

О Т З Ы В

официального оппонента, кандидата технических наук, Самохвалова Дмитрия Вадимовича на диссертацию Мальковой Яны Михайловны на тему: «Автоматизированный электропривод шаровой мельницы с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

1. Актуальность темы диссертации

Электроприводы шаровых мельниц характеризуются высокой установленной мощностью. Отечественные системы электроприводов горнорудной промышленности строятся, как правило, на основе нерегулируемых электродвигателей, что приводит к неэффективному использованию электроэнергии. В соответствии с Указом Президента РФ направление «Высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика» является приоритетным направлением научно-технологического развития Российской Федерации. Процесс измельчения в шаровых мельницах характеризуется высокой вариативностью, обусловленной изменчивостью свойств руды. Для компенсации данного возмущения нагрузки целесообразно применять адаптивное управление электроприводом, обеспечивающее работу в эффективном скоростном диапазоне при изменяющихся параметрах процесса.

Таким образом, диссертационная работа Мальковой Яны Михайловны, посвященная разработке автоматизированного электропривода с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения, является актуальной и способствует решениям задач российской промышленности.

2. Научная новизна диссертации

Новизна диссертации Мальковой Я.М. состоит в том, что:

2.1 Установлена зависимость спектра тока статора приводного двигателя электропривода шаровой мельницы от изменения степени износа футеровки барабана.

2.2 Разработана динамическая модель процесса измельчения с адаптивными параметрами под кластер измельчаемой руды, позволяющая реализовать систему непрерывного мониторинга количества готового класса в продукте измельчения.

2.3 Разработан алгоритм вычисления оптимальной частоты вращения электродвигателя шаровой мельницы в технологической системе управления

ОТЗЫВ

ВХ. № 9- 199 от 19.09.21
АУ УС

электроприводом шаровой мельницы на основе динамической модели процесса измельчения.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Защищаемые Мальковой Я.М. научные положения являются логическим обобщением изложенного материала, приведенного во тексте диссертации. Полученные в работе выводы и результаты подтверждены актом внедрения, а также апробированы на пяти профильных научно-практических конференциях, где обсуждались со специалистами в области электропривода и автоматизации шаровых мельниц.

Вынесенные на защиту основные положения и основные выводы логически связаны с целью и идеей диссертации, состоящей в разработке интегрированного в технологическую систему управления автоматизированным электроприводом шаровой мельницы алгоритма управления скоростью вращения барабана, обеспечивающего автоматическую адаптацию к изменениям свойств руды, параметрам шаровой загрузки и износа футеровки барабана.

4. Научные результаты, их ценность

Научная ценность результатов заключается в том, что автором предложен комплексный алгоритм расчета оптимальной частоты вращения электродвигателя в составе автоматизированного электропривода шаровой мельницы. Предложенный алгоритм является универсальным и может быть адаптирован для управления различными шаровыми мельницами.

Полученные в диссертационной работе Мальковой Я.М. результаты представляют научный и практический интерес для развития и расширения способов энергоэффективного управления электроприводами шаровых мельниц.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 11 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, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается следующим:

- предложен алгоритм мониторинга износа футеровки барабана на основе

анализа спектра тока статора приводного двигателя электропривода шаровой мельницы;

- предложена структура автоматизированного электропривода шаровой мельницы в составе с каскадным преобразователем частоты и с интеллектуальной системой управления измельчением;
- результаты исследований использованы в производственном процессе ООО «Лаборатория инжиниринга» (акт внедрения от 14.04.2025 г.).

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты рекомендуется использовать на горно-обогатительных комбинатах при эксплуатации частотно-регулируемых приводов шаровых мельниц, а также на предприятиях, разрабатывающих комплексные системы автоматизации на основе автоматизированного электропривода для управления процессом измельчения.

7. Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует направлениям исследований, предусмотренным паспортом научной специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы».

В части п.1 – «компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования» в Matlab-Simulink разработана компьютерная модель автоматизированного электропривода шаровой мельницы, включая систему векторного управления электродвигателем, каскадный инвертор напряжения, асинхронный электродвигатель, механическую систему барабана и динамику внутримельничной загрузки. В результате имитационного моделирования определены гармоники тока статора, зависящие от степени износа футеровки барабана, и пакеты гармонических составляющих статора, обусловленные режимом работы инвертора.

В части п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления» предложены корректирующие алгоритмы в составе векторной системы управления двухдвигательного электропривода при изменении индуктивности цепи намагничивания, которые обеспечивают равномерное распределение электромагнитных моментов между приводными машинами и снижение амплитудных значений потребляемых токов.

В части п.4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при

разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов» произведена оценка увеличения количества производимой продукции, выполнена оценка энергетического эффекта по критерию удельных затрат электроэнергии на тонну производимого концентрата. Для предложенной структуры электропривода выполнен расчет экономии электроэнергии, требуемой для измельчения руды, при одновременном увеличении количества производимой продукции.

8. Замечания и вопросы по работе

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

Замечание 1. На стр. 57 приведены допущения, принятые при моделировании электропривода, в частности, указано, что электромагнитный момент равен механическому моменту на валу. Данное допущение означает, что при моделировании не учитывались магнитные потери в сердечнике ротора, механические потери в электродвигателе на вентиляцию и трение в подшипниках, а также добавочные потери в обмотках и стали сердечников статора и ротора, обусловленные их зубчатостью, и высшими гармониками токов, в том числе и гармониками, имеющими место при ШИМ. Представляется, что данное допущение является слишком грубым для исследований, посвященных повышению энергоэффективности электропривода.

Замечание 2. В диссертации отсутствует математическое описание асинхронного двигателя, используемого в компьютерной модели. Необходимость раскрытия содержимого математической модели двигателя обусловлено тем, что на рис.2.11 на выходе двигателя выдаются значения проекций потокосцепления ротора, при том, что реальный двигатель эти значения не выдаёт, и для их вычисления требуется применять наблюдатель потокосцепления по показаниям датчика положения ротора. Также из текста диссертации неясно каким образом были получены параметры схемы замещения электродвигателя.

Замечание 3. На стр. 91 написано, что в электроприводе используется датчик потокосцепления ротора, неясно каким образом возможна физическая реализация такого датчика. Возможно под этим датчиком подразумевается наблюдатель потокосцепления ротора, но его структура в работе не приведена. Вычислитель переменных в формулах (4.17) не содержит уравнения наблюдателя угла потокосцепления ротора.

Замечание 4. На стр. 93 автор пишет о том, что рассматриваемый электропривод мельницы является безредукторным. Между тем, из рис.4.7 следует, что кинематика мельницы содержит зубчатую передачу от ведущих шестерен к зубчатому венцу барабана. Это означает, что автор выносит кинематику зубчатой передачи за пределы электропривода. Действительно, в соответствии с ГОСТом «Электроприводы. Термины и

определения» исполнительные органы рабочей машины в электропривод не включаются. Но дело в том, что в шаровой мельнице исполнительными органами являются футеровка, установленная на внутренней стенке барабана, и шары. Зубчатая же передача напрямую на руду не воздействует и, поэтому, имеет смысл относить ее к электроприводу, а не к исполнительным органам мельницы. В противном случае возникает смысловое противоречие между ГОСТом и инженерным пониманием. В безредукторном приводе мельницы, разработанном компанией АВВ, отсутствуют зубчатый венец барабана и ведущая шестерня, что дает нам прецедент использования термина «безредукторный» для мельниц, который можно считать корректным.

Замечание 5. На стр.111 написано, что для коммутации токов использована синусоидальная ШИМ. Это выглядит странно при том, что одним из критериев оптимизации электропривода, рассматриваемых в работе, является энергоэффективность. При применении синусоидальной ШИМ имеем недоиспользование мощности трансформатора и управляемого выпрямителя на 13-20%, при этом абсолютные потери мощности в меди и в стали трансформатора, в силу его увеличенной мощности, будут превышать потери, которые можно было бы получить при использовании векторной прерывистой ШИМ. Неясно, чем руководствовался автор, применяя синусоидальную ШИМ.

Замечание 6. В тексте диссертации отсутствует обоснование выбора числа уровней каскадного преобразователя для рассматриваемого электропривода шаровой мельницы. Почему именно 11 уровней, не больше и не меньше? Как проектировщику определять подходящее число уровней? Исходя из рис.4.6 одиннадцатиуровневый преобразователь требует использования многообмоточного трансформатора с одиннадцатью вторичными обмотками, причем обмотки выполнены с фазосмещающими отводами (для снижения пульсаций в звеньях постоянного тока). Такой трансформатор является сложным и дорогостоящим изделием. Кроме того, нужно иметь в виду, что современный процесс разработки электропривода предполагает обязательное использование компьютерного моделирования (для ускорения разработки), а моделирование такого трансформатора несет существенные трудности, в том числе, на этапе оценки параметров схемы замещения трансформатора, которая представляет собой Т-образную схему с одним плечом первичной обмотки и одиннадцатью плечами вторичных обмоток.

Замечание 7. В параграфе 4.4 рассмотрено моделирование двухдвигательного электропривода шаровой мельницы, но опущены вопросы, касающиеся компенсации возмущающих воздействий, вызванных зубцовыми гармониками, и неравномерностью зубцов.

Несмотря на имеющиеся замечания полученные в диссертации результаты достоверны и обоснованы. Приведенные в настоящем отзыве замечания не снижают научной и практической ценности диссертации.

Заключение по диссертации

Диссертация «Автоматизированный электропривод шаровой мельницы с интегрированным мониторингом параметров процесса измельчения», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор, Малькова Яна Михайловна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент,
доцент кафедры робототехники и
автоматизации производственных систем,
ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
кандидат технических наук
Самохвалов Дмитрий Вадимович



12.09.2025

Подлинность оригинальной подписи официального оппонента заверяется должностным лицом организации по основному месту работы с проставлением печати организации или нотариально.

Подпись официального оппонента, к.т.н., доцента кафедры робототехники и автоматизации производственных систем Самохвалова Дмитрия Вадимовича заверяю

М.П.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
НАЧАЛЬНИК ОДС
Т.Л. РУСЯЕВА



Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Почтовый адрес: 197022, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф.

Официальный сайт в сети Интернет: <https://etu.ru/>

Эл. почта: dvsamokhvalov@etu.ru

Телефон: +7 (812) 234-46-51