

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, доцента Зюзева Анатолия Михайловича
на диссертацию Соколовского Михаила Александровича
«Повышение эффективности энергопотребления комплексом технологического
оборудования горноперерабатывающего предприятия», представленной на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Представленная к защите диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи повышения эффективности энергопотребления комплексом технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия и соответствует государственным и отраслевым программам развития электротехники в стране.

Ключевыми задачами, решаемыми в диссертационной работе, являются:

- исследование комплексов технологических электроустановок и производственных процессов при помощи авторских программно-аппаратных средств, а также анализ системы ценообразования конечной стоимости электрической энергии, с последующей разработкой мероприятий по повышению электроэнергетической эффективности промышленного предприятия;

- разработка выпрямительно-инверторного преобразователя с двухсторонним обменом энергией между сетью и объединенным звеном постоянного тока для многодвигательного электропривода комплекса технологического оборудования предприятия;

- разработка и исследование на имитационной модели системы управления транзисторным коммутатором для выпрямительно-инверторного преобразователя;

- разработка и внедрение системы управления и контроля энергопотребления комплексом технологического оборудования для обеспечения требуемого графика нагрузки и повышения экономической эффективности предприятия.

Актуальность темы диссертации. Современные горноперерабатывающие предприятия отличаются высокой энергоемкостью и непрерывностью производственного процесса, а также наличием большого количества мощного высокотехнологичного оборудования с современным частотно-регулируемым электроприводом на базе автономного инвертора напряжения. К недостаткам комплекса технологического оборудования по переработке концентрата, рассматриваемого в работе, следует отнести потери электрической энергии при торможении асинхронных машин и значительное искажение тока сети диодными выпрямителями в составе электроприводов комплекса, кроме того, непрерывный характер производственных процессов препятствует внедрению алгоритмов рационального управления энергопотреблением комплекса. Таким образом, разработка комплекса мер по обеспечению синусоидального тока сети, снижения энергопотребления и рационального управлением графиком нагрузки сети является актуальной задачей.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректным применением методов математического моделирования электротехнических систем, теории электрических цепей, теории электропривода, автоматического управления и вычислительного эксперимента, а также анализом результатов, полученных в ходе исследований в условиях опытно-промышленной эксплуатации.

Достоверность полученных результатов, основных научных положений и выводов подтверждается имитационным моделированием, численным экспериментом и результатами промышленной эксплуатации.

Новизна научных результатов, полученных соискателем, заключается в следующем:

1. Разработана система энергопотребления комплексом частотно-регулируемых электроприводов промышленного предприятия с формированием синусоидального тока сети и сниженным энергопотреблением.

2. Предложен оригинальный подход для двухстороннего обмена энергией между комплексом частотно-регулируемых электроприводов технологического оборудования и сетью за счет переключения диодного выпрямителя с активным фильтром тока сети на транзисторный выпрямитель.

3. Предложен принцип построения системы управления транзисторным коммутатором для выпрямительно-инверторного преобразователя, обеспечивающий синусоидальный ток сети и снижение энергопотребления комплексом технологического оборудования.

4. Разработана имитационная модель выпрямительно-инверторного преобразователя, позволившая установить пределы прямого и обратного переключения диодного выпрямителя с активным фильтром тока сети и транзисторного выпрямителя для наиболее эффективного режима энергопотребления комплексом технологического оборудования

5. Применительно к горноперерабатывающему предприятию предложены и реализованы алгоритмы смещения графика нагрузки непрерывного производственного процесса для снижения стоимости электрической энергии с учетом требований системного оператора единой электроэнергетической системы.

Новизна технических решений, представленных в диссертации, подтверждена двумя патентами на изобретение: пат. 2625729 «Устройство управления и контроля энергопотребления», пат. 2713493 «Выпрямитель с активным фильтром».

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработано устройство для двухстороннего обмена электрической энергией между сетью и объединенным звеном постоянного напряжения с обеспечением синусоидального тока в силовом трансформаторе подстанции и в ЛЭП. При этом, в зависимости от режима работы, в питающей сети поддерживается величина суммарного коэффициента гармонических искажений тока на уровне от 2,3 до 2,8 %, а коэффициента мощности в пределах от 0,995 до 0,999.

2. Разработаны математическая и имитационная модель системы управления выпрямительно-инверторного преобразователя для исследования физи-

ческих процессов, протекающих при обмене энергией в системе электроснабжения.

3. Разработана система и устройство рационального управления комплексом технологического оборудования. Величина снижения нагрузки в условиях промышленной эксплуатации составила 88,9 % от суммарной нагрузки исследуемых технологических процессов.

4. Разработаны математическая и имитационная модель системы ограничения энергопотребления комплексом технологического оборудования.

5. Разработан программно-аппаратный комплекс для дистанционного исследования параметров энергопотребления регулируемых систем электропривода и системы электроснабжения технологических процессов.

Результаты научных исследований внедрены в действующую систему автоматизированного управления технологическими процессами, что подтверждается актом внедрения результатов научно-исследовательской работы общества с ограниченной ответственностью «Амурский гидрометаллургический комбинат».

Апробация работы и публикации полученных результатов исследования. Диссертация имеет достаточную степень апробации. Основные научные результаты и выводы диссертационной работы были представлены на всероссийских и международных конференциях.

