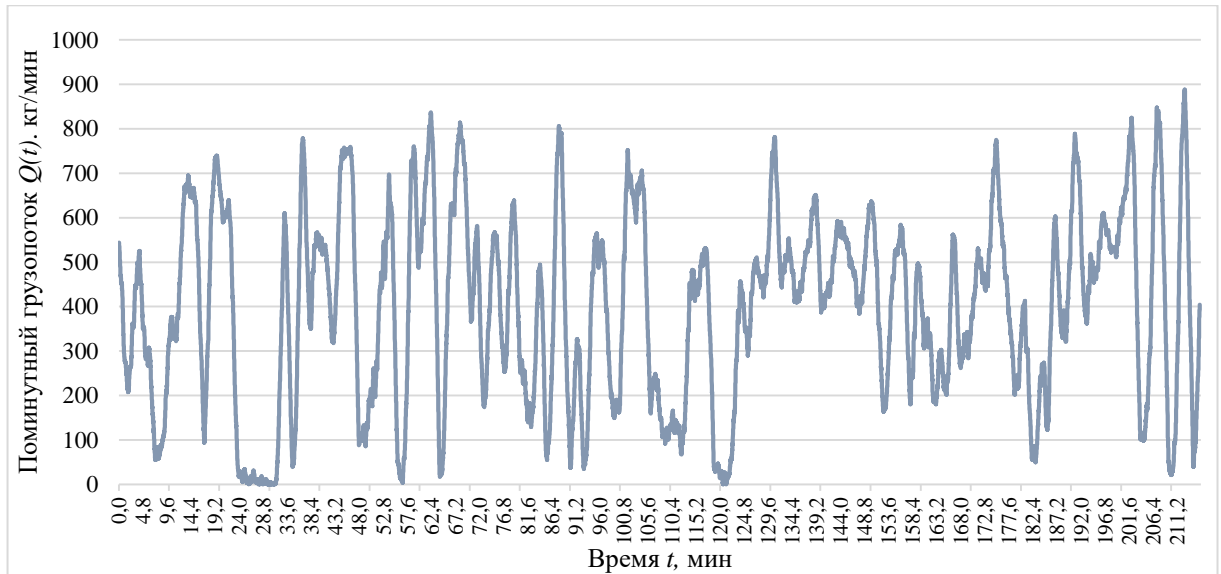


Рисунок 4.7 – Поминутный грузопоток магистрального конвейера на шахте им. С.М. Кирова (г. Ленинск-Кузнецкий).

Статистика входного грузопотока магистрального конвейера для определения оптимальных уровней переключения скоростей приведена на рисунке 4.8.

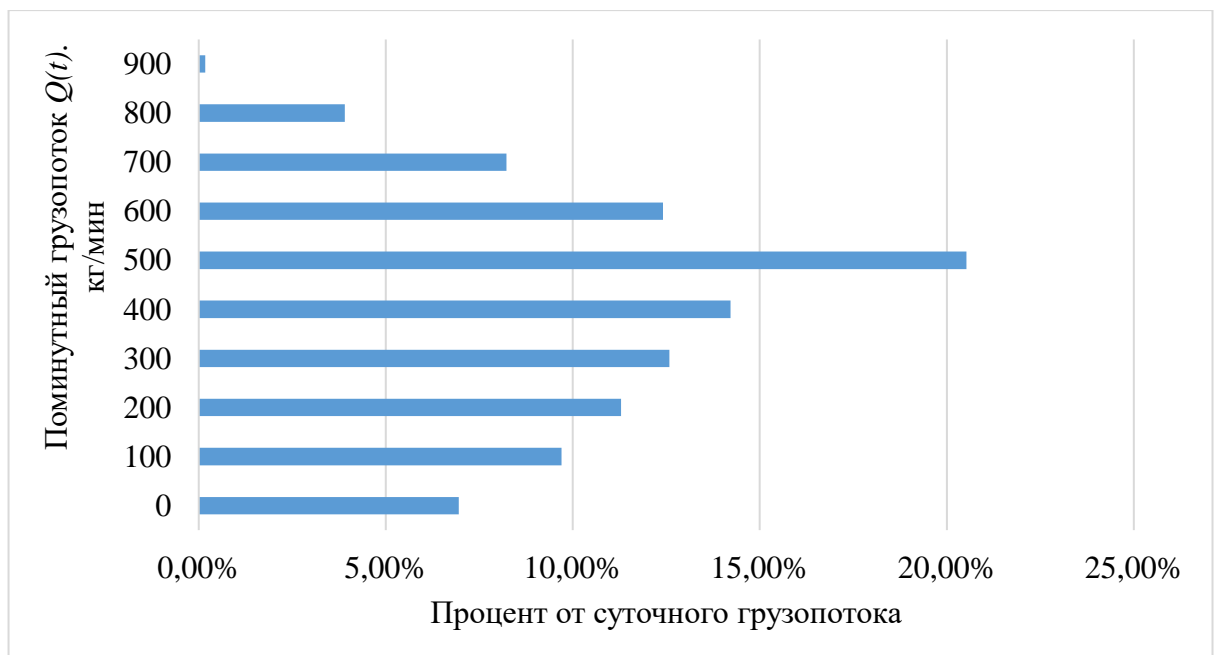


Рисунок 4.8 – Диаграмма распределения поминутного грузопотока

Более 47% рабочего времени грузопоток в диапазоне $Q(t) = 300-500$ кг/мин, 34% времени $Q(t) = 0-200$ кг/мин, остальные 19% времени лента практически полностью загружена, $Q(t) = 700-900$ кг/мин. Исходя из распределения на рисунке 4.8, целесообразно реализовать регулирование скорости вращения СДПМ в три ступени: при грузопотоке $Q(t) < 300$ кг/мин скорость мотор-барабана $\omega_1 = 2,5$ рад/с; при $300 \text{ кг/мин} < Q(t) < 500$ кг/мин скорость $\omega_2 = 4,2$ рад/с; при $Q(t) > 600$ кг/мин лента движется с номинальной скоростью $6,28$ рад/с. Количество ступеней может быть увеличено, но не рекомендуется снижать нижний порог скоростей СДПМ, так как при работе на скоростях, близких к нулю, повышаются пульсации тока и интенсивность «залипаний» ротора в магнитном поле статора.

Схема задатчика скорости конвейера в зависимости от грузопотока показана на рисунке 4.9.

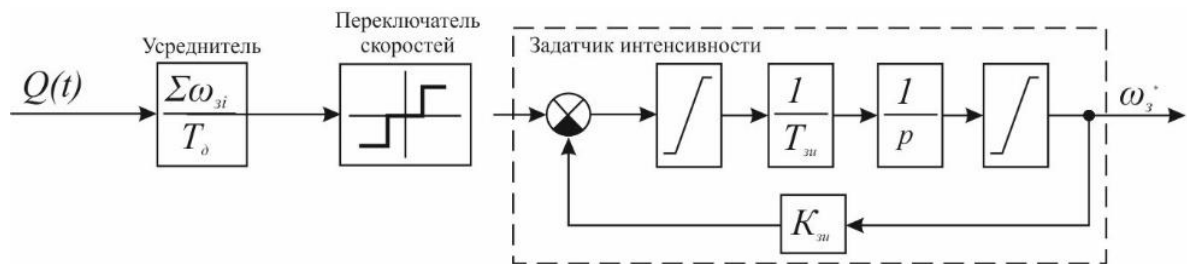


Рисунок 4.9 – Схема задатчика скорости в зависимости от грузопотока

Усреднение мгновенной величины грузопотока производится по приближительному значению длительности движения груза из начальной точки конвейера к хвосту при номинальной скорости движения ленты $T_d = 1000/3,14 = 300$ с. Переключение скоростей устроено по принципу трехпозиционного реле, задатчик интенсивности представляет собой интегральное звено с постоянной времени $T_{зи} = 10$ с. На рисунках 4.10-4.14 показаны переходные процессы грузопотока, скоростей участков ленты и электромагнитного момента безредукторного синхронного мотор-барабана. Длительность переходного процесса при переключении скорости составляет не более 40 с, что является достаточным при качественном изменении грузопотока в течение 300-500 с. Для испытания регулирования скорости ленты в функции грузопотока был выбран

временной промежуток $t = 0-25$ мин (рисунок 4.7). При переменной нагрузке амплитуда пульсаций момента достигает 15% при максимальном грузопотоке.

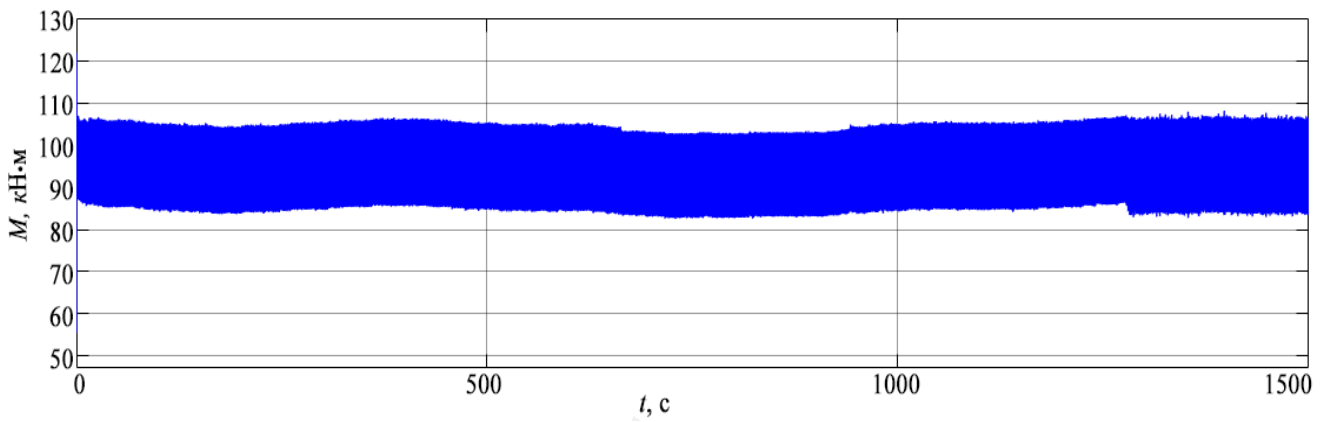


Рисунок 4.10 – Переходные процессы электромагнитного момента

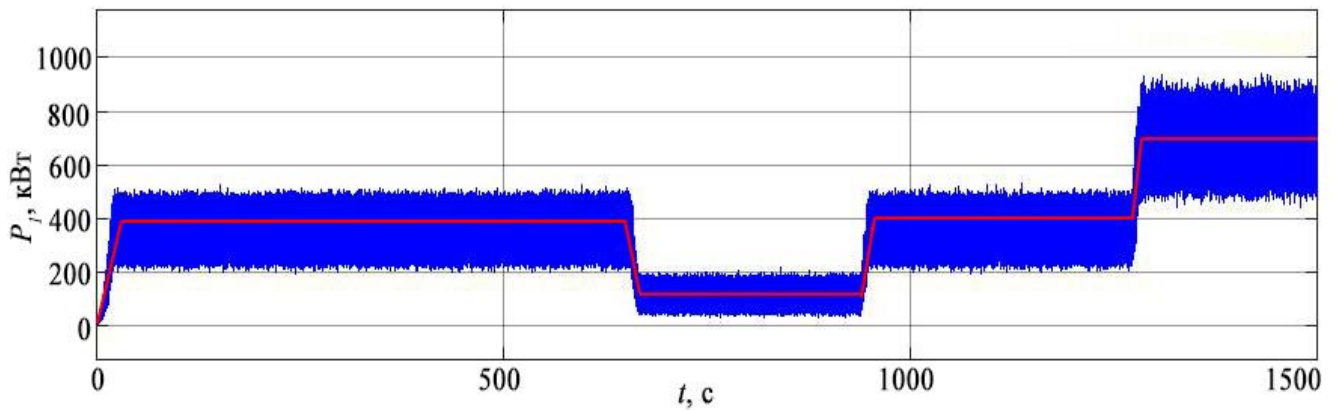


Рисунок 4.11 – Переходные процессы входной мощности P_1

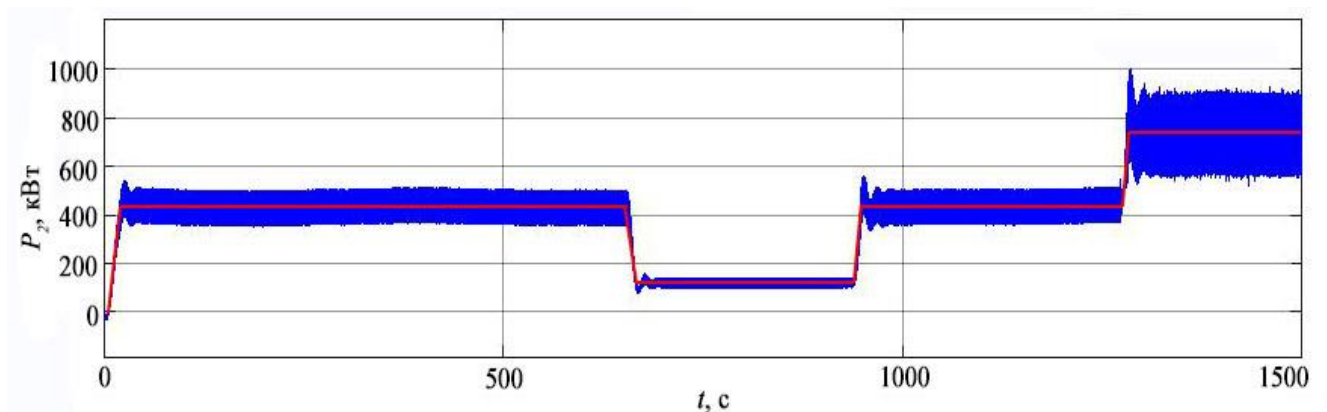


Рисунок 4.12 – Переходные процессы выходной мощности P_2

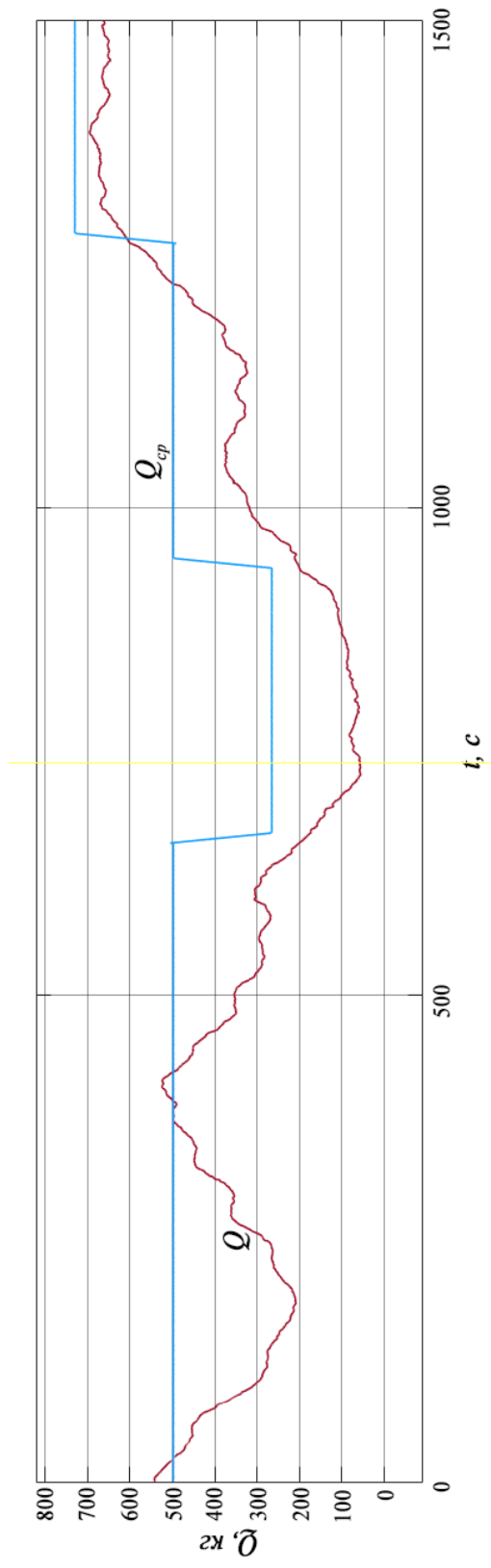


Рисунок 4.13 – Мгновенный грузопоток $Q(t)$ и его усредненное значение $Q(t)_{cp}$

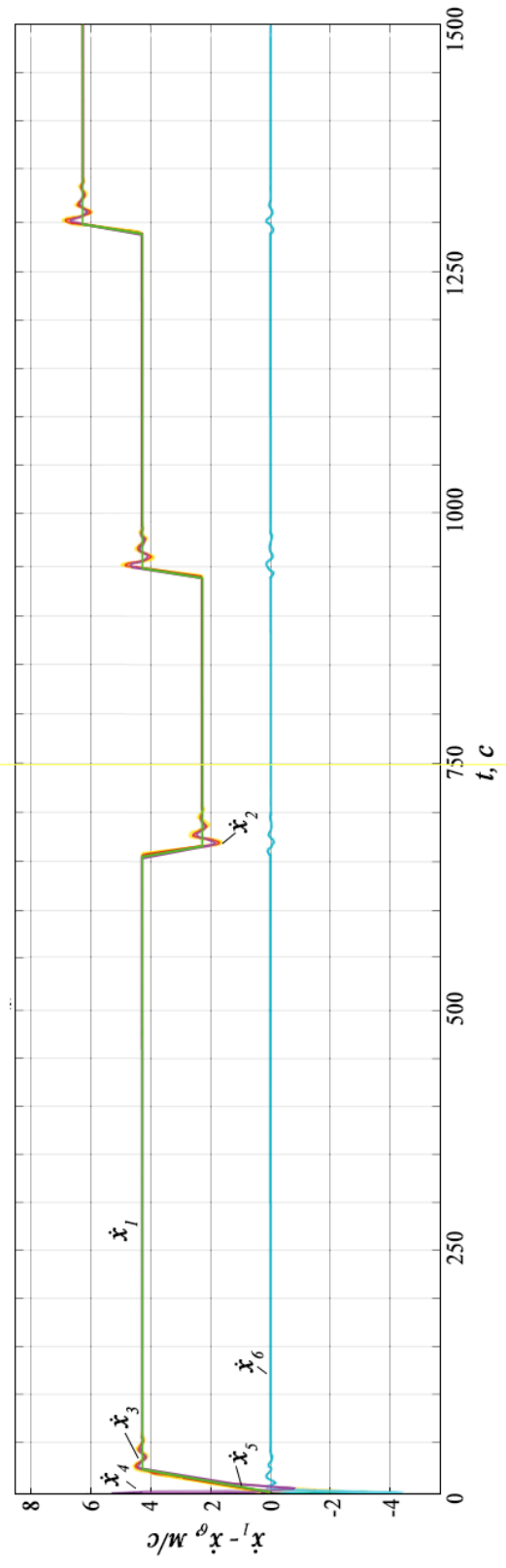


Рисунок 4.14 – Переходные процессы скоростей участков ленты

Суммарная входная мощность одного без редукторного синхронного мотор-барабана при регулировании в функции грузопотока указанным образом составляет приблизительно $P_1 = 436,8$ кВт·ч, суммарная выходная мощность $P_2 = 396$ кВт·ч, потери мощности $P_{nm} = 40,8$ кВт·ч или 9,3% от общего энергопотребления. Трехступенчатое регулирование в функции грузопотока $Q(t)$, при грузопотоке, соответствующем мгновенному грузопотоку на рисунке 4.13, в диапазоне $Q(t) = 0 \dots 900$ кг/мин, позволяет экономить до 35% от суммарного энергопотребления в отличие от постоянной работы электропривода на номинальной мощности. В многобарабанном электроприводе экономия увеличивается пропорционально количеству барабанов.

4.3 Сравнение показателей асинхронного редукторного электропривода и безредукторного синхронного мотор-барабана

В качестве асинхронного редукторного электропривода (АРЭ) рассматривается двухбарабанный электропривод на основе АД КЗ с двухступенчатым цилиндрическим редуктором и турбомуфтой, с частотным регулированием посредством высоковольтного ПЧ, идентичного по структуре и параметрам рассмотренному для управления тихоходного СДПМ [44].

Параметры АД КЗ марки ВАОВ5К-630Д-6, необходимые для математического моделирования в системе координат $d-q$: $P_n = 630$ кВт, $U_s = 6$ кВ, $n_n = 1000$ об/мин, $p = 6$, $L_m = 0,9376$ Гн, $L_r = 0,01035$ Гн, $L_s = 0,9853$ Гн, $R_s = 0,1062$ Ом, $R_r = 1,212$ Ом. Математическая модель асинхронного двигателя строится на основе уравнений обобщенной электрической машины [34, 74].

Кинематическая схема двухступенчатого цилиндрического редуктора (ЦР) показана на рисунке 4.15, а.

На входном валу ЦР находится муфта зацепления, на выходе – турбомуфта, обеспечивающая плавное изменение скорости. Суммарное передаточное число ЦР $i_p = 18$, передаточные числа ступеней $i_1 = 3,1$, $i_2 = 5,8$. Значения коэффициентов жесткости C_i , моментов инерции J_i звеньев электропривода и передаточных чисел i_i представлены в таблице 4.2.

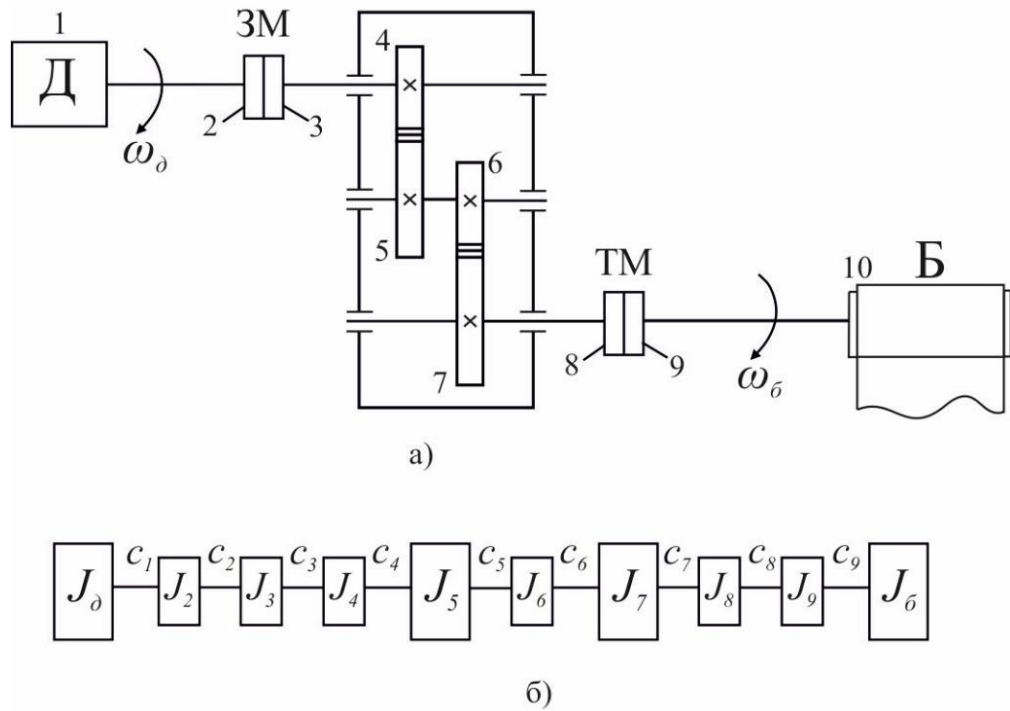


Рисунок 4.15 – Кинематическая (а) и расчетная (б) АРЭ

Таблица 4.2 – Параметры расчетной схемы АРЭ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$J_i, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	180	28	28	62	250	86	193	45	45	160
$C_i, \text{ Н/м}$	∞	$10 \cdot 10^6$	∞	∞	$14 \cdot 10^8$	∞	$18 \cdot 10^8$	$12 \cdot 10^7$	∞	-
i_i	1	1	1	1	3,1	3,1	18	18	18	18

На расчетной схеме редуктора (рисунок 4.15, б) моменты инерции и массы вращающихся элементов представлены связанными упругими элементами с жесткостями c_i . Упростим расчетную схему до эквивалентной трехмассовой схемы, представляя элементы зубчатой передачи в виде упругих тел, на которые действуют силы вязкого трения [30, 70]. Расчетная схема трехмассовой системы АРЭ представлена на рисунке 4.16.

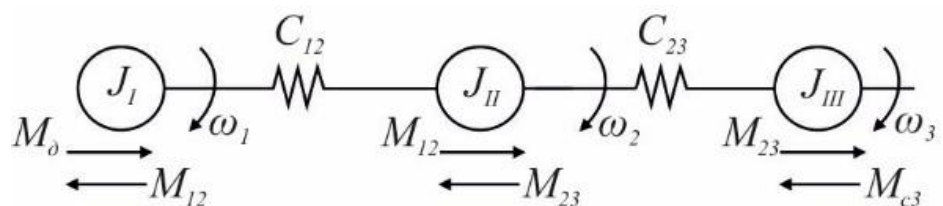


Рисунок 4.16 – Расчетная схема трехмассовой системы АРЭ

На основании закона сохранения энергии эквивалентные моменты инерции, приведенные к валу ротора (4.26):

$$J_I = J_0 + J_2 + J_3 + J_4 + \frac{J_5 + J_6}{i_1^2} = 332,96 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (4.26)$$

$$J_{II} = \frac{J_7 + J_8 + J_9}{i_1^2 \cdot i_2^2} = 0,876 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad J_{III} = J_6.$$

Эквивалентные жесткости (4.27):

$$C_{12} = \frac{C_{24} \cdot (C_5 / i_1^2)}{C_{24} + (C_5 / i_1^2)} = 9,35 \cdot 10^6 \text{ Н / м}, \quad (4.27)$$

$$C_{23} = \frac{C_{89} \cdot (C_7 / i_1^2 i_2^2)}{C_{89} + (C_7 / i_1^2 i_2^2)} = 5,26 \cdot 10^6 \text{ Н / м}.$$

Система дифференциальных уравнений в операторной форме (4.28):

$$J_I p \omega_1 = M - M_{12} - M_{c_1} - M_{\text{эм}1},$$

$$J_{II} p \omega_2 = M_{12} - M_{c_2} + M_{\text{эм}2}, \quad J_{III} p \omega_3 = M_{23} - M_{c_3}, \quad (4.28)$$

$$p M_{12} = C_{12} (\omega_1 - \omega_2), \quad p M_{23} = C_{23} (\omega_2 - \omega_3),$$

$$M_{\text{эм}1} = \beta_{12} (\omega_1 - \omega_2), \quad M_{\text{эм}2} = \beta_{23} (\omega_2 - \omega_3),$$

где β_{12}, β_{23} – коэффициенты пропорциональности моментов вязкого трения, рассчитываемые по (4.29).

$$\beta_{12} = \frac{\lambda_{\text{эм}1}}{\pi} \sqrt{\frac{C_{12} J_I J_{II}}{J_I + J_{II}}}, \quad \beta_{23} = \frac{\lambda_{\text{эм}2}}{\pi} \sqrt{\frac{C_{23} J_{II} J_{III}}{J_{II} + J_{III}}}, \quad (4.29)$$

где $\lambda_{\text{эм}1}, \lambda_{\text{эм}2} = 0,1 \div 0,3$ – логарифмический декремент затухания.

Принципиальная схема системы управления асинхронным редукторным электроприводом ленточного конвейера представлена на рисунке по 4.17.

На рисунках 4.18 представлены переходные процессы механического момента, поступающего на ленту, и скоростей ленты, на рисунках 4.19-4.20 графики входной и выходной мощностей. Поскольку в системе скалярного управления отсутствуют регуляторы скорости и момента, наблюдаются колебания скорости величиной 4,6%, колебания момента менее 3%.

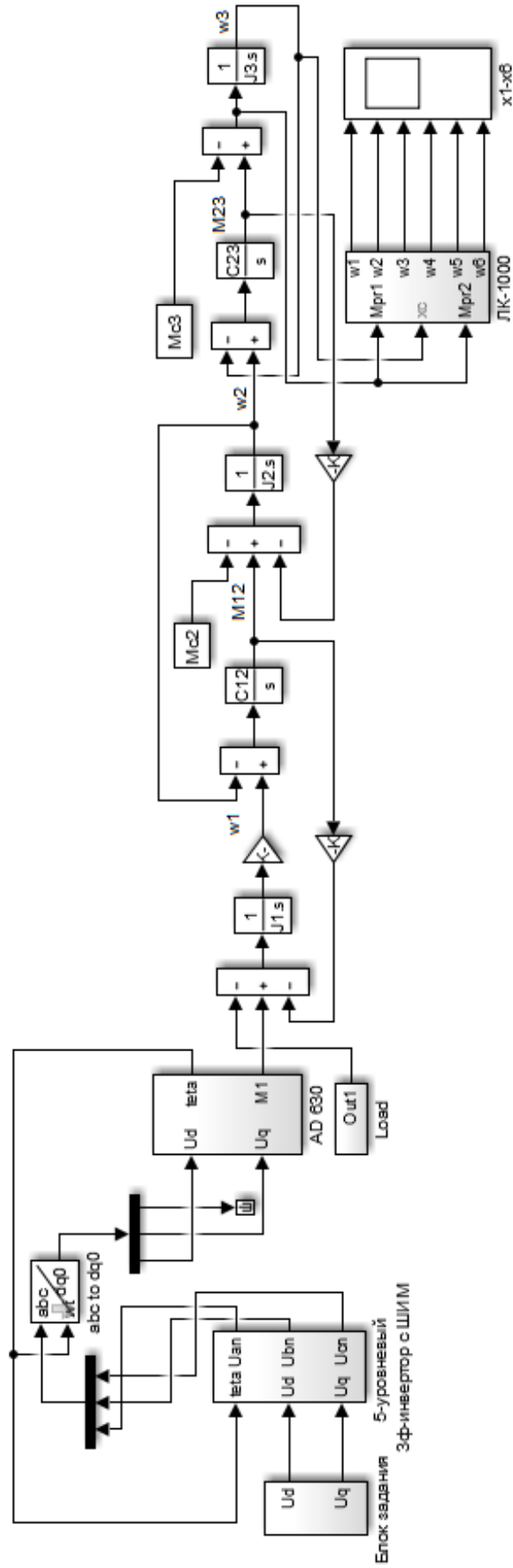


Рисунок 4.17 – Схема системы управления асинхронным редукторным электроприводом ленточного конвейера в Simulink

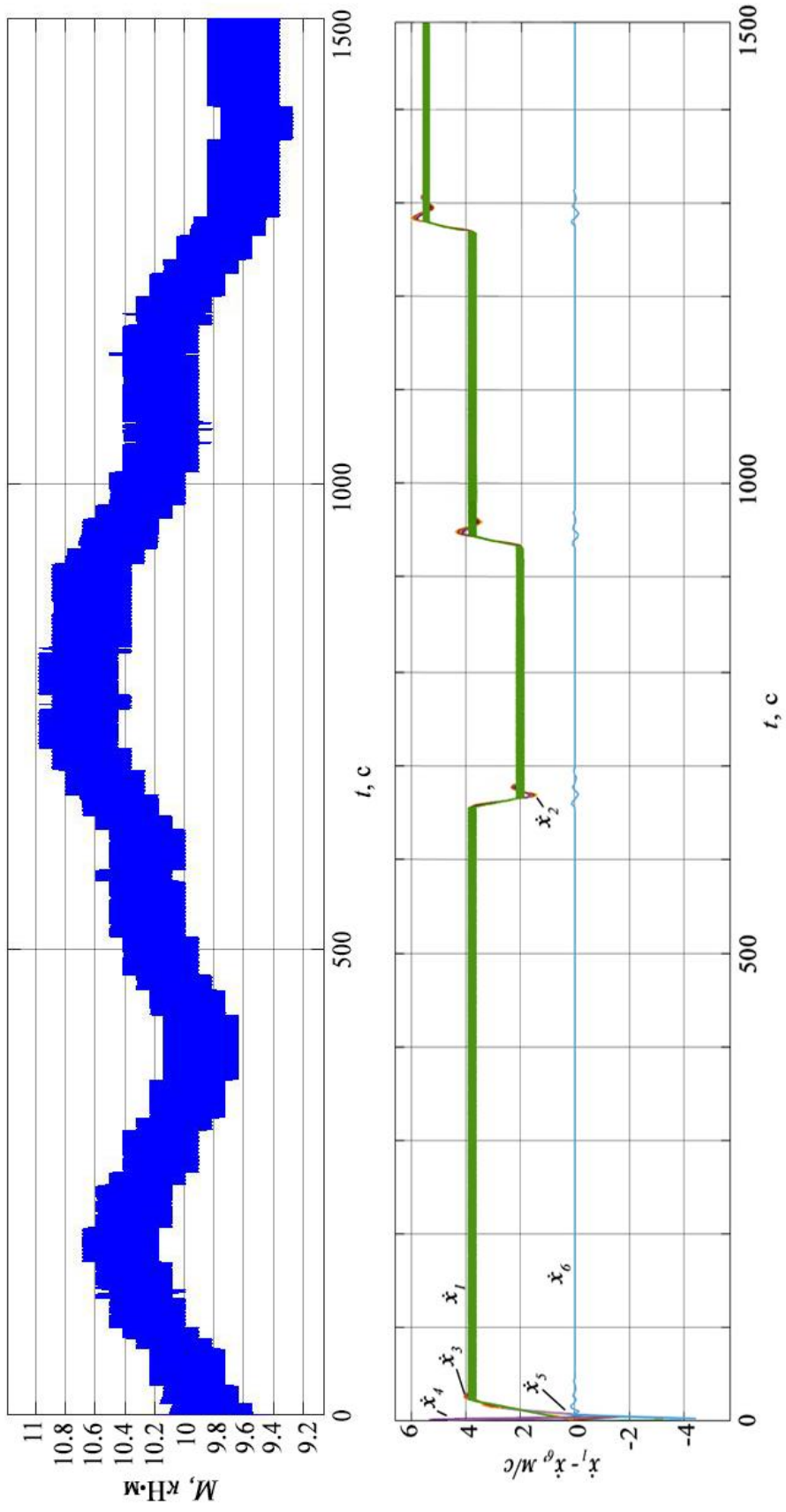


Рисунок 4.18 – Переходные процессы механического момента и скоростей участков ленты

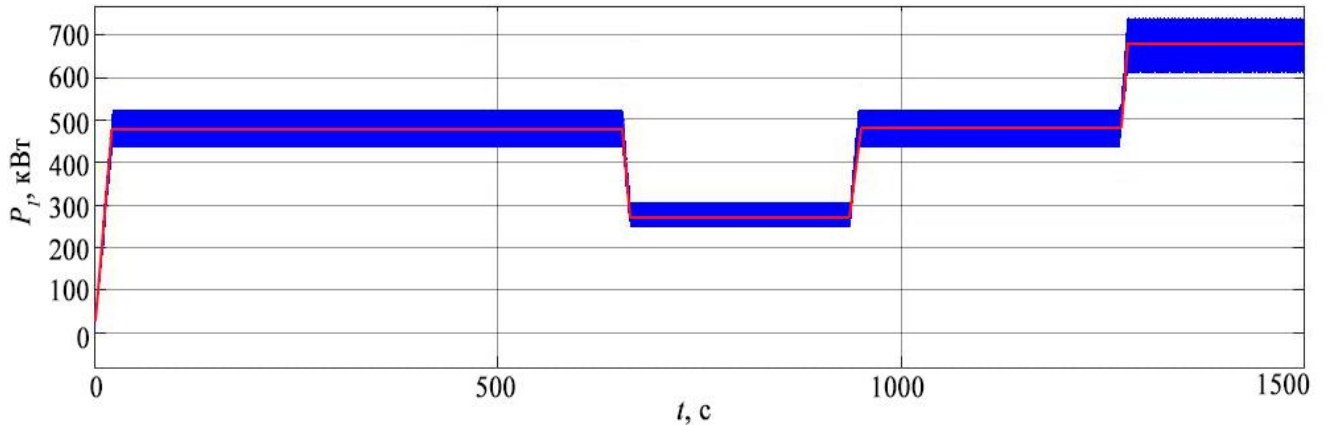


Рисунок 4.19 – Переходные процессы входной мощности P_1 АРЭ

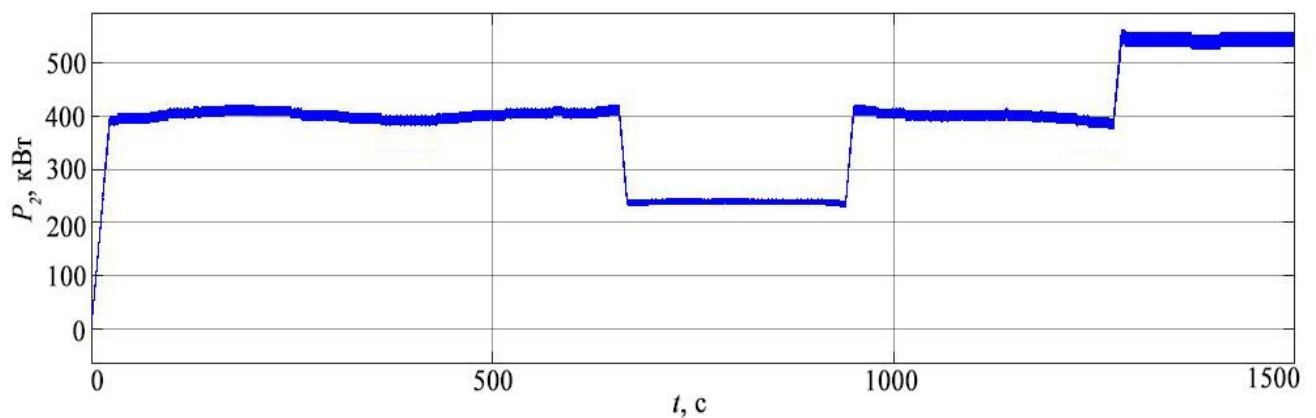


Рисунок 4.20 – Переходные процессы выходной мощности P_2 АРЭ

Суммарная входная мощность электропривода ведущего барабана АРЭ при регулировании в функции грузопотока указанным образом $P_1 = 531,14$ кВт·ч, суммарная выходная мощность $P_2 = 425$ кВт·ч, потери мощности $P_{nm} = 106,14$ кВт·ч или 19,8% от общего энергопотребления, что в 2 раза больше потерь в безредукторном синхронном мотор-барабане.

В системе электропривода суммарный КПД рассчитывается как произведение КПД всех составляющих:

- КПД АД КЗ 630 кВт $\eta_{АД} = 0,94$;
- КПД цилиндрического редуктора $\eta_{ЦР} = 0,96$;
- КПД высоковольтного ПЧ $\eta_{ПЧ} = 0,99$;
- КПД турбомуфты $\eta_{ТМ} = 0,99$;
- КПД зубчатой муфты $\eta_{ЗМ} = 0,99$.

КПД асинхронного редукторного электропривода (4.30):

$$\eta_{APЭ} = \eta_{AD} \cdot \eta_{ЦР} \cdot \eta_{ПЧ} \cdot \eta_{ТМ} \cdot \eta_{ЗМ} = 0,876. \quad (4.30)$$

КПД безредукторного синхронного мотор-барабана (4.31):

$$\eta_{БСМБ} = \eta_{СДПМ} \cdot \eta_{ПЧ} = 0,929. \quad (4.31)$$

Номинальная выходная мощность асинхронного редукторного электропривода (4.32):

$$P_{2н}^{APЭ} = P_{AD} \cdot \eta_{APЭ} = 630 \cdot 0,876 = 551,63 \text{ кВт}. \quad (4.32)$$

Номинальная выходная мощность безредукторного синхронного мотор-барабана (4.33):

$$P_{2н}^{БСМБ} = P_{СДПМ} \cdot \eta_{БСМБ} = 690 \cdot 0,929 = 640,75 \text{ кВт}. \quad (4.33)$$

Потребляемая мощность электроприводов с учетом трехступенчатого регулирования в функции входного грузопотока (4.34):

$$P_1^{ЭП} = P_{Q1} \cdot Q_1 + P_{Q2} \cdot Q_2 + P_{Q3} \cdot Q_3, \quad (4.34)$$

где P_{Q1}, P_{Q2}, P_{Q3} – входные мощности на ступенях регулирования;

Q_1, Q_2, Q_3 – доля времени, в течение которого электропривод работает на соответствующей ступени регулирования.

По (4.34) и на основании графиков мощностей (рисунки 4.11 и 4.19) выведем потребляемые мощности АРЭ и БСМБ:

$$P_1^{APЭ} = 250 \cdot 0,34 + 480 \cdot 0,47 + 630 \cdot 0,19 = 430,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$P_1^{БСМБ} = 200 \cdot 0,34 + 420 \cdot 0,47 + 690 \cdot 0,19 = 396,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Произведем сравнение технико-экономических показателей двух типов электропривода. В таблице 4.3 представлены массогабаритные параметры асинхронного редукторного электропривода с двухступенчатым цилиндрическим редуктором.

Исходя из таблицы 4.3 асинхронный редукторный электропривод мощностью 630 кВт располагается на площади $S_{APЭ} = 12,56 \text{ м}^2$ рядом с приводным

барабаном, высоковольтный ПЧ занимает минимальную площадь $S = 5,76 \text{ м}^2$. Масса преобразователя частоты не включена в таблицу, так как она одинакова для обоих типов электропривода.

Таблица 4.3 – Массогабаритные параметры АРЭ

Элемент электропривода	Габариты	Масса	Площадь
АД КЗ ВАОВ5К-630Д-6	$L = 2300 \text{ мм}$ $d_{30} = 1605 \text{ мм}$ $d_{20} = 1400 \text{ мм}$	6500 кг	$S = 3,68 \text{ м}^2$
Цилиндрический двухступенчатый редуктор	$L = 2800 \text{ мм}$ $H = 1010 \text{ мм}$ $B = 830 \text{ мм}$	4200 кг	$S = 2,32 \text{ м}^2$
Турбомуфта	$L = 650 \text{ мм}$ $D = 1120 \text{ мм}$	850 кг	$S = 0,73 \text{ м}^2$
Зубчатая муфта	$L = 290 \text{ мм}$ $D = 242 \text{ мм}$	125 кг	$S = 0,07 \text{ м}^2$
Приводной барабан	$L = 1200 \text{ мм}$ $D = 1000 \text{ мм}$	230 кг	$S = 1,2 \text{ м}^2$
Высоковольтный ПЧ	$L = 4800 \text{ мм}$ $H = 1010 \text{ мм}$ $B = 830 \text{ мм}$	-	$S = 5,76 \text{ м}^2$
Асинхронный редукторный электропривод (последовательное соединение компонентов, без ПЧ)	$L = 6040 \text{ мм}$ $H = 2400 \text{ мм}$ $B = 1200 \text{ мм}$	11905 кг	$S = 8 \text{ м}^2$

В таблице 4.4 приведены капитальные затраты для двух типов электропривода. Капитальные затраты рассчитывались специалистами производства ООО «Электромашина» в рамках заявки на грант ФСО «Старт» [20]. Указана средняя стоимость составляющих в ценах на 2019 г. В затраты на проходку выработки включены затраты на выработку для многоуровневого ПЧ 6 кВ. В капитальные затраты не включены элементы системы управления (автоматизированное рабочее место, устройства управления, датчики, переходники, кабели и т.д.). В качестве системы охлаждения для безредукторного синхронного мотор-барабана предлагается прямое жидкостное охлаждение с

деминерализованной водой в качестве хладагента. Расчет приблизительных параметров системы охлаждения представлен в Приложении В.

Таблица 4.4 – Капитальные затраты для АРЭ и БСМБ

Асинхронный электродвигатель	редукторный	Безредукторный синхронный мотор-барабан	
	Стоимость, тыс. руб.		Стоимость, руб.
АД КЗ 630 кВт	1 900	Корпус барабана с керамической футеровкой, ступицы, корпуса подшипников, подшипники, метизы	420
Металлоконструкции для установки барабана, футерованный барабан, редуктор, переходные муфты, металлоконструкции для установки электродвигателя и цилиндрический редуктор	3 200	Двигатель с системой управления и охлаждения	3 000
		Металлоконструкции для крепления мотор-барабана	260
ПЧ высоковольтный	9 700	ПЧ высоковольтный	9 700
Полная себестоимость	14800	Полная себестоимость	13380
Капитальные затраты на проходку выработки	1500	Капитальные затраты на проходку выработки	600
Итого	16300	Итого	13980

Проведем расчет эксплуатационных затрат и оценку экономического эффекта от применения одного безредукторного синхронного мотор-барабана в качестве тягового электропривода шахтного ленточного конвейера.

Стоимость удельного киловатта электроэнергии (4.35):

$$C_{кВт}^{APЭ} = \frac{16300000}{630} = 25783 \text{ руб}, \quad C_{кВт}^{БСМБ} = \frac{13980000}{690} = 20261 \text{ руб}. \quad (4.35)$$

Энергопотребление электропривода шахтного ЛК в год (4.36):

$$W_{эл} = P_1^{ЭП} t_n k_{исп}, \quad (4.36)$$

где t_n – время работы оборудования в году, ч;

$k_{исп}$ – коэффициент использования оборудования, $k_{исп} = 0,7$.

С учетом работы в 3 смены по 6 часов, 350 дней в году, $t_n = 6300$ ч.

Подставляем данные в (4.35):

$$W_{эл}^{APЭ} = 430,3 \cdot 6300 \cdot 0,7 = 1897623 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$W_{эл}^{БСМБ} = 396,5 \cdot 6300 \cdot 0,7 = 1748565 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Затраты на электроэнергию в год с учетом тарифов в Кемеровской области на 2019 год [50], из расчета 2,8 руб за 1 кВт·ч (4.37):

$$I_{эл}^{APЭ} = 1897623 \cdot 2,8 = 5313345 \text{ руб} / \text{год}, \quad (4.37)$$

$$I_{эл}^{БСМБ} = 1748565 \cdot 2,8 = 4895982 \text{ руб} / \text{год}.$$

Стоимость потерь электроэнергии в год из расчета 2,8 руб/1 кВт·ч (4.38):

$$I_{пот} = P_1^{ЭП} \frac{(1-\eta)}{\eta} t_n k_{исп} \cdot 2,8. \quad (4.38)$$

$$I_{пот}^{APЭ} = 430,3 \cdot \frac{(1-0,876)}{0,876} \cdot 6300 \cdot 0,7 \cdot 2,8 = 752117 \text{ руб} / \text{год},$$

$$I_{пот}^{БСМБ} = 396,5 \cdot \frac{(1-0,929)}{0,929} \cdot 6300 \cdot 0,7 \cdot 2,8 = 374182 \text{ руб} / \text{год}.$$

Амортизационные отчисления, 8% в год от капитальных затрат (4.39):

$$\begin{aligned}
 C_a^{APЭ} &= 16300000 \cdot 0,08 = 1304000 \text{ руб / год}, \\
 C_a^{БСМБ} &= 13980000 \cdot 0,08 = 1118400 \text{ руб / год}.
 \end{aligned}
 \tag{4.39}$$

В таблице 4.5 приведено сравнение технико-экономических показателей двух типов электропривода. Транспортные затраты, затраты на пуско-наладочные и шефмонтажные работы считаются одинаковыми.

Приведенные затраты на эксплуатацию электропривода (расчеты приведены на период 5 лет) (4.40):

$$\begin{aligned}
 Z_{np}^{APЭ} &= \frac{1}{5} KB_{APЭ} + I_{ном}^{APЭ} + C_a^{APЭ} + C_p^{APЭ} = 11179462 \text{ руб / год}, \\
 Z_{np}^{БСМБ} &= \frac{1}{5} KB_{БСМБ} + I_{ном}^{БСМБ} + C_a^{БСМБ} + C_p^{БСМБ} = 9434564 \text{ руб / год}.
 \end{aligned}
 \tag{4.40}$$

Оценочный экономический эффект от применения безредукторного синхронного мотор-барабана для тягового электропривода шахтного ленточного конвейера (4.41):

$$Ef = Z_{np}^{APЭ} - Z_{np}^{БСМБ} = 1744898 \text{ руб / год}.
 \tag{4.41}$$

Затраты на энергопотребление безредукторного синхронного мотор-барабана превышают затраты асинхронного редукторного электропривода, поскольку энергоемкость синхронного двигателя выше асинхронного, и при моделировании СДПМ была получена мощность больше заданной. При необходимости БСМБ может работать недогруженным, при коэффициенте нагрузки $\beta = 0,9\%$, в этом случае затраты на электроэнергию будут равным затратам АРЭ при меньших электрических потерях. Таким образом, при внедрении безредукторного синхронного мотор-барабана экономический эффект может составить минимум 1744,9 тыс.руб/год.

Таблица 4.5 – Сравнение приведенных затрат АРЭ и БСМБ

Показатели	Ед. изм	АРЭ	БСМБ	Эффект
1. Технические показатели				
Мощность, P_n	кВт	630	690	+60 кВт
КПД электропривода, $\eta_{эл}$	%	87,6	92,9	+5,3
Площадь, занимаемая электроприводом, $S_{эл}$	м ²	14,220	5,76	-8,46 (59,4 %)
Масса электропривода без ПЧ, $m_{эл}$	кг	11905	7200	-4705 (39,5 %)
Энергопотребление в год, $W_{эл}$	кВт·ч /год	1896723	1748565	-149058 (-7,8%)
2. Капитальные затраты				
Капитальные затраты на оборудование и выработку, KB	тыс. руб.	16300	13980	-2320 (14,2 %)
3. Эксплуатационные затраты				
Стоимость удельного киловатта, $C_{кВт}$	руб.	25873	20261	-5612 (21,7 %)
Затраты на электроэнергию, $I_{эл}$	тыс. руб./год	5313,35	4896	-417,35 (7,8%)
Стоимость обслуживания и ремонта, C_p	тыс. руб./год	550	250	-300 (45,5 %)
Стоимость амортизации (8% в год), C_a	тыс. руб./год	1304	1184	-120
Стоимость потерь электроэнергии, $I_{ном}$	тыс. руб./год	752,12	374,18	-377,94 (50,2 %)
4. Экономический эффект				
Приведенные затраты, $Z_{пр}$	тыс. руб./год	11179,5	9434,6	-1744,9 (15,6%)

4.4 Выводы и результаты по главе 4

В данной главе разработана система электропривода безредукторного синхронного мотор-барабана шахтного ленточного конвейера, регулируемого в функции входного грузопотока. На основе статистики грузопотока магистрального конвейера шахты им. С. М. Кирова (г. Ленинск-Кузнецкий) выбраны оптимальные ступени переключения скорости, разработан задатчик скорости. В результате моделирования системы электропривода БСМБ в течение 1500 с, на примере двухбарабанного электропривода установлено, что трехступенчатое регулирование скорости позволяет снизить энергопотребление до 35% в сравнении с работой на постоянной номинальной мощности.

Для дальнейшего сравнения технико-экономических показателей асинхронного редукторного электропривода и синхронного безредукторного мотор-барабана реализована модель двухбарабанного АРЭ с идентичными параметрами по выходной мощности и механическому моменту. В качестве АРЭ взят электропривод с АД КЗ 630 кВт, двумя муфтами и двухступенчатым цилиндрическим редуктором, с частотным скалярным управлением.

В результате сравнения установлено, что применение синхронного безредукторного мотор-барабана позволит уменьшить площадь, занимаемую электроприводом ленточного конвейера, на 59,4 %, снизить массу электропривода на 39,5%, повысить КПД системы электропривода за счет применения энергоемкого тихоходного СДПМ специальной конструкции и исключения механических связей на 5,3%, снизить годовое энергопотребление на 7,8%.

Оценочное значение экономического эффекта от применения энергоэффективного безредукторного мотор-барабана на базе СДПМ 690 кВт для тягового электропривода шахтного ленточного конвейера может составить более 1745 тыс.руб/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований в диссертационной работе получено решение научной задачи повышения эффективности тяговых электроприводов ленточного конвейера, имеющей значение для развития транспортных систем при добыче полезных ископаемых, и изложены новые научно обоснованные технические решения по разработке данного типа тягового электропривода ленточного конвейера, включающие безредукторный мотор-барабан на основе синхронного двигателя на постоянных магнитах с системой, регулируемый в функции грузопотока.

Основные научные и практические результаты

1. Получены параметры тихоходного СДПМ 690 кВт на основе заданных параметров привода ленточного конвейера с шахты ООО «Талдинская-Кыргайская», при разработке применялись конструкционные методы компенсации зубцового момента. Параметры тихоходного СДПМ соответствуют заданным значениям по скорости, мощности и электромагнитному моменту при заданных габаритах, КПД двигателя составляет 93,8% при номинальной мощности 690 кВт.

2. Получена математическая модель тихоходного СДПМ 690 кВт, учитывающая дополнительные пульсации зубцового момента, которые искажают значения ЭДС, тока и электромагнитного момента, и должны быть дополнительно скомпенсированы посредством системы управления.

3. Произведено теоретическое сравнение существующих систем управления СДПМ, для разработки СВУ были выбраны методы полеориентированного управления с широтно-импульсной модуляцией и прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией. По результатам моделирования, при косвенном регулировании момента в системе полеориентированного управления сохраняются пульсации $M_{эм}$ до 25% в то время, как при прямом управлении моментом пульсации $M_{эм}$ менее 10%. Установлено, что схема с прямым управлением моментом и пространственно-

векторной модуляцией, применяемая для управления БСМБ, обеспечивает выполнение всех требований, предъявляемых к СУЭП ЛК.

4. Разработана система электропривода ленточного конвейера на базе безредукторного мотор-барабана с синхронным двигателем на постоянных магнитах, регулируемого в функции грузопотока посредством задатчиков интенсивности и блоков квантования сигнала грузопотока. Установлено, что регулирование скорости в функции грузопотока позволяет экономить до 30% от суммарного энергопотребления в отличие от постоянной работы электропривода на номинальной мощности.

5. Проведено сравнение технико-экономических показателей асинхронного редукторного электропривода и безредукторного синхронного мотор-барабана одинаковой мощности. Установлено, что применение безредукторного синхронного мотор-барабана позволяет уменьшить площадь, занимаемую тяговым электроприводом, на 59,4 %, снизить его массу на 39,5%, повысить КПД системы электропривода на 5,3%. Оценочное значение экономического эффекта от применения безредукторного синхронного мотор-барабана в качестве тягового электропривода конвейера мощностью 690 кВт может составить более 1745 тыс.руб/год.

Перспективные направления дальнейших исследований:

1) Улучшение конструкции тихоходного синхронного двигателя на постоянных магнитах, увеличение коэффициента мощности.

2) Совершенствование системы управления безредукторным мотор-барабаном для снижения пульсаций при динамических нагрузках, разработка регулятора момента безредукторного мотор-барабана, построенного по принципам нечеткой логики, или прогнозирующего регулятора.

3) Моделирование работы магистрального конвейера с промежуточными электроприводами на базе безредукторного синхронного мотор-барабана с учетом натяжения ленты.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АРЭ – асинхронный редукторный электропривод

БСМБ – безредукторный синхронный мотор-барабан

ВУ – векторное управление

ЛК – ленточный конвейер

МКЭ – метод конечных элементов

МУИ – трехфазный многоуровневый инвертор

ПВМ – пространственно-векторная модуляция

ПОУ – полеориентированное управление

ПУМ – прямое управление моментом

ПЧ – преобразователь частоты

СДПМ – синхронный двигатель на постоянных магнитах

СВУ – система векторного управления

ТЭП – тяговый электропривод

ЦР – цилиндрический редуктор

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Байков, А. И.** Математическое моделирование электропривода на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами / Байков А. И., Андриухин М. В., Бобылев И. В. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2014. – № 4. – С. 33–49.
2. **Белов, М. П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / Белов М.П., Новиков А.Д., Рассудков Л.Н // Учебник для высших учебных заведений. – 3-е изд. – М.: Академия. – 2007. – 576 с. ISBN: 978-5-7695-4497-2.
3. **Белов, М. П.** Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации / Белов М. П., Зементов О. И., Козярук А. Е // М.: Издат. центр «Академия». – 2006. – 368 с. – ISBN: 5-7695-2448-0.
4. **Бишеле, И. В.** Выбор рациональных ступеней регулирования скорости конвейера по грузопотоку / Бишеле И. В., Нгуен Монг Хунг // Горные машины и автоматика. – 1969. – №2. – с. 52-54. – URL: <http://masters.donntu.org/2006/fema/dyadyushkin/library/1.htm> (дата обращения: 10.09.2020)
5. **Виноградов, А. Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново: Изд-во ИГЭУ. – 2008. – 298 с. – URL: <http://vectorgroup.ru/articles/book1> (дата обращения: 20.09.2020)
6. **Волотковский, В. С.** Износ и долговечность конвейерных лент / Волотковский В. С., Нохрин Е. Г., Герасимова М. Ф. / М.: Недра. – 1976. – 176 с.
7. **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Машины переменного тока / Вольдек А. И., Попов В. В. // Учебник для вузов. – СПб.: Питер. – 2008. – 350 с. – ISBN: 978-5-469-01381-5.

8. **Гольдберг, О. Д.** Проектирование электрических машин / Гольдберг О. Д., Свириденко И. С. // Учебник для вузов, изд. 3-е, перераб. М.: Высш. шк. 2006. – 431 с. – ISBN: 5-06-005673-2.
9. **ГОСТ 31558-2012.** Конвейеры шахтные ленточные. Общие технические условия = Mine belt conveyers. General specifications : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2012 г. N 1086-ст : введен впервые : дата введения 01.01.2014 / Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Введ. 24.12.2012. – Москва: Стандартинформ, 2012.
10. **Гулько, Ф. Б.** Метод оптимального управления с прогнозированием / Гулько Ф. Б., Коган Б. Я. // Москва: [б. и.] – 1963. – Т. 2. – 153 с.
11. **Дмитриева, В. В.** Разработка математической модели ленточного конвейера с двухдвигательным приводом / Дмитриева В. В., Гершун В. В. // ГИАБ. – 2008. – № 8 – С. 295-303.
12. **Дмитриева, В. В.** Поддержание величины тягового фактора ленточного конвейера с двухдвигательным приводом / Дмитриева В. В., Каунг П. // ГИАБ. – 2015. – № 6. – С. 189–198.
13. **Дьяченко, В. П.** Методы описания величины случайного грузопотока ленточных конвейеров горных предприятий на основе ее эмпирических распределений // ГИАБ. – 2007. – №3. – С. 287–289.
14. **Евстратов, А. Э.** Управление электромагнитным моментом электропривода горных машин: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Евстратов Андрей Эдуардович; Томский государственный политехнический университет. – Томск, 2016. – 18 с. – Библиогр.: с. 16-18.
15. **Ещин, Е. К.** Моделирование электромеханических систем горных машин // Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева. – 2013. – 184 с.

16. **Журавлев, С. В.** Линейные синхронные двигатели с редкоземельными постоянными магнитами: специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Журавлев Сергей Владимирович; Москва: Мос. авиа. институт. – 2005. – 231 с.
17. **Завьялов, В. М.** Дифференциальное управление моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами / *Завьялов В. М., Абд Эль Вхаб А.* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – №1. – с.8–15.
18. **Завьялов, В. М.** Градиентное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2008. – № 3. – с. 71–72.
19. **Зарицкая, Е. И.** Оценка влияния конфигурации магнитной системы на характеристики тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами / Зарицкая Е. И., Прыймак М. В., Олейников А. М. // Електротехніка і Електромеханіка. – 2012. – №1. – с. 28–32.
20. Заявка № 13-6-Н4.22-0233-1-С. Разработка приводной станции на основе мотор-барабана / Нестеров Д. В., Семькина И. Ю., Забабурин М. С., Тарнецкая А. В. // Кемерово. – 2016.
21. **Изосимов, Д. Б.** Использование скользящих режимов в задачах управления электрическими машинами / Изосимов Д. Б., Матич Б., Уткин В., Шабанович А. // Докл. АН СССР, т. 241. – 1978. – № 4 – С. 769–772. URL: <http://www.mathnet.ru/links/d28aead6e79e13928598cd6fd8b3ec0f/dan41884.pdf> (дата обращения 20.09.2020)
22. **Изосимов, Д. Б.** Скользящий режим управления в тиристорном электроприводе постоянного тока / *Изосимов Д. Б., Лившиц Я. М.* // Электро- и гидропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов (под редакцией В. А. Кудинова). – М.: ОНТИ ЭНИМС. – 1982 – с. 50–62.
23. **Израйлевич, М. Л.** Основные преимущества ленточных конвейеров. *Trakon Group* — производство конвейеров, транспортеров, рольгангов,

- конвейерных систем. – URL: <http://www.trak-on.ru/files/articles-3.pdf> (дата обращения 20.10.2019); режим доступа: свободный, [текст. электронный]
24. К выбору типа регулятора для решения задачи управления электромагнитным приводом / Шайхутдинов Д. В., Дубров В. И., Леухин Р. И., Наракидзе Н. Д., Щучкин Д. А., Январев С. Г. // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 10. – С. 107-116.
25. **Калачев, Ю. Н.** Векторное регулирование (заметки практика). Методическое пособие. – М.: ЭФО. – 2013. – 63 с. – URL: http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/KALACHEV.pdf (дата обращения: 20.09.2020)
26. **Каунг Пьей Аунг.** Разработка и исследование системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера: специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: диссертация на соискание ученой степени кандидата педагогических наук / Каунг Пьей Аунг ; Москва, 2018. – 112 с.
27. **Кацман, М. М.** Электрические машины, 12-е изд. / М. М. Кацман // Учебник для высших учебных учреждений. – Москва, 2013. – 496 с. – ISBN: 978-5-7695-9705-3.
28. **Каширских, В. Г.** Формирование алгоритма управления плавным пуском асинхронного электродвигателя на основе метода скоростного градиента / Каширских В. Г., Завьялов В. М., Переверзев С. С. // *Вестник КузГТУ*. – Кемерово, 2005. – № 2. – с. 7–9.
29. **Кирия, Р. В.** Моделирование динамических процессов пуска ленточного конвейера // *Геотехническая механика*. – Донецк, 2007. – № 67. – с. 95-101. – URL: http://masters.donntu.org/2013/etf/baklanov/library/The_computer_simulation_of_the_start_conveyor_belt.pdf (дата обращения: 20.09.2020)
30. **Ключев, В. И.** Теория электропривода. Учебник для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 2001. – 704 с. – ISBN: 5-283-00642-5.

31. **Ковальчук, С. Н.** Анализ факторов, сокращающих срок службы редукторов скребковых конвейеров // Вестник КузГТУ. – Кемерово, 2012. – № 6. – с. 62-64.
32. **Кожубаев, Ю. Н.** Анализ динамических процессов в ленточных конвейерах // Научно-технические ведомости СПбГПУ; Серия: Наука и образование. – Санкт-Петербург, 2009. – № 4-2. – С. 103-107.
33. **Кондрахин, В. П.** Измерение грузопотока на ленточном конвейере с помощью съемного тензоизмерительного устройства с учетом натяжения ленты / Кондрахин В. П., Стадник Н. И., Белицкий П. В. // Горная электромеханика. – 2013. – № 1. – 79-87 с. – URL: <http://ea.donntu.org:8080/bitstream/123456789/25254/1/79-87.pdf> (дата обращения: 20.09.2020)
34. **Копылов, И. П.** Математическое моделирование электрических машин. – Москва: Высшая школа. – 2001. – 327 с. – ISBN: 5-06-003861-0.
35. **Коршунов, А. И.** Равноускоренный частотный пуск синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе // Силовая электроника. – Москва, 2007. – № 1. – С. 36-40. – URL: https://power-e.ru/wp-content/uploads/2007_01_58.pdf (дата обращения: 20.09.2020)
36. **Кузин, Е. Г.** Диагностика технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров / Кузин Е. Г, Герике Б. Л. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – с. 47-55.
37. **Ледовский, А. Н.** Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 168 с.
38. Ленточные конвейеры в горной промышленности / Дьяков В. А., Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. и др. // М.: Недра. – 1982. – 349 с.
39. **Малашкина, В. А.** Анализ факторов, определяющих возгорание на шахтных ленточных конвейерах на ранней стадии / Малашкина В. А., Перекатов С. С. // ГИАБ. – 2013. – №11. – С. 184-189.
40. **Мартынов, В. А.** Математическое моделирование режимов работы многофазных синхронных двигателей с постоянными магнитами /

- Мартынов В. А., Голубев А. Н., Алейников А. В. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – № 2. – с. 62-66.
41. **Мартынов, М. В.** Автоматизированный электропривод в горной промышленности / Мартынов М. В., Переслегин Н. Г. // – Москва: Недра. – 1977. – 375 с.
42. **Мерцалов, Р. В.** Исследования подземных грузопотоков и установление способов повышения эффективности использования шахтных конвейеров: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мерцалов Ростислав Владимирович; Московский горный институт. – Москва, 1968. – 159 с. – Текст : непосредственный.
43. Обзор рынка ленточных конвейерных систем в России / INFOMINE Research Group; изд-е №2. – Москва. – 2013. – URL: www.infomine.ru (дата обращения 20.09.2020)
44. Отчет по первому этапу научно-исследовательской работы № 203-2015 «Разработка модульного преобразователя частоты шахтного назначения» / Семькина И. Ю., Григорьев А. В., Гаргаев А. В., Немов В. Н. и др // – Кемерово: КузГТУ. – 2016. – 100 с.
45. **Папоян, Р. Л.** Повышение эффективности использования шахтных конвейерных линий автоматическим, регулированием скорости и определением грузопотоков : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Папоян Рубен Левонович ; – Москва, 1967. – 213 с. – Текст : непосредственный.
46. **Перельмутер, В. М.** Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока // Научное издание. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с. – ISBN: 5-7768-0811-1.
47. **Петков, О. Н.** Разработка и исследование системы автоматического управления скоростью ленточного конвейера по входному грузопотоку: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петков Орфей Николаев; Московский горный институт. – Москва, 1984. – 143 с. – Текст : непосредственный.

48. **Полунин, В. Т.** Эксплуатация мощных ленточных конвейеров / Полунин В. Т., Гуленко Г. Н // Москва: Недра. – 1986. – 344 с.
49. **Прокуда, В. М.** Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта Павлоградская» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» / Прокуда В. М., Мишанский Ю. А., Проценко С. Н. // Горная электромеханика. – 2012. – №88. – 107-111 с.
50. **Региональная Энергетическая Комиссия Кемеровской Области. Постановление.** Об установлении индивидуальных тарифов на услуги по передаче электрической энергии для взаиморасчетов между сетевыми организациями Кемеровской области на 2019 год. [принят РЭК Кемеровской области от 28 февраля 2019 г. № 58]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/553154650> (дата обращения 13.11.2019)
51. **Рефки Абд Эль Вхаб Амр.** Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / Рефки Абд Эль Вхаб Амр, Каракулов Ю. Н., Дементьев Ю. Н., Кладиев С. Н. // Известия ТПУ. – 2011. – №4. – С. 93-99.
52. **Семыкина, И. Ю.** Градиентное управление в решении основных задач электропривода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 1. – С. 99-103.
53. **Семыкина, И. Ю.** Системы управления электроприводов // Кемерово: КузГТУ. – 2010. – 140 с. URL: <http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90678&type=utchposob:common>; Режим доступа: только для зарегистр. пользователей.
54. **Семыкина, И. Ю.** Система управления электроприводом ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана / И. Ю. Семыкина, А. В. Тарнецкая // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 1. – С. 47-53.
55. **Семыкина, И. Ю.** Компенсация зубцового момента высокоомощного тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами / И. Ю. Семыкина, А. В. Тарнецкая // Сборник материалов III всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория

и практика», 13-15 декабря 2017. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2017/energ/pages/Articles/319.pdf> (дата обращения 20.09.2020)

56. **Семыкина, И. Ю.** Задачи управления синхронным электроприводом безредукторного мотор-барабана ленточного конвейера / И. Ю. Семыкина, А. В. Тарнецкая // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017: сборник трудов Международной научно-практической конференции, 23-24 марта 2017. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. – С. 209-211.

57. **Семыкина, И. Ю.** Система векторного управления безредукторным синхронным мотор-барабаном ленточного конвейера / И. Ю. Семыкина, А. В. Тарнецкая // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018: сборник тезисов Международной научно-практической конференции, 12-13 апреля 2018. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. – С. 38-39.

58. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / Галкин В. И., Дмитриев В. Г., Дьяченко В. П., Запенин И. В., Шешко Е. Е. // – М.: Изд. МГГУ. – 2005. – 543 с. – ISBN: 5-7418-0389-X.

59. **Соколов, М. М.** Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов // Учебник для высших учебных заведений. Изд. 3-е, переработ. и доп. – М.: Энергия. – 1976. – 488 с.

60. **Солодовников, В. В.** Синтез корректирующих устройств следящих систем при помощи оптимальных и типовых логарифмических частотных характеристик // Автоматика и телемеханика, 1953. – 109 с.

61. **Тарасов, Ю. Д.** Промежуточные приводы ленточных конвейеров / Тарасов Ю. Д., Юнгмейстер Д. А., Авдеев В. А. // – Москва: Недра. – 1996. – с.18-19.

62. **Тарнецкая, А. В.** Современные бездатчиковые методы оценивания положения неподвижного ротора синхронного двигателя с постоянными

магнитами / Тарнецкая А. В., Семькина И. Ю. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 2. – С. 126-132.

63. **Тарнецкая, А. В.** Актуальность разработки безредукторного мотор-барабана с синхронным двигателем для шахтных ленточных конвейеров / Тарнецкая А. В., Семькина И. Ю. // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, 2015. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/3/Tarneckaja.pdf> (дата обращения 20.09.2020)

64. **Тарнецкая, А. В.** Проблемы моделирования пуска синхронных двигателей с постоянными магнитами / Тарнецкая А. В., Семькина И. Ю. // Энергостарт: сборник материалов всероссийской научно-практической школы, 11-25 июля 2016. – Кемерово: КузГТУ, 2016. – URL: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2016/es/energstart/pages/Articles/3/Tarnetckaia_Semykina.pdf (дата обращения 20.09.2020)

65. **Тарнецкая, А. В.** Управление синхронным двигателем с постоянными магнитами безредукторного мотор-барабана ленточного конвейера / И.Ю. Семькина, А.В. Тарнецкая // «Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения»: сборник трудов II Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 2017. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – С. 408.

66. **Терехов, В. М.** Системы управления электроприводов / Терехов В. М., Осипов О. И. // Учебник для студ. высш. учеб. заведений, 2-е изд.– М.: Издательский центр «Академия». – 2006. – 304 с. – ISBN: 5-7695-2911-3

67. **Томасов, В. С.** Алгоритмы компенсации пульсаций момента прецизионного электропривода на базе синхронной машины с постоянными магнитами / Томасов В. С., Ловлин С. Ю., Егоров А. В. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2. – с. 77-84.

68. **Топорков, Д. М.** Зубцовые пульсации момента в машинах с дробными обмотками и возбуждением от постоянных магнитов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Топорков Дмитрий Михайлович ; Новосибирск, 2016. – 20 с.
69. **Уткин, В. И.** Скользящие режимы и их применения в системах с переменной структурой. – М.: Наука. – 1974. – 272 с.
70. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / 67. Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. // Учеб. пособие. – Мн.: ЗАО "Техноперспектива". – 2007. – 568 с. – ISBN: 978-985-6591-46-7.
71. **Фрадков, А. Л.** Схема скоростного градиента и ее применение в задачах адаптивного управления // Автоматика и телемех. – 1977. – № 9. – С. 90-101.
72. **Шахмейстер, Л. Г.** Динамика грузопотока и регулирование скорости ленточных конвейеров / Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г., Лобачева А. К // – Московский горный институт, 1972. – 163 с.
73. **Шахмейстер, Л. Г.** Элементы статистической динамики транспортных машин / Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г.// Учеб. пособие – М-во высш. и сред. спец. образования СССР. Моск. горный ин-т., 2 т. – 1970-1974.
74. **Шрейнер, Р. Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН. – 2000. – 654 с. – ISBN: 5-7691-1111-9.
75. **Ameur, A.** Speed Sensorless Direct Torque Control of a PMSM Drive using Space Vector Modulation Based MRAS and Stator Resistance Estimator / A. Ameur, B. Mokhtari, N. Essounbouli, L. Mokrani // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering. – №6. – 2012. – pp. 774-779. – DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1075142.
76. **Anvesha, P.** Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor. National institute of technology // Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela. – 2014. – 36 p. – URL: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/6175/1/110EE0215-1.pdf> (дата обращения 20.09.2020)

77. **Balamurali, A.** Maximum Efficiency Control of PMSM Drives Considering System Losses Using Gradient Descent Algorithm Based on DC Power Measurement / A. Balamurali, G. Feng, Ch. Lai. // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2018. – pp. 99-110. – DOI: 10.1109/TEC.2018.2852219.
78. **Barbanti, D.** Difference between drum motors and gear motors for food conveying. – URL: <https://www.motion-controltips.com/difference-drum-motors-gear-motors-food-conveying> (дата обращения 05.11.2019)
79. **Busca, C.** Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application: Master thesis. Aalborg, Denmark.: Aalborg universitet. – 2010. – 119 p.
80. **Bowen, C.** Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drives / C. Bowen, Zh. Jihua, R. Zhang // Electrical Machines and Systems, ICEMS. Proceedings of the Fifth International Conference. – 2001. – №.5 – pp. 905-908. – DOI: 10.1109/ICEMS.2001.971825.
81. **Carrillo Arroyo, E.** Modeling and simulation of Permanent magnet synchronous motor drive system: a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in electrical engineering ; University of Puerto Rico Mayagüez Campus, 2006. – 84 p.
82. **Chai, Sh.** Model predictive control of a permanent magnet synchronous motor with experimental validation / Sh. Chai, L. Wang, E. Rogers // Control Engineering Practice 21. – 2013. – pp. 1584–1593. – URL: <https://eprints.soton.ac.uk/355044/> (дата обращения 20.09.2020)
83. **Chaithongsuk, S.** Design and Construction of a Permanent Magnet Synchronous Motor // Electrical Engineering Graduate College King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. – 2006. – 68 p.
84. **Cross, G.** Belt conveyors. Starting methods. Magna Engineering. – 2015. – № 3.
85. Direct Drive Drum Motor, Magnetic Innovations.
86. **Dong, J.** A Sliding Mode Observer for PMSM speed and rotor position considering saliency / Dong J., Zh. Zhao, F. Wang // Power Electronics Specialists Conference. – 2008. – pp. 809-814. – DOI: 10.1109/PESC.2008.4592029.

87. Elevator Drive For Gearless Synchronous Motor. Yaskawa group. – URL: http://www.yaskawaindia.in/wp-content/uploads/2017/02/8_Casestory_L1000_with_synchronous_motor.pdf (дата обращения: 20.09.2020)
88. **Fiscor, S.** Xstrata Invests in Gearless Conveyor Drives// Engineering & Mining Journal. – 2011. – № 6. – URL: <http://www.womp-int.com/story/2011vol05/story026.htm> (дата обращения: 20.09.2020)
89. Gearless AC Synchronous Permanent Magnet Machines, Imperial Electric. – URL: http://www.imperialelectric.com/pdfs/imperial_brochure_gearless_ac.pdf (дата обращения: 20.09.2020)
90. **Hadjipanayis, G.S.** Science and Technology of Modern Permanent Magnet Materials. – American Physical Society, APS March Meeting 2012, USA. – 2012. – URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012APS..MAR.Y2004H/abstract> (дата обращения: 20.09.2020)
91. Interroll presents the most powerful synchronous drum motor. – URL: <https://www.interroll.com/en/press/detail-page/article/interroll-presents-the-most-powerful-synchronous-drum-motor/> (дата обращения: 20.09.2020)
92. **Jahns, T. M.** Interior permanent-magnet synch-ronous motors for adjustable-speed drives / T. M. Jahns, J. B. Kliman, T. W. Neumann // IEEE Transactions on Industry Applications, IA-22. – 1986. – pp. 678-690.
93. **Jyoti, A.** Steady-State Analysis and Comparison of Control Strategies for PMSM / Agrawal Jyoti, Sanjay Bodkhe // Hindawi, Modelling and Simulation in Engineering. – 2015. – URL: <https://www.hindawi.com/journals/mse/2015/306787/> (дата обращения: 20.09.2020)
94. **Kanaris, A.** The Energy Savings & Performance Gains between two Conveyor Drive Designs. Van der Graaf Drum-motors. – 2016. – URL: <http://cdn.modexshow.com/seminars/assets-2016/1095.pdf> (дата обращения 20.09.2020)
95. **Kim, J-M.** Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation / J. M. Kim, S. K. Sul // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1997. – №3. – pp. 43-48.

96. **Kubo, K.** Disturbance torque compensated speed observer for digital servo drives / Kubo, K., Watanabe, M., Kozawa, F., Kawasaki, K. // 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. – 1990. – pp. 1182–1187. – DOI: 10.1109/IECON.1990.149304.
97. **Lauhoff, H.** Speed Control on Belt Conveyors – Dose it Really save Energy? // Bulk Solids Handling. – 2005. – № 6. – pp. 368-377.
98. **Lu, Zh.** Design of Line-Start Low Speed and High Torque PMSM for Gearless Drive System / Zhongshu Lu, Zhang Aijun, Ma Lie, Li Siyang // Power Electronics and Motion Control Conference. – 2009. – DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073573.
99. **Ma, S.H.** Study on the application of permanent magnet synchronous motors in underground belt conveyors // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – № 253. – DOI: 10.1088/1757-899X/283/1/012006.
100. **Maamoun, A.** Space-Vector PWM Inverter Feeding a Permanent-Magnet Synchronous Motor / A. Maamoun, Ya. Arafa, A. Shaltout // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering Vol.4. – 2010. – pp. 627-631.
101. **Martínez, D.** Design of a Permanent Magnet Synchronous Machine with Non-Overlapping Concentrated Windings // School of Electrical Engineering Department of Electrical Energy Conversion, XR-EE-E2C. – 2012. – 114 p.
102. **Mirahki, H.** Torque Calculation in Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Using Improved Lumped Parameter Models / Hooshang Mirahki, Mehdi Moallem // Progress In Electromagnetics Research. – 2014. – № 39. – pp. 131–139.
103. **Morimoto, S.** Current phase control methods for permanent magnet synchronous motors / Morimoto S., Takeda Y., Hirasa T. // IEEE Transactions on Power Electronics 5(2). – 1990. – pp. 133-139. – DOI: 10.1109/63.53150.
104. **Munoz, D.V.** Design, Simulation And Implementation Of A PMSM Drive System: a thesis for the Degree of Master of Science in Engineering. – 2011. – 87 p.
105. **Nakamura, T.** A low-speed high-torque permanent magnet synchronous motor. Reducing cogging torque and eddy-current loss / T. Nakamura, T. Koseki, Y. Aoyama // – Tokyo: Koseki Laboratory Report. – 2011.

106. **Ocen, D.** Direct Torque Control of a Permanent Magnet synchronous Motor: Master's Degree Project, Stockholm, Sweden. – 2005. – p. 61.
107. Overland conveyors: getting the workhorse right // Coal International. – 2015. – № 3.
108. **Polikarpova, M.** Liquid cooling solutions for rotating permanent magnet synchronous machines: Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology) ; Acta Universitatis Lappeenrantaensis. – 2014. – pp. 117-147.
109. **Ponomarev, P.** Thermal Modeling of Directly-Oil-Cooled Permanent Magnet Synchronous Machine / P. Ponomarev, M. Polikarpova, J. Pyrhönen // Electrical Machines (ICEM) – 2012. – DOI: 10.1109/ICEIMach.2012.6350138.
110. **Pyrhönen, J.** Permanent magnet synchronous machine. Electrical drives. – LUT, Department of Electrical Engineering. – 2015. – 29 p.
111. **Qian Liu.** A finite control set model predictive direct torque control for the PMSM with MTPA operation and torque ripple minimization / Q. Liu, K. Hameyer // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference. – 2015. – pp. 804-810. – DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409152.
112. **Qinghua, L.** Analysis, Design And Control Of Permanent Magnet Synchronous Motors For Wide-Speed Operation: a Thesis Submitted For The Degree Of Doctor Of Philosophy Department Of Electrical Engineering; National University Of Singapore, 2005. – p. 210.
113. **Rahman, M. F.** Comparison of Torque Responses of the Interior Permanent Magnet Motor under PWM Current and DTC / Rahman M.F, Zhong L. // University of New South Wales Sydney, Australia. – 1999. – pp. 1464-1470. – DOI: 10.1109/IECON.1999.819440.
114. **Rahman, M. F.** Modelling of permanent magnet synchronous motors / Rahman, M., Sebastian, T., Slemon, G. // IEEE Transactions on Magnetics, № 22. – 1986. – pp. 1069-1071. – DOI: 10.1109/TMAG.1986.1064466.
115. **Rashid, M. H.** Power electronics handbook. San Diego: Academic Press. – 2001. – 895 p. – ISBN-13: 978-0125816502.

116. **Rathmann, B.** Mining conveyor systems solution portfolio // ABB – BU-Minerals, MTC Material Handling Germany. – 2015. – URL: https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/chile-documentos/novenas-jornadas-tecnicas-2015/pa/boris-rathmann---conveyorportfolio_rev6a_br.pdf?sfvrsn=2 (дата обращения 20.09.2020)
117. **Ryvkin, S.** Sliding mode for synchronous electric drive // CRC Press. – 2011. – 208 p. – ISBN-13: 978-0415690386.
118. **Semykina, I. Yu.** Control of energy efficient belt conveyor gearless drummotor / I. Yu. Semykina, A.V. Tarnetskaya // Energy Web and Information Technologies. – 2019. – Iss. 21. – DOI: 10.4108/eai.13-7-2018.156435.
119. **Semykina, I. Yu.** Magnet Synchronous Machine of Mine Belt Conveyor Gearless Drum-Motor / I. Yu. Semykina, A.V. Tarnetskaya // Environment, Energy and Earth Sciences (E3S) Web of Conferences. – 2018. – № 41. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103014>.
120. SIMINE Gearless Conveyor Drives Siemens AG. – URL: https://www.phoenix-conveyorbelts.com/pages/press-themes/success-stories/download/minerals-focus-2-2013-en_page-67_E20001-F350-T195-X-7600.pdf (дата обращения 20.09.2020)
121. **Siami, M.** A Comparative Study Between Direct Torque Control and Predictive Torque Control for Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machines / M. Siami, A. Gholamian, M. Yousefi // Journal of Electrical Engineering. – 2013. – № 6. – pp. 346-353. – DOI: <https://doi.org/10.2478/jee-2013-0052>.
122. **Siva Krishna, D.** Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Direct Torque Control Method / Siva Krishna D., Srinivasa Rao C. // International Journal of Advances in Science and Technology. – 2011. – No.3.
123. **Skvarenina, T. L.** The power electronics handbook // CRC Press. – 2002. – 664 p. – ISBN-13: 978-0849373367.
124. **Strnat, K. J.** Modern Permanent Magnets for Applications in Electro-Technology // IEEE, Vol. 78. – 1990. – № 6 – pp. 923-930. – DOI: 10.1109/5.56908.

125. **Subin, V. S.** Sensorless control of Permanent Magnet Synchronous Motor at low speed: a thesis for the Degree of Master of Science in Engineering ; Delft University of Technology. – 2012. – 74 p.
126. **Swierczynski, D.** Direct torque control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) using space vector modulation (DTC-SVM)-simulation and experimental results / D. Swierczynski, M. P. Kazmierkowski // IEEE. – 2012. – pp. 751-755. – DOI: 10.1109/IECON.2002.1187601.
127. **Tang, M.** On Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Current Predictive Compensation / M. Tang, Sh. Zhuang // Energies. – 2019. – № 12. – DOI: 10.3390/en12010065.
128. **Tarnetskaya, A. V.** The control method selection for the slow-moving permanent magnet synchronous motor used in the belt conveyor electric drive for the underground mining / A.V. Tarnetskaya, I.Yu. Semykina // Integrated Innovative Development Of Zarafshan: Achievements, Problems, Prospects. Tashkent. – 2017. – pp. 175-180.
129. **Tüysüz, A.** Advanced cooling methods for high-speed electrical machines / A. Tüysüz, F. Meyer, M. Steichen, Ch. Zwyszig, J. W. Kolar // IEEE transactions on industry applications. – 2017. – №53. – pp. 2077-2087. – DOI:10.1109/TIA.2017.2672921.
130. Variable-speed drives for belt-conveyor systems // ABB Process Industries – Open Pit Mining & Materials Handling, Cottbus, Germany. – 2000. – №11. – URL: https://library.e.abb.com/public/b353080c210c00af832573fc005038b6/Project_Report_VSD_on_Conveyors.pdf (дата обращения 20.09.2020)
131. **Wallmark, O.** Control of Permanent-magnet Synchronous Machines in Automotive Applications: Doctoral thesis; Chalmers University of Technology, Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola. – 2006. – 96 p.
132. **Wang, Gaolin.** Low Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Instantaneous Speed Estimation / Wang G., Xu D., Yong Yu, Ming Yang // IEEE. – 2006. – pp. 8033-8036. – DOI: 10.1109/WCICA.2006.1713537.

133. **Wang, M-S.** Adaptive Low-speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motors / M-S Wang, Y-Sh Kung, Nguyen Thi Hanh, Chia Ming Chang // *Electric Power Components and Systems*. – 2011. – №6. – pp. 563-575. DOI: 10.1080/15325008.2010.528546.
134. **Yang Yu.** Low speed control and implementation of permanent magnet synchronous motor for mechanical elastic energy storage device with simultaneous variations of inertia and torque / Z. Mi, X. Guo, Y. Xu, T. Zhao // *IET Electr. Power Appl.* – 2016. – № 10. – pp. 172–180. – DOI: 10.1049/iet-epa.2015.0159.
135. **Zhang, Yo.** Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor With Reduced Torque Ripple and Commutation Frequency / Yongchang Zhang, Jianguo Zhu // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2011. – № 1. – pp. 235-248. – DOI: 10.1109/TPEL.2010.2059047.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Конструктивные параметры тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами 690 кВт

В таблице А.1 приведены конструктивные параметры тихоходного СДПМ 690 кВт, полученные при моделировании с помощью МКЭ в программах Infolytica MotorSolve и MagNet. Конструкция СДПМ – прямая, тип ротора – с поверхностными радиальными ПМ.

Таблица А.1 – Конструктивные параметры тихоходного СДПМ 690 кВт

Название параметра	Значение и ед. изм.
Основные размеры	
Внешний диаметр статора	1000 мм
Внутренний диаметр статора	675,5 мм
Толщина воздушного зазора	5,56 мм
Длина статора	1200 мм
Постоянные магниты	
Количество ПМ (количество полюсов)	12
Толщина ПМ	6,47 мм
Магнитный угол	20 °
Зубцовая зона статора	
Количество пазов	72
Глубина паза	45,02 мм
Ширина паза	3,26 мм
Толщина зубцовых наконечников	2,45 мм
Толщина зубца	11,6 мм
Площадь паза без изоляции	954,9 мм ²
Толщина пазовых клиньев	0,77 мм
Распределенная обмотка	
Число фаз	6
Количество слоев обмотки	2
Тип соединения	Звезда
Число параллельных ветвей	2
Вид обмотки	Петлевая
Шаг обмотки	6
Способ намотки	Виток к витку
Толщина изоляционного слоя между витками	0,47 мм
Площадь поперечного сечения проводника	1,135 мм ²
Коэффициент заполнения обмотки	80%

Продолжение таблицы А.1

Название параметра	Значение и ед. изм.
Количество витков w	880
Длина витка	2850 мм
Материалы	
Материал постоянных магнитов	Ceramic 10
Материал магнитопровода ротора	M-19 29 Ga
Материал спинки статора	M-19 29 Ga
Материал зубцов статора	M-19 29 Ga
Материал обмотки	Copper: 100% IACS
Материал изоляции	Epoxy Resin
Материал вала, муфт, фланцевых соединений	CR10: Cold rolled 1010 steel
Среда в воздушном зазоре	Воздух

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчет коэффициентов матриц

Расчет коэффициентов матриц для решения системы дифференциальных уравнений из математической модели ТЭП ЛК с двумя безредукторными синхронными мотор-барабанами (4.24-4.25) в программном пакете Matlab Simulink. Схема математической модели показана на рисунках 4.12-4.13.

$$M = \begin{bmatrix} 2m_2 + 2m_n + m_{np1} & m_2 & 0 & 0 & m_n & 0 \\ m_2 & 4m_2 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 2m_2 + 2m_n & m_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_n & 4m_n & m_n & 0 \\ m_n & 0 & 0 & m_n & 2m_n + 2m_m + m_{np2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{Hy} / g \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 2\eta & -\eta & 0 & 0 & -\eta & 0 \\ -\eta & 2\eta & -\eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\eta & 2\eta & -\eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\eta & 2\eta & -\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\eta & 2\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, G_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_{Hy} \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 2C & -C & 0 & 0 & -C & 0 \\ -C & 2C & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C & 2C + 0,25C_k & -C - 0,25C_k & 0 & -0,5C_k \\ 0 & 0 & -C - 0,25C_k & 2C + 0,25C_k & -C & 0,5C_k \\ -C & 0 & 0 & -C & 2C & 0 \\ 0 & 0 & -0,5C_k & 0,5C_k & 0 & C_k \end{bmatrix}, P_1 = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 2m_2gw_c + 3m_n gw_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6m_2gw_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3m_2gw_c + 3m_n gw_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6m_n gw_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6m_n gw_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{Hyf} \end{bmatrix}$$

Алгоритм расчета значений коэффициентов уравнений:

$M1 = inv(M)$; % получение обратной матрицы

$MN = M1 * N$;

$MC = M1 * C1$;

% Коэффициенты матрицы A

$A11=MN(1,1)$; $A12=MN(1,2)$; $A13=MN(1,3)$; $A14=MN(1,4)$; $A15=MN(1,5)$;

$A16=MN(1,6)$; $A21=MN(2,1)$; $A22=MN(2,2)$; $A23=MN(2,3)$; $A24=MN(2,4)$;

$A25=MN(2,5)$; $A26=MN(2,6)$; $A31=MN(3,1)$; $A32=MN(3,2)$; $A33=MN(3,3)$;

$A34=MN(3,4)$; $A35=MN(3,5)$; $A36=MN(3,6)$; $A41=MN(4,1)$; $A42=MN(4,2)$;

$A43=MN(4,3)$; $A44=MN(4,4)$; $A45=MN(4,5)$; $A46=MN(4,6)$; $A51=MN(5,1)$;

$A52=MN(5,2)$; $A53=MN(5,3)$; $A54=MN(5,4)$; $A55=MN(5,5)$; $A56=MN(5,6)$;

$A61=MN(6,1)$; $A62=MN(6,2)$; $A63=MN(6,3)$; $A64=MN(6,4)$; $A65=MN(6,5)$;

$A66=MN(6,6)$;

$A17=MC(1,1)$; $A18=MC(1,2)$; $A19=MC(1,3)$; $A110=MC(1,4)$; $A111=MC(1,5)$;

$A112=MC(1,6)$; $A27=MC(2,1)$; $A28=MC(2,2)$; $A29=MC(2,3)$; $A210=MC(2,4)$;

$A211=MC(2,5)$; $A212=MC(2,6)$; $A37=MC(3,1)$; $A38=MC(3,2)$; $A39=MC(3,3)$;

$A310=MC(3,4)$; $A311=MC(3,5)$; $A312=MC(3,6)$; $A47=MC(4,1)$; $A48=MC(4,2)$;

$A49=MC(4,3)$; $A410=MC(4,4)$; $A411=MC(4,5)$; $A412=MC(4,6)$; $A57=MC(5,1)$;

$A58=MC(5,2)$; $A59=MC(5,3)$; $A510=MC(5,4)$; $A511=MC(5,5)$; $A512=MC(5,6)$;

$A67=MC(6,1)$; $A68=MC(6,2)$; $A69=MC(6,3)$; $A610=MC(6,4)$; $A611=MC(6,5)$;

$A612=MC(6,6)$;

$MS = M1 * S$;

% Коэффициенты матрицы B

$B11=MS(1,1); B12=MS(1,2); B13=MS(1,3); B14=MS(1,4); B15=MS(1,5);$
 $B16=MS(1,6); B21=MS(2,1); B22=MS(2,2); B23=MS(2,3); B24=MS(2,4);$
 $B25=MS(2,5); B26=MS(2,6); B31=MS(3,1); B32=MS(3,2); B33=MS(3,3);$
 $B34=MS(3,4); B35=MS(3,5); B36=MS(3,6); B41=MS(4,1); B42=MS(4,2);$
 $B43=MS(4,3); B44=MS(4,4); B45=MS(4,5); B46=MS(4,6); B51=MS(5,1);$
 $B52=MS(5,2); B53=MS(5,3); B54=MS(5,4); B55=MS(5,5); B56=MS(5,6);$
 $B61=MS(6,1); B62=MS(6,2); B63=MS(6,3); B64=MS(6,4); B65=MS(6,5);$
 $B66=MS(6,6);$
 $M1G=M1*G1;$
 $M1G6=M1G(6,1);$
 $M1P=M1*P1;$
% Коэффициенты матрицы MP1
 $MP11=M1P(1,1); MP12=M1P(2,1); MP13=M1P(3,1); MP14=M1P(4,1);$
 $MP15=M1P(5,1); MP16=M1P(6,1);$
 $M1P2=M1*P2;$
% Коэффициенты матрицы MP2
 $MP211=M1P2(1,1); MP212=M1P2(2,1); MP213=M1P2(3,1);$
 $MP214=M1P2(4,1); MP215=M1P2(5,1); MP216=M1P2(6,1).$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Приблизительный расчет системы охлаждения тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами

Особенностью тихоходных СДПМ большой мощности являются большие тепловые потери в зубцах и обмотках статора. На рисунке В.1 представлена картина тепловых потерь тихоходного СДПМ 690 кВт при номинальной мощности без охлаждения при температуре окружающей среды 20 °С. Поскольку тихоходный СДПМ располагается в герметичном корпусе мотор-барабана, воздушное охлаждение отсутствует, при перегрузках температура двигателя может бесконтрольно возрастать вплоть до оплавления обмоток и выхода двигателя из строя.

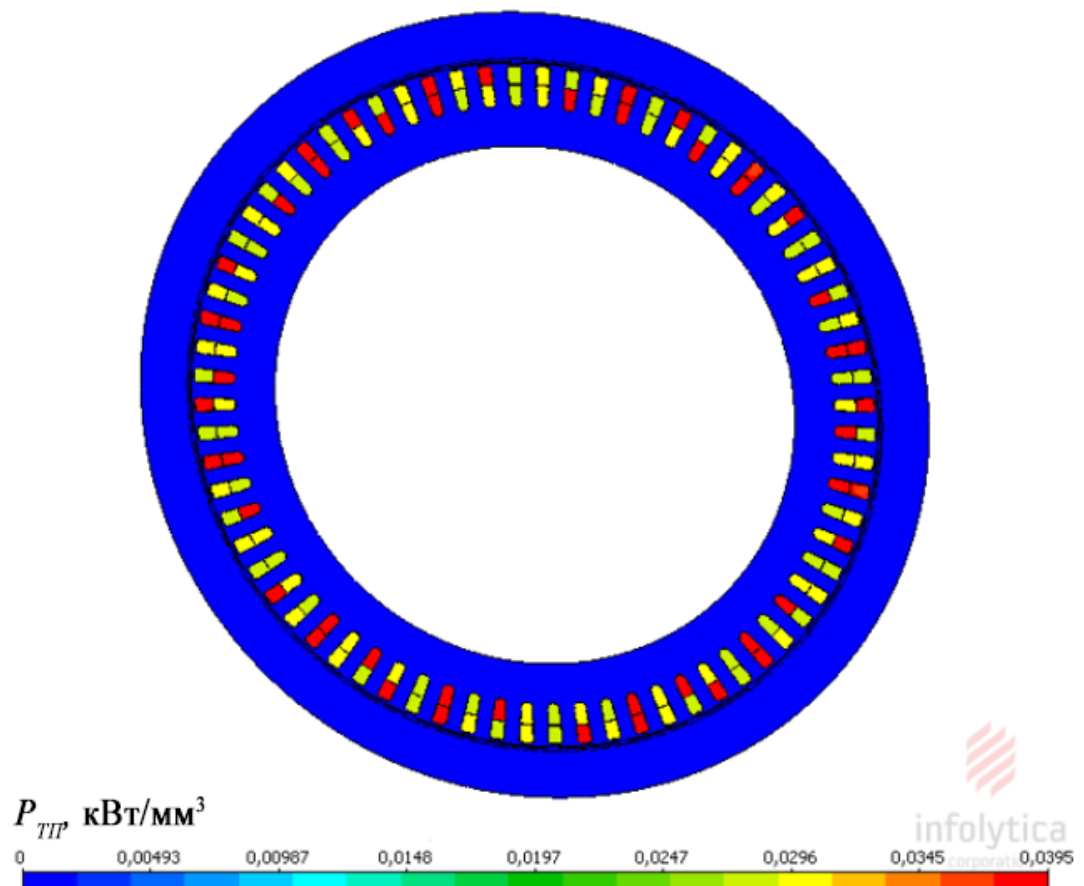


Рисунок В.1 – Распределение тепловых потерь P_{TTP} тихоходного СДПМ

Мощные машины закрытого типа с управление от преобразователя частоты нуждаются в принудительном жидкостном охлаждении. Согласно [108, 109, 129],

одним из наиболее эффективных способов охлаждения является прямое жидкостное охлаждение посредством деминерализованной или деионизированной воды с регулируемым рН, которая циркулирует по параллельным охлаждающим контурам. Рубашка охлаждения обеспечивает допустимую рабочую температуру вдоль поверхности медного проводника за счет контакта нержавеющей трубок с хладагентом со статором в нескольких эффективных точках [108, 109].

При прямом жидкостном охлаждении температура T_s , до которой может быть охлажден медный проводник, определяется конвективным коэффициентом теплопередачи и скоростью теплообмена (В.1).

$$T_s = T_{dw} + \frac{P}{\pi \cdot D_{sst} \cdot l_s \cdot \alpha_{dw/c}}, \quad (\text{В.1})$$

где P – суммарные потери СДПМ;

l_s – длина медного проводника, равная 2849 м [105].

Приблизительные параметры возможной системы охлаждения СДПМ приведены в таблице В.1. При таких значениях диаметра охлаждающего патрубка эффективность разработанной конструкции тихоходного СДПМ 690 кВт может незначительно снизиться на 0,1-0,2%.

Таблица В.1 – Параметры возможной системы охлаждения СДПМ

Параметр	Значение
Выходная температура деминерализованной воды T_{dw} , °С	90
Внутренний диаметр охлаждающего патрубка D_{sst} , м	0,05
Конвективный коэффициент теплопередачи для деминерализованной воды $\alpha_{dw/st}$, $\text{Вт}^2/\text{°С}$	0,045

В стандартных условиях температура воды на выходе патрубки, при входной температуре равной 40°С, находится в пределах 80-90°С. При подстановке значений в (В.1) ориентировочная температура охлаждаемых медных проводников $T_s = 120,6$ °С, что является допустимой и безопасной температурой при непрерывной работе двигателя, с допустимыми тепловыми потерями.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Справка о внедрении результатов на предприятие
ООО «Завод Электромашина»

ООО «ЗЭМ»
Общество с ограниченной ответственностью
«Завод Электромашина»
650044, г. Кемерово, ул. Шахтерская, д.2
Тел.: +7 (3842) 24-00-22, 24-00-33, 65-72-43
info@z-em.ru www.z-em.ru

СПРАВКА

Общество с ограниченной ответственностью «Завод Электромашина» приняло научную разработку Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева «Безредукторный мотор-барабан шахтного ленточного конвейера на базе синхронного двигателя на постоянных магнитах» (научный руководитель работы – д.т.н., доцент Семькина И.Ю., исполнитель – аспирант Тарнецкая А.В.) для возможности последующего использования в реализуемых проектах.

Технический директор
ООО «Завод Электромашина»



Нестеров Д.В.



ООО «ЗЭМ»
 Общество с ограниченной ответственностью
 «Завод Электромашина»
 650044, г. Кемерово, ул. Шахтерская, д.2
 Тел.: +7 (3842) 24-00-22, 24-00-33, 65-72-43
info@z-em.ru www.z-em.ru

СПРАВКА

об оценке научной разработки

Подтверждаем, что ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в адрес ООО «Завод Электромашина» представлены данные научно-исследовательской работы, посвященной разработке и исследованию безредукторного мотор-барабана шахтного ленточного конвейера на базе синхронного двигателя на постоянных магнитах, регулируемого в функции входного грузопотока. Данный тип электропривода отличается повышенным КПД за счет прямой передачи крутящего момента с вала на ленту, пониженным потреблением электроэнергии и обеспечивает требуемые показатели мощности и момента при значительно меньших массогабаритных показателях.

В ходе научно-исследовательской работы путем конечно-элементного моделирования были получены параметры тихоходного синхронного двигателя на постоянных магнитах мощностью 690 кВт, габариты которого соответствуют габаритам приводного барабана магистрального ленточного конвейера шахты ООО «Талдинская-Кыргайская», длиной 1,2 м и с главным диаметром 1 м. КПД тихоходного синхронного двигателя составляет 93,2%, скорость вращения 6,28 рад/с, момент на валу 109500 Н·м.

На основе полученных при моделировании характеристик тихоходного синхронного двигателя получено выражение реактивного зубцового момента, вызывающее дополнительные пульсации момента, которое учитывается в математической модели. Для компенсации пульсаций момента и тока и обеспечения требуемых показателей качества управления электроприводом ленточного конвейера разработана система управления на основе прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией. При данном типе управления пульсации электромагнитного момента не превышают 5%.

Для снижения энергопотребления предложена схема регулирования скорости ленты в зависимости от входного грузопотока, в которой задание для контура скорости формируется с помощью задатчиков интенсивности и блоков квантования сигнала о входном грузопотоке. Для реализации схемы использованы эмпирические данные о поминутном грузопотоке магистрального ленточного конвейера шахты им. С.М. Кирова. На основе анализа грузопотока выбрано трехступенчатое регулирование, при котором большую часть работы ленточного конвейера, при нагрузке в 30-50% безредукторный синхронный мотор-барабан работает на скорости 4,2 рад/с, что соответствует наиболее высокому КПД энергетической характеристики синхронного двигателя на постоянных магнитах.

Для подтверждения эффективности данного типа электропривода проведено сравнение технико-экономических показателей синхронного безредукторного мотор-барабана (СБМ) и асинхронного редукторного электропривода (АРЭ) с идентичными показателями по мощности и моменту.



ООО «ЗЭМ»
 Общество с ограниченной ответственностью
 «Завод Электромашина»
 650044, г. Кемерово, ул. Шахтерская, д.2
 Тел.: +7 (3842) 24-00-22, 24-00-33, 65-72-43
info@z-em.ru www.z-em.ru

Суммарный КПД асинхронного редукторного электропривода:

$$\eta_{APЭ} = \eta_{АД} \cdot \eta_{ЦР} \cdot \eta_{ПЧ} \cdot \eta_{ТМ} \cdot \eta_{ЭМ} = 0,876.$$

КПД синхронного безредукторного мотор-барабана:

$$\eta_{СБМ} = \eta_{СДПМ} \cdot \eta_{ПЧ} = 0,929.$$

Потребляемая мощность электроприводов с учетом трехступенчатого регулирования:
 $P_N^{APЭ} = 438,29$ кВт·ч, $P_N^{СБМ} = 398,7$ кВт·ч.

В таблице 1 представлены массогабаритные показатели асинхронного редукторного электропривода. Площадь, занимаемая синхронным безредукторным мотор-барабаном без преобразователя частоты равна площади приводного барабана $S = 1,2$ м², приблизительная масса около 5 000 кг.

Таблица 1. Массогабаритные параметры APЭ

Элемент электропривода	Габариты	Масса	Площадь
АД КЗ ВАОВ5К-630Д-6	$L = 2300$ мм $d_{30} = 1605$ мм $d_{20} = 1400$ мм	6500 кг	$S = 3,68$ м ²
Цилиндрический двухступенчатый редуктор	$L = 2800$ мм $H = 1010$ мм $B = 830$ мм	4200 кг	$S = 2,32$ м ²
Турбомуфта	$L = 650$ мм $D = 1120$ мм	850 кг	$S = 0,73$ м ²
Зубчатая муфта	$L = 290$ мм $D = 242$ мм	125 кг	$S = 0,07$ м ²
Приводной барабан	$L = 1200$ мм $D = 1000$ мм	230 кг	$S = 1,2$ м ²
Высоковольтный ПЧ	$L = 4800$ мм $H = 1010$ мм $B = 830$ мм	-	$S = 5,76$ м ²
Асинхронный редукторный электропривод (при последовательном соединении, без ПЧ)	$L = 6040$ мм $H = 2400$ мм $B = 1200$ мм	11905 кг	$S = 8$ м ²

Расчет капитальных затрат осуществлялся в ценах 2016 года с поправкой на инфляцию. В таблице 2 указана средняя стоимость составляющих в ценах на 2019 год. В затраты на проходку выработки не включены затраты на выработку для высоковольтного ПЧ 6 кВ, не включены элементы системы управления (АРМ, ПЛК, датчики, переходники, кабели и т.д.). Транспортные затраты, затраты на пуско-наладочные и шефмонтажные работы принимаются равными и не учитываются.

Таблица 2. Капитальные затраты

Асинхронный редукторный электропривод		Безредукторный синхронный мотор-барабан	
	Стоимость, тыс. руб.		Стоимость, тыс. руб.



ООО «ЗЭМ»
 Общество с ограниченной ответственностью
 «Завод Электромашина»
 650044, г. Кемерово, ул. Шахтерская, д.2
 Тел.: +7 (3842) 24-00-22, 24-00-33, 65-72-43
info@z-em.ru www.z-em.ru

Асинхронный редукторный электропривод		Безредукторный синхронный мотор-барaban	
АД КЗ 630 кВт	1 900	Корпус барабана с керамической футеровкой, ступицы, корпуса подшипников, подшипники, метизы	420
Металлоконструкции для установки барабана, футерованный барабан, редуктор, переходные муфты, металлоконструкции для установки двигателя и Редуктор (цилиндр.)	3 200	Двигатель с системой управления и охлаждения	3 000
		Металлоконструкции для крепления мотор-барабана	260
ПЧ высоковольтный	9 700	ПЧ высоковольтный	9 700
Полная себестоимость	14800	Полная себестоимость	13380
Капитальные затраты на проходку выработки	1500	Капитальные затраты на проходку выработки	600
Итого	16300	Итого	13980

Стоимость удельного киловатта электроэнергии:

$$C_{кВт}^{APЭ} = \frac{16300000}{630} = 25873 \text{ руб.}, \quad C_{кВт}^{СБМ} = \frac{13980000}{690} = 20261 \text{ руб.}$$

Энергопотребление в год с учетом регулирования:

$$W_{эл}^{APЭ} = 438,29 \cdot 6300 \cdot 0,7 = 1932863 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{год},$$

$$W_{эл}^{СБМ} = 398,37 \cdot 6300 \cdot 0,7 = 1756825 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{год}.$$

Затраты на электроэнергию в год из расчета 2,8 руб/1 кВт · ч

$$I_{эл}^{APЭ} = 1932863 \cdot 2,8 = 5412017 \text{ руб} / \text{год}, \quad I_{эл}^{СБМ} = 1756825 \cdot 2,8 = 4919109 \text{ руб} / \text{год}.$$

Стоимость потерь электроэнергии в год из расчета 2,8 руб/1 кВт · ч:

$$I_{пот}^{APЭ} = 438,29 \cdot \frac{(1 - 0,876)}{0,876} \cdot 6300 \cdot 0,7 \cdot 2,8 = 7771616 \text{ руб} / \text{год},$$

$$I_{пот}^{СБМ} = 398,37 \cdot \frac{(1 - 0,929)}{0,929} \cdot 6300 \cdot 0,7 \cdot 2,8 = 706793 \text{ руб} / \text{год}.$$

Амортизационные отчисления, 8% в год от капитальных затрат

$$C_{\sigma}^{APЭ} = 163000000 \cdot 0,08 = 1304000 \text{ руб} / \text{год},$$

$$C_{\sigma}^{СБМ} = 13980000 \cdot 0,08 = 1118400 \text{ руб} / \text{год}.$$



ООО «ЗЭМ»
 Общество с ограниченной ответственностью
 «Завод Электромашина»
 650044, г. Кемерово, ул. Шахтерская, д.2
 Тел.: +7 (3842) 24-00-22, 24-00-33, 65-72-43
 info@z-em.ru www.z-em.ru

Приведенные затраты на эксплуатацию электропривода (на период 5 лет):

$$Z_{пр}^{AP3} = \frac{1}{5} KB_{AP3} + I_{ном}^{AP3} + I_{эл}^{AP3} + C_a^{AP3} + C_p^{AP3} = 10422 \text{ тыс. руб/год},$$

$$Z_{пр}^{CBM} = \frac{1}{5} KB_{CBM} + I_{ном}^{CBM} + I_{эл}^{CBM} + C_a^{CBM} + C_p^{CBM} = 9260 \text{ тыс. руб/год}.$$

Оцениваемый эффект от внедрения синхронного безредукторного мотор-барабана:

$$Ef = Z_{пр}^{AP3} - Z_{пр}^{CBM} = 1161 \text{ тыс. руб/год}.$$

На основании вышеизложенного данные научно-исследовательской работы приняты в ООО «Завод Электромашина».

Технический директор
 ООО «Завод Электромашина»



Нестеров Д.В.