

АННОТАЦИЯ

Диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе 8D07103 – «Электроэнергетика»

КУЛИКОВ АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАГИСТРАЛЬНОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Актуальность. Одной из основных отраслей экономики Республики Казахстан является горнодобывающая промышленность. Казахстан занимает третье место в мире по разведанным запасам меди и первое место по запасам цинка.

Добыча и обогащение руды является неотъемлемой частью горнорудной промышленности. Транспортировка руды на поверхность из подземного рудника, а также транспортировка руды между удаленными отделениями горно-обогатительного предприятия осуществляется посредством поточно-транспортной системы. Основным видом транспорта поточно-транспортных систем горнорудных предприятий является магистральный ленточный конвейер, где существует необходимость транспортировать руду на дальние расстояния и в некоторых случаях под уклоном 15-20 градусов. Ввиду чего для приведения в работу магистрального ленточного конвейера, нагруженного рудой, необходимо использование электропривода мощностью от 500 кВт и выше. Согласно ГОСТ 31558-2012: «Конвейеры с приводными блоками мощностью 250 кВт и более следует оснащать вспомогательными приводными блоками, обеспечивающими скорость ленты не более 0,5 м/с». Данная мощность достигается путем использования двух двигателей одинаковой мощности, вращающих приводной барабан. В таких системах необходима синхронная работа двигателей, которая достигается посредством автоматического регулятора. Несогласованная работа двигателей ведет к повышению затрат электроэнергии.

При эксплуатации магистрального конвейера с двухдвигательным приводом важной задачей является синхронизировать работу электродвигателей, вращающих приводной барабан. Неравномерное распределение нагрузки приводит к перегрузу одного из двигателей, что ведет к уменьшению его ресурса, и как следствие, уменьшению межремонтного интервала приводного оборудования.

Синхронная работа двигателей двухдвигательного привода достигается путем оптимальной настройки автоматического регулятора. При некорректно настроенном регуляторе возникают колебания ленты, что приводит к преждевременному износу ленты и снижению эффективности работы системы. Уменьшение потерь электроэнергии во время запуска двухдвигательного электропривода достигается путем изменения параметров автоматического регулятора в зависимости от входного грузопотока.

Целью диссертационной работы является увеличение ресурса конвейерной ленты, механической части электропривода и повышение энергоэффективности электропривода за счет оптимального управления двухдвигательным электроприводом магистрального ленточного конвейера.

Объектом исследования является регулируемый двухдвигательный асинхронный электропривод магистрального ленточного конвейера.

Научная проблема заключается:

- в распределении нагрузок между приводами;
- в необходимости исследования динамических характеристик двухдвигательного асинхронного электропривода в пусковых режимах.

Идея работы состоит в разработке адаптивной системы управления двухдвигательным асинхронным электроприводом магистрального ленточного конвейера, учитывающей переменный грузопоток в процессе транспортировки материала.

Задачи исследования:

- анализ существующих технических реализаций асинхронного двухдвигательного электропривода ленточного конвейера;
- анализ возмущающих факторов асинхронного двухдвигательного электропривода в установившемся режиме с учётом переменного грузопотока и в пусковых режимах;
- создание математической модели асинхронного двухдвигательного электропривода ленточного конвейера и оценка её адекватности путём сопоставления теоретических и экспериментальных данных;
- разработка критериев оптимальности в установившемся и пусковом режимах с учётом переменного грузопотока;
- синтез контура адаптации системы управления регулируемым электроприводом ленточного конвейера;
- синтез САР взаимосвязанного двухдвигательного электропривода ленточного конвейера;
- разработка аппаратной части системы управления двухдвигательного электропривода ленточного конвейера;
- оценка эффективности предлагаемой адаптивной системы автоматического регулирования электропривода в процессе промышленных испытаний.

Научная новизна:

- аналитические зависимости критериев оптимального управления двухдвигательным регулируемым асинхронным электроприводом, учитывающие упругость, длину конвейерной ленты и переменный грузопоток в процессе работы данного конвейера;
- синтез адаптивной САР для двухдвигательного регулируемого асинхронного электропривода, увеличивающей ресурс ленты в пусковом и установившемся режимах;
- динамические характеристики возмущающих факторов ленточного конвейера с переменным грузопотоком.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту диссертации:

- математические и имитационные модели электромеханической системы магистрального ленточного конвейера с двухдвигательным регулируемым асинхронным электроприводом, учитывающие жесткость, длину конвейерной ленты и переменный грузопоток в процессе работы данного конвейера;
- структура адаптивной системы регулирования двухдвигательного электропривода магистрального ленточного конвейера, содержащей обратную связь по электромагнитному моменту ведущего электродвигателя и адаптивный регулятор с изменением его коэффициентов в зависимости от изменения грузопотока.

Методы исследования.

Обзор работ отечественных и зарубежных исследователей в области энергоэффективности асинхронного электропривода. Изучение мирового опыта в построении системы управления двухдвигательного взаимосвязанного асинхронного электропривода ленточного конвейера, подтвержденный научными работами, патентами и авторскими свидетельствами на изобретения. Использовались научные положения теории автоматического управления, основ электротехники, электрических машин и теории электропривода широко применяемых в построении двухдвигательного асинхронного электропривода ленточного конвейера.

Экспериментальные данные получены путем снятия осциллограмм токов, электромагнитных моментов и частот вращения двухдвигательного асинхронного электропривода магистрального ленточного конвейера, расположенного на производственной площадке АО «Жайремский горно-обогатительный комбинат».

Построение имитационной модели двухдвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода магистрального ленточного конвейера выполнено в пакете прикладных программ Matlab/Simulink. Оценка адекватности полученной модели проведена с использованием критерия Фишера. Синтез регулятора системы управления и разработка адаптивного регулятора момента выполнены с использованием пакета прикладных программ Matlab/Simulink.

Практическая значимость:

- техническая реализация адаптивной САР с учетом ограничений неизменной части двухдвигательного электропривода ленточного конвейера;
- оценка эффективности контура адаптации в пусковом и установившемся режимах.

Опыт внедрения полученных результатов в производство.

Результаты теоретических исследований подтверждены промышленными испытаниями, проведенными на магистральном ленточном конвейере АО «Жайремский горно-обогатительный комбинат». Акт промышленных испытаний прилагается к диссертационной работе (Приложение А).

Обоснованность и достоверность научных положений, заключений и рекомендаций.

Теоретические исследования проводились в лабораториях кафедры «Автоматизации производственных процессов» КарТУ имени Абылкаса Сагинова, кафедры «Электропривода и автоматизации промышленных установок» УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург).

Расчеты и выводы, полученные во время теоретических исследований подтверждены результатами промышленных испытаний, проведенных на производственной площадке АО «Жайремский горно-обогатительный комбинат».

Выводы диссертационной работы согласуются с научными положениями, сформулированными ведущими специалистами в области энергоэффективности автоматизированных электроприводов, что подтверждает их обоснованность и достоверность.

Личный вклад автора:

Создание имитационной модели двухдвигательного асинхронного электропривода с частотным регулированием для магистрального ленточного конвейера, разработка адаптивного регулятора момента, а также все результаты теоретических исследований и экспериментов выполнены автором самостоятельно либо при его активном участии. Испытание разработанной системы управления было проведено в условиях промышленного предприятия. В статьях, опубликованных в соавторстве, автор несет ответственность за результаты экспериментальных исследований, проведение анализа, подготовку, оформление, отправку и сопровождение материалов.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации представлены в 7 публикациях, в том числе:

– в изданиях, входящих в научную базу Scopus 1 статья:

1. Optimizing the operation of a double-motor asynchronous frequency-controlled electric drive of the main belt conveyor in startup mode // International Journal on Energy Conversion (IRECON). – 2023. – Vol. 11, №5. – P. 170-182 (Scopus процентиль – 53 в категории «Energy Engineering and Power Technology»).

– в изданиях, рекомендованных КОКОН МОН РК – 3 статьи:

1. Analyzing the main belt conveyor dual-motor asynchronous electric drive operating modes // Тр. КарТУ. – 2022. – №3. – С. 327-333.

2. Методы теоретических исследований электропривода ленточного конвейера: подходы, моделирование и оценка // Тр. КарТУ. – 2025. – №1. – С. 414-420.

3. Modeling of an induction motor driven by a frequency converter // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. – 2025. – №1. – С. 201-215.

– в изданиях международных научных конференций – 3 статьи:

1. Simulation of an electric conveyor drive using Simulink Matlab // 2024 IEEE 22nd World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, SAMI 2024 - Proceedings, 2024. – P. 513-518 (входит в базу Scopus).

2. Machine learning modeling and simulation of asynchronous electric drive // 2024 IEEE 6th International Symposium on Logistics and Industrial Informatics, LINDI 2024 - Proceedings, 2024. – P. 95-102 (входит в базу Scopus).

3. Оптимизация работы двухдвигательного асинхронного частотно-регулируемого электропривода магистрального ленточного конвейера // Труды Международной научно-практической конференции «XVI Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства» (Ч. 2. – С. 57-59).

– получен 1 патент РК на полезную модель «Система управления двухдвигательным частотно-регулируемым электроприводом ленточного конвейера» Патент РК на полезную модель №9314 от 28.06.2024 (Приложение Б).

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа содержит 85 страниц машинописного текста, 40 рисунков, 11 таблиц, 2 приложения, список использованных источников из 101 наименования.

Содержание диссертации:

Во введении описывается текущее состояние проблемы и аргументируется актуальность исследования. Определены цель и задачи диссертационной работы, выделена научная новизна, основные положения и результаты исследования, выносимые на защиту, а также подчеркнута практическая значимость полученных данных.

В первой главе представлено текущее состояние проблемы и проведен анализ существующих литературных источников. Выполненный анализ помог выявить характерные особенности функционирования двухдвигательного асинхронного привода ленточного конвейера, а также ключевые технологические параметры, которые значительно влияют на его энергоэффективность и долговечность.

Рассмотрены особенности работы двухдвигательного асинхронного электропривода магистрального ленточного конвейера в пусковых, технологических и аварийных режимах работы, описаны методы теоретических и экспериментальных исследований, сформулированы требования к ним.

Анализ выявил, что улучшение энергоэффективности и продление срока службы магистрального ленточного конвейера представляет собой важную и актуальную проблему.

Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе уделяется внимание теоретическим исследованиям работы ленточных конвейеров с двухдвигательным асинхронным электроприводом. Приводится расчет параметров и разработка имитационной модели частотно-регулируемого асинхронного двигателя двумя способами: по типу линеаризованной системы со скалярным управлением и модели асинхронного электропривода с векторной системой управления при компенсированных перекрестных связях. В первом случае синтез регулятора скорости выполняется корневым методом с использованием диаграммы Вышнеградского. Учитывая принятое допущение по снижению порядка характеристического уравнения, погрешность для перерегулирования угловой скорости составила 0,014%. Во

втором случае синтез регулятора скорости выполняется на «модульный» оптимум.

Для управления ленточным конвейером, перевозящим руду, целесообразно применять векторный режим управления, а не скалярный. Векторное управление позволяет точно регулировать скорость и момент двигателя, что важно для работы с тяжёлыми материалами. Это обеспечивает плавный запуск и остановку конвейера, снижая механические нагрузки и продлевая срок службы оборудования. Преимущества векторного режима – высокая точность, энергоэффективность и контроль момента, хотя его настройка сложнее. Скалярный режим проще и подходит для постоянных нагрузок, но его главный недостаток – снижение точности и эффективности при изменении условий работы, что может привести к большему износу оборудования.

Разрабатывается кинематическая схема магистрального ленточного конвейера с двухдвигательным асинхронным электроприводом и имитационная модель механической части ленточного конвейера. Из проведенных экспериментов с имитационной моделью механической части магистрального ленточного конвейера получено следующее:

- Во время старта конвейера возникают упругие динамические колебания в конвейерной ленте.
- На пустом конвейере наблюдается наименьший период колебаний 10 с, наименьшая начальная амплитуда 12,91 кН · м (ступенчатое задание), 10,79 кН · м (плавно нарастающее задание) и наименьшее время затухания колебаний 23 с.
- На максимально загруженном конвейере наблюдается увеличение периода колебаний на 11%, увеличение начальной амплитуды на 3,3% (ступенчатое задание), 1,4% (плавно нарастающее задание) и увеличение времени затухания колебаний на 13% по сравнению с пустым конвейером.
- При запуске конвейера с задающим воздействием разной интенсивности под одинаковой нагрузкой период колебаний остается неизменным.
- Разное время разгона оказывает разное воздействие на конвейерную ленту при полной нагрузке при запуске. Чем больше время запуска, тем меньше воздействие на конвейерную ленту. Чем плавнее нарастает задающее воздействие, тем меньше амплитуда колебаний и меньше время их затухания.

В третьей главе проводятся теоретические исследования двухдвигательного асинхронного регулируемого электропривода с упругими связями. На основе результатов, полученных во второй главе, разрабатывается имитационная модель двухдвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода магистрального ленточного конвейера.

Выполняется оценка адекватности полученной модели методом Фишера: ошибка моделирования не превышает 5%. Полученная точность достаточна для исследования динамических процессов двухдвигательно частотно-регулируемого асинхронного электропривода ленточного конвейера.

Разрабатывается адаптивный регулятор момента двухдвигательного асинхронного электропривода магистрального ленточного конвейера,

учитывающий переменный грузопоток. Синтез регулятора момента производится на модульный оптимум.

Для отсутствия перераспределения нагрузки между электродвигателями привода и уменьшения перерегулирования электромагнитного момента при переменном грузопотоке целесообразно использовать адаптивный регулятор момента, линейно изменяющий свои параметры в зависимости от степени нагруженности конвейера.

Проведены исследования динамических процессов, происходящих в ленточном конвейере в пусковом режиме под различной нагрузкой. Результаты показали, что для разной степени нагруженности конвейера целесообразно применять различные настройки автоматического регулятора. Эксперименты подтвердили, что использование адаптивного регулятора момента позволяет уменьшить энергопотребление электропривода конвейера в пусковом режиме и увеличить ресурс механических частей конвейера.

В четвертой главе приводится описание экспериментальных исследований двухдвигательного асинхронного электропривода магистрального ленточного конвейера с учетом переменного грузопотока. Описываются особенности натурного испытательного стенда, организованного на действующем горнообогатительном предприятии, и проводятся экспериментальные исследования двухдвигательного асинхронного электропривода магистрального ленточного конвейера в пусковом и установившемся режимах работы.

В процессе промышленных испытаний установлено, что при пуске электропривода конвейера момент электродвигателя не превышал двухкратного значения. Рассогласование моментов ведомого и ведущего электродвигателя не превышало 25% во время переходного процесса и 5% в установившемся режиме.

При запуске конвейера с максимальной загрузкой наблюдалось снижение пиковых значений пусковых моментов, а следовательно, и пусковых токов на 20-30%, что снижает нагрузку на элементы электропитания и уменьшает вероятность перегрева двигателей.

Из результатов испытаний системы автоматического регулирования взаимосвязанного двухдвигательного асинхронного электропривода магистрального ленточного конвейера следует, что данная система по своим статическим и динамическим характеристикам может быть рекомендована в качестве системы управления взаимосвязанным двухдвигательным электроприводом конвейеров.

Использование предлагаемой системы автоматического регулирования позволяет повысить энергоэффективность двухдвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода, а также повысить ресурс механических частей конвейера.

Основные результаты проведенных исследований состоят в следующем:

- выполнен анализ существующих технических реализаций асинхронного двухдвигательного электропривода ленточного конвейера;
- выполнен анализ возмущающих факторов асинхронного двухдвигательного электропривода в установившемся режиме с учётом переменного грузопотока и в пусковых режимах;

- разработана математическая модель асинхронного двухдвигательного электропривода ленточного конвейера и проведена оценка её адекватности путём сопоставления теоретических и экспериментальных данных;
- определены критерии оптимальности в установившемся и пусковом режимах с учётом переменного грузопотока;
- выполнен синтез контура адаптации системы управления регулируемым электроприводом ленточного конвейера;
- выполнен синтез САП взаимосвязанного двухдвигательного электропривода ленточного конвейера;
- разработана аппаратная часть системы управления двухдвигательного электропривода ленточного конвейера;
- проведена оценка эффективности предлагаемой адаптивной системы автоматического регулирования электропривода в процессе промышленных испытаний.