Результаты исследований опубликованы в 20 научных работах, из них пять статей в рецензируемых научных изданиях и одна публикация в издании, индексируемом в международной базе данных Scopus. Также получены два патента на изобретение, четыре патента на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Анализ выполненной диссертационной работы. Представленная диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 119 наименований. Текст диссертации изложен на 189 страницах (включая 6 весьма содержательных приложений), из них 125 страниц основного текста, который содержит 71 рисунок и 9 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность, приведены цель и задачи, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, указаны положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены и приведены результаты анализа существующих технических решений для рационального использования энергии торможения частотно-регулируемого асинхронного электропривода, снижения искажений тока в системах электроснабжения, снижения энергопотребления технологических электроустановок на заданном интервале времени. Проведён анализ технической документации, нормирующей показатели качества напряжения и тока в системах электроснабжения. Выделены перспективные направления для решения задачи повышения энергетической эффективности технологических комплексов.

Вторая глава посвящена рассмотрению состава комплексов технологического оборудования и производственных процессов горноперерабатывающе-

го предприятия. Дана краткая характеристика системы электроснабжения предприятия, описаны применяемые в производстве технологические механизмы. Выполнен анализ системы ценообразования конечной стоимости электрической энергии, выявлены технологические процессы, наиболее подходящие для управления энергопотреблением в соответствии с разработанными алгоритмами. Сформулированы основные требования по совершенствованию комплекса технологического оборудования.

В третьей главе представлен усовершенствованный электротехнический комплекс технологического оборудования. Описаны силовая схема, алгоритм коммутации элементов, математическая и имитационная модель системы управления для выпрямительно-инверторного преобразователя в составе комплекса, обеспечивающего двухсторонний обмен электрической энергией между группой частотно-регулируемых электроприводов и питающей сетью с синусоидальным током потребления и сниженным энергопотреблением. Также описаны математическая модель и алгоритмы перераспределения энергопотребления комплекса на заданных интервалах времени для системы управления и контроля энергопотребления, посредством которого выполняется рациональное управление графиком нагрузки комплекса.

В четвертой главе представлены результаты исследования усовершенствованного электротехнического комплекса технологического оборудования в условиях промышленной эксплуатации, выполнена оценка точности результатов имитационного моделирования и фактических показателей. Также дано описание и область применения разработанного программно-аппаратного комплекса, предназначенного для научных исследований технологических электроустановок, производственных систем электроснабжения и распределения электрической энергии.

В заключении сформулированы полученные результаты и выводы по диссертационной работе.

В приложениях представлены справочные данные о системе электроснабжения исследуемого предприятия и составляющие конечной стоимости электрической энергии по месяцам за календарный год. Приведено полное описание имитационной модели системы управления энергопотреблением технологического комплекса, программный код на языке Matlab для математических блоков в составе имитационной модели выпрямительно-инверторного преобразователя, копии актов внедрения результатов диссертационной работы и графический материал по результатам измерений, полученным в процессе экспериментального исследования модернизированного комплекса технологического оборудования в условиях промышленной эксплуатации.

Сформулированные в диссертационной работе задачи исследования выполнены, цель диссертационной работы достигнута. Этапы исследования, представленные в работе, в полной мере отражены в соответствующих главах диссертации и сопровождаются достаточным количеством графического и справочного материала

Диссертация написана технически грамотным языком, имеет логичную и связную структуру, является завершенной научно-квалификационной работой.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации. Рукопись автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации и представлена в виде краткого описания глав, основных результатов исследования и выводов по работе.

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011, оформлены в виде рукописи, имеют регламентированную структуру и правильно оформленный список литературы.

Замечания и вопросы по диссертации

1. Многократно используемое в диссертации определение тормозного режима частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя, как режима «динамического торможения» с рассеиванием энергии на «тормозном» резисторе (стр.41), не соответствует определению данного режима, исходя из условия энергетического баланса в двигателе. В режиме «динамического торможения» статор двигателя возбуждается постоянным током, а вся кинетическая энергия ротора преобразуется в электрические потери, выделяющиеся в обмотке ротора без передачи в звено постоянного тока.

2. На стр. 17, 18, 19 диссертации при обсуждении векторных диаграмм используется некорректная терминология в отношении мощности: «индуктивная мощность» «потребление емкостной мощности», «при положении вектора меньше (больше) нуля»; встречаются ошибки пунктуации, затрудняющие восприятие материала.

3. Из автореферата остаётся неясным, какими временными интервалами оперирует автор при формировании рекомендаций по управлению графиком технологических нагрузок, это видно только из текста диссертации. Можно ли дать наиболее общие рекомендации по применению предлагаемого метода распределения нагрузки на относительно коротких временных интервалах технологического цикла?

4. Рассматривалась ли возможность использования объединённого фильтра-конденсатора в звене постоянного тока? Какая топология сети постоянного тока рекомендуется, учитывая пространственное распределение объектов комплекса технологического оборудования?

5. В каком соотношении требуется изменять индуктивность $L1/L2$ в цепи VT при переключении его режима работы?

6. Какая коммутационная аппаратура предлагается в качестве ключей K1, K2? Какие условия коммутации ключей необходимо выполнять? Какие требования к времени переключения данных аппаратов возникают?

7. Отмечая высокий уровень проработки в диссертации Matlab-модели предлагаемого выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП), прошу уточнить: какова длительность «машинного (компьютерного)» времени моделирования процессов на рис.3.37; насколько действительно были необходимы в модели блоки «Memory1» - «Memory6»?

Заключение

Диссертация Соколовского Михаила Александровича соответствует пунктам 1 и 3 паспорта научной специальности 05.09.03 – Электротехнические

комплