

На правах рукописи

Тарнецкая Александра Викторовна



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

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Семькина Ирина Юрьевна

Официальные оппоненты:

Григорьев Максим Анатольевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-уральский государственный Университет (национальный исследовательский университет)», кафедра «Автоматизированный электропривод», заведующий кафедрой.

Нос Олег Викторович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Проектирование технологических машин», профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита диссертации состоится 23 декабря 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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.

Эффективность шахтного ЛК определяется его производительностью, энергопотреблением, безопасностью и т.д. 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 редуктор нуждается в периодическом техническом обслуживании, зубчатые передачи ограничивают мощность вращения и вкуче с турбомуфтами снижают общий КПД электропривода.

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, 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.

Степень разработанности темы исследования

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 и др.

Вопросы управления синхронными двигателями на постоянных магнитах рассматривались отечественными и зарубежными исследователями, такими как Э. Арройло, М. Ван, В. М. Завьяловым, А.Э. Евстратовым, С. Модибо, Т. Накамура, У. Ньемандт, 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. Папояна, Л. Д. Певзнера, Л. Г. Шахмейстера.

На сегодняшний день существует обширное количество трудов, посвященных вышеуказанным темам, однако вопрос разработки специализированного безредукторного электропривода на базе безредукторного синхронного мотор-барабана (БСМБ) средней и высокой мощности для шахтных ленточных конвейеров напрямую до сих пор не был рассмотрен.

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%.

Задачи диссертационного исследования:

1. 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.

2. 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%.

3. Обосновать выбор метода управления и разработать систему управления безредукторным синхронным мотор-барабаном, регулируемым в функции входного грузопотока.

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

Основные научные положения:

1. Предложенный безредукторный синхронный мотор-барабан способен вырабатывать момент и мощность сопоставимые с асинхронным редукторным электроприводом и помещаться в габариты приводного барабана шахтного ленточного конвейера.

2. 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.

3. 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:

1. Впервые получены параметры безредукторного синхронного мотор-барабана большой мощности, предназначенного для тягового электропривода шахтного ленточного конвейера.

2. Получены математическая и компьютерная модели тихоходного СДПМ для безредукторного мотор-барабана, в которой дополнительно учитываются пульсации зубцового момента.

3. 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.

4. Предложена схема регулирования скорости в зависимости от грузопотока, позволяющая снизить энергопотребление электропривода ЛК, 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 исследования.

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 работы. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

В первой главе произведен теоретический анализ исследований по направлению разработки электропривода нового типа для шахтных ленточных конвейеров. Выявлены тенденции замены асинхронных двигателей энергоэффективными синхронными двигателями на постоянных магнитах, перехода от редукторных к безредукторным технологиям, и необходимость регулирования скорости движения ленты в функции грузопотока. Произведен сравнительный анализ распространенных методов векторного управления тихоходными синхронными двигателями на постоянных магнитах.

Во второй главе произведен предварительный расчет основных размеров тихоходного СДПМ на основе параметров существующего тягового электропривода ленточного конвейера с шахты ООО «Талдинская-Кыргайская» (г. Новокузнецк)., выбраны конструкционные методы компенсации зубцового момента. Моделирование тихоходного СДПМ проводилось в средах MotorSolve и Magnet. Параметры разработанного СДПМ 690 кВт показаны в таблице 1. На рисунке 1 представлена картина электромагнитного поля полученного СДПМ 690 кВт. На рисунке 2 показаны угловые характеристики СДПМ 690 кВт на холостом ходу.

Таблица 1 – Параметры тихоходного СДПМ 690 кВт

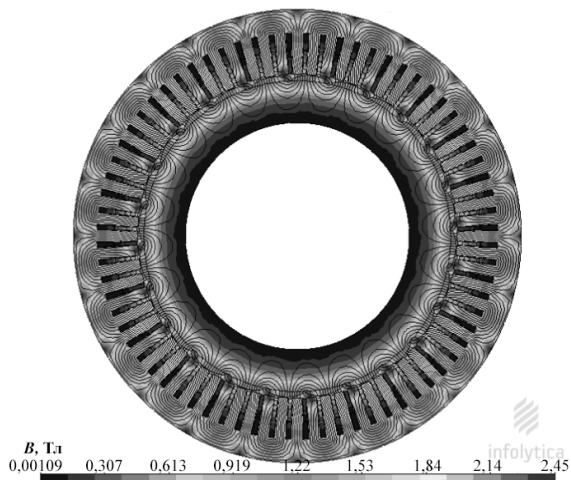
U , В	P_H , кВт	R_s , Ом	L_d , Гн	L_q , Гн	M_n , Н·м	Ψ_{PM} , Вб	p_n	J , кг·м ²	$\cos\varphi$	η
6000	690	2,367	0,579	0,496	109500	52,49	12	180	0,72	93,8

Математическая модель тихоходного СДПМ строится на основе уравнений обобщенной электрической машины в системе координат $d-q$ (1) :

$$\begin{aligned}
\overline{u}_{sd} &= R_s \overline{i}_{sd} - \frac{d\overline{\psi}_{sd}}{dt} = R_s \overline{i}_{sd} + L_{sd} \frac{d\overline{i}_{sd}}{dt} - \omega_{0el} L_{sq} \overline{i}_{sq}, \\
\overline{u}_{sq} &= R_s \overline{i}_{sq} - \frac{d\overline{\psi}_{sq}}{dt} = R_s \overline{i}_{sq} + L_{sq} \frac{d\overline{i}_{sq}}{dt} + \omega_{0el} L_{sd} \overline{i}_{sd} + \omega_{0el} \overline{\psi}_{PM}, \\
\overline{\psi}_{sd} &= L_{sd} \overline{i}_{sd} + L_{md} \overline{i}_d + \overline{\psi}_{PM}, \quad \overline{\psi}_{sq} = L_{sq} \overline{i}_{sq} + L_{mq} \overline{i}_q, \\
\overline{\psi}_d &= L_{md} \overline{i}_{sd} + L_d \overline{i}_d + \overline{\psi}_{PM}, \quad \overline{\psi}_q = L_{mq} \overline{i}_{sq} + L_q \overline{i}_q, \quad \overline{\psi}_{PM} = L_{md} \overline{i}_{PM}.
\end{aligned} \tag{1}$$

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p_n \left[\overline{\psi}_{PM} \overline{i}_{sd} + (L_{sd} - L_{sq}) \overline{i}_{sd} \overline{i}_{sq} \right] + M_z, \quad J \frac{d\omega}{dt} = M_{эм} - M_c,$$

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

Рисунок 1 – Картина электромагнитного поля тихоходного СДПМ
690 кВт

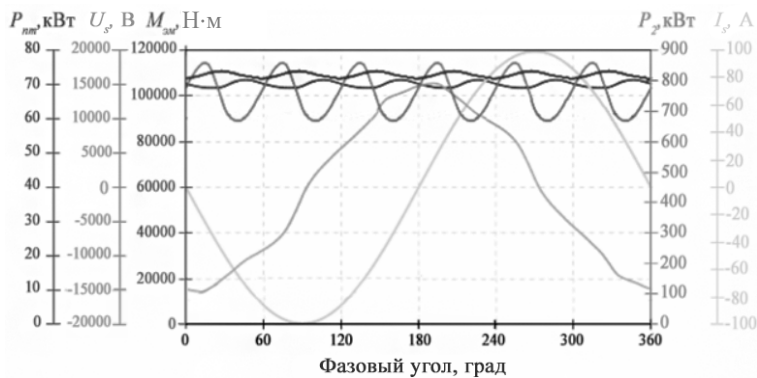


Рисунок 2 – Угловые характеристики СДПМ при прямом запуске двигателя от сети

Зубцовый момент M_z тихоходного СДПМ 680 кВт получен графоаналитическим методом.

В конце второй главы установлено, что из-за большой намагничности зубцовых зон (рисунок 2) при частотном пуске СДПМ амплитуда пульсаций момента составляет 25% при разгоне и 45% при выходе двигателя на номинальную скорость вращения.

В третьей главе проведено моделирование и сравнение двух систем векторного управления: по схемам полеориентированного управления с ШИМ-модуляцией (ПОУ-ШИМ) и прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией (ПУМ-ПВМ) (рисунок 3).

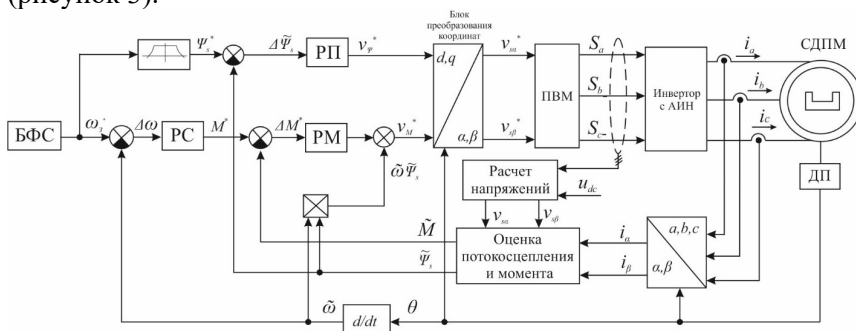


Рисунок 3 – Принципиальная схема датчикового ПУМ-ПВМ

В качестве преобразователя частоты выбрана разработка кафедры электропривода и автоматизации КузГТУ (г. Кемерово) – трехфазный пятиуровневый инвертор, конструкция которого позволяет решать задачу преобразования частоты с IGBT-транзисторами меньших номинальных параметров при малом коэффициенте нелинейных искажений напряжения.

Результаты моделирования плавного пуска тихоходного СДПМ ПУМ-ПВМ показаны на рисунках 4-5.

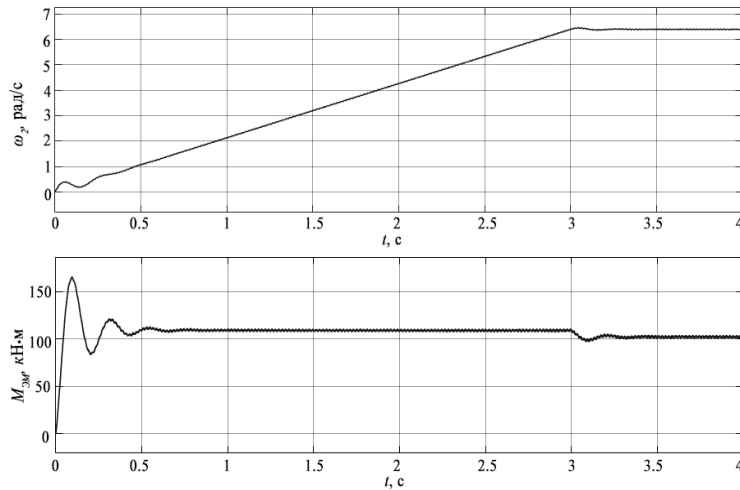


Рисунок 4 – Графики $\omega_{эл}$ и $M_{эм}$ при пуске для схемы ПУМ-ПВМ

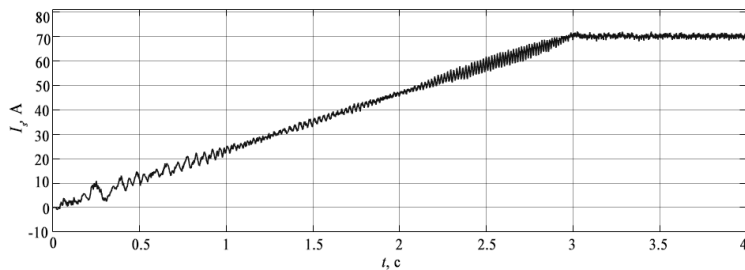


Рисунок 5 – Переходные процессы тока статора I_s при плавном пуске тихоходного СДПМ в системе ПУМ-ПВМ

В конце третьей главы сделаны выводы, что 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 $M_{эм}$ до 25% в то время, как при ПУМ-ПВМ $M_{эм}$ менее 5%, а показатели качества системы управления удовлетворяют требованиям к СУЭП ЛК. Переходные процессы скорости тока статора I_s – на рисунке 5.

В четвертой главе проводилось моделирование механической части системы векторного управления электроприводом шахтного ЛК. Для исследования системы векторного управления электропривода ленточного конвейера с двумя безредукторными синхронными мотор-барабанами (ведущий-ведомый) использовались параметры магистрального ленточного конвейера Л1000КУ, расчетная схема которого показана на рисунке 6.

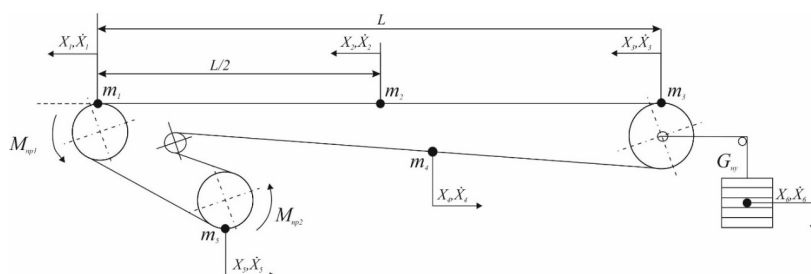


Рисунок 6 – Расчетная схема механической системы ЛК с двумя мотор-барабанами и натяжным устройством

Многомассовая система ленточного конвейера моделируется на основе уравнений Лагранжа и представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений второго рода (2):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_i} T \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} T + \frac{\partial}{\partial \dot{x}_i} \Pi + \frac{\partial}{\partial x_i} A = 0, \quad (2)$$

где T – кинетическая энергия участка конвейера; Π – потенциальная энергия участка; A – работа внешних и внутренних сил на участке.

На рисунке 7 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 12 с. Длительность переходного процесса при пуске под нагрузкой - 47 с.

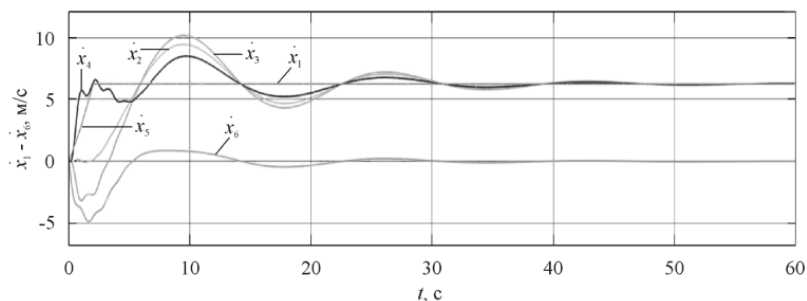


Рисунок 7 – Переходные процессы скоростей точек x_1 – x_6 при плавном пуске

Для исследования регулирования скорости ленты в системе управления с безредукторным синхронным мотор-барабаном используется поминутный грузопоток магистрального конвейера на шахте им. С.М. Кирова (г. Ленинск-Кузнецкий). Схема задатчика скорости в зависимости от входного грузопотока показана на рисунке 8. Усреднение мгновенной величины грузопотока производится по приближительному значению длительности движения груза из начальной точки конвейера к хвосту при номинальной скорости движения ленты $T_0 = 1000/3,14 = 300$ с. Переключение скоростей устроено по принципу трехпозиционного реле, задатчик интенсивности представляет собой интегральное звено с постоянной времени $T_{зи} = 10$ с. Регулирование скорости вращения СДПМ реализуется в три ступени: при массе груза на участке $Q(t) < 300$ кг/мин скорость $\omega_1 = 2,5$ рад/с; при $300 \text{ кг/мин} < Q(t) < 500$ кг/мин $\omega_2 = 4,2$ рад/с; при $Q(t) > 600$ кг/мин $\omega_n = 6,28$ рад/с.

Результаты моделирования регулирования скорости безредукторного синхронного мотор-барабана в течение 1500 с показаны на рисунках 9-13.

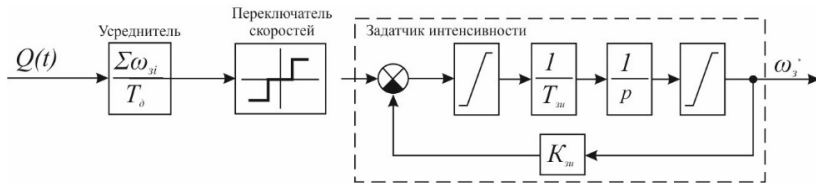


Рисунок 8 – Схема задатчика скорости в зависимости от грузопотока

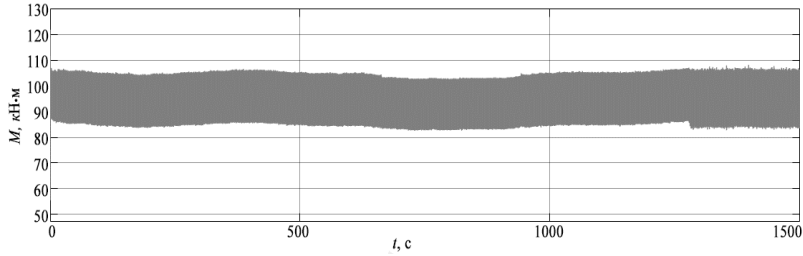


Рисунок 9 – Переходные процессы механического момента БСМБ

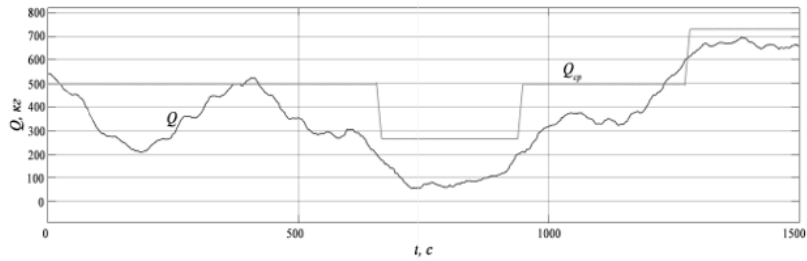


Рисунок 10 – Мгновенный грузопоток $Q(t)$ и его усредненное значение $Q(t)_{cp}$

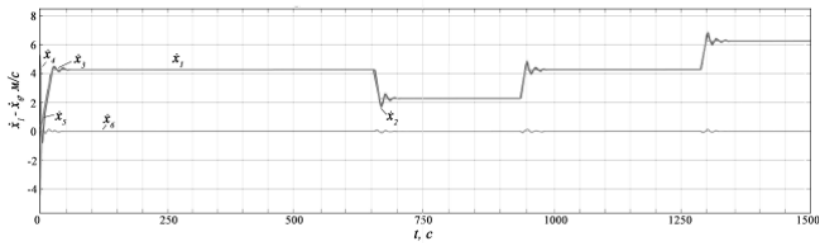


Рисунок 11 – Переходные процессы скоростей \dot{x}_1 - \dot{x}_6 БСМБ

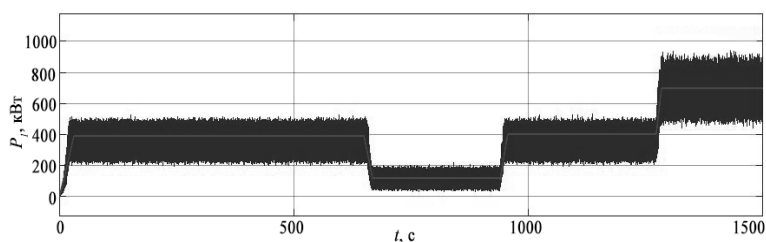


Рисунок 12 – Переходные процессы P_1 БСМБ

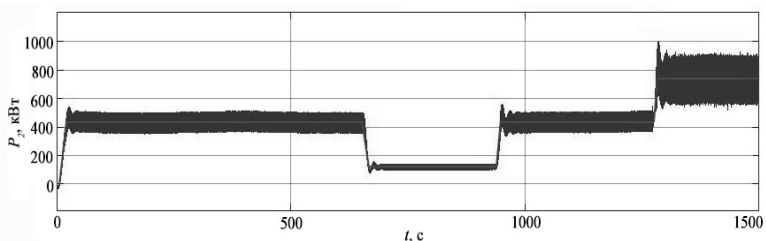


Рисунок 13 – Переходные процессы P_2 БСМБ

В конце четвертой главы проведено сравнение технических показателей, капитальных и приведенных затрат (таблица 2) для обоих типов электроприводов: безредукторного синхронного мотор-барабана и асинхронного редукторного электропривода (АРЭ). В качестве асинхронного редукторного электропривода рассматривается двухбарабанный электропривод с частотным регулированием на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, с двухступенчатым цилиндрическим редуктором и турбомуфтой, вырабатывающий аналогичные мощность и момент.

Таблица 2 – Сравнение тех. показателей и приведенных затрат

Показатели	Ед. изм.	АРЭ	БСМБ	Эффект
Мощность, P_n	кВт	630	690	+60 кВт
КПД электропривода, $\eta_{эп}$	%	87,6	92,9	+5,3
Площадь, занимаемая электроприводом, $S_{эп}$	м ²	14,220	5,76	-8,46 (59,4 %)

Продолжение таблицы 2

Показатели	Ед. изм.	АРЭ	БСМБ	Эффект
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%)
Капитальные затраты на выработку, KB	тыс. руб.	16300	13980	-2320 (14,2 %)
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, $I_{пот}$	тыс. руб./год	752,12	374,18	-377,94 (50,2 %)
Приведенные затраты, $Z_{пр}$	тыс. руб./год	11179,5	9434,6	-1744,9 (15,6%)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи — повышения эффективности тяговых электроприводов ленточного конвейера, имеющей значение для развития транспортных систем при добыче полезных ископаемых. 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.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

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 системы векторного управления 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО
ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. **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.

2. **Семькина, И. Ю.** Система управления электроприводом ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана / И. Ю. Семькина, А. В. Тарнецкая // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 1. – С. 47-53.

Публикации в изданиях Scopus и Web of Science

3. **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>.

4. **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.

5. **Semykina, I. Yu.** The design of control system for gearless synchronous drum-motor of the underground mine belt conveyor // I. Yu. Semykina, A.V. Tarnetskaya // Environment, Energy and Earth Sciences (E3S) Web of Conferences. – 2019. – Vol. 105. – DOI: 10.1051/e3sconf/201910503004.

Прочие публикации

6. **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.

7. **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.

8. **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.

9. **Семькина, И. Ю.** Компенсация зубцового момента высокомогного тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами / И. Ю. Семькина, А. В. Тарнецкая // Сборник материалов III всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», 13-15 декабря 2017. – Кемерово: КузГТУ, 2017.

10. **Семькина, И. Ю.** Задачи управления синхронным электроприводом безредукторного мотор-барабана ленточного

конвейера / И. Ю. Семькина, 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.

11. **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.

12. **Семькина, И. Ю.** Система векторного управления безредукторным синхронным мотор-барабаном ленточного конвейера / И.Ю. Семькина, 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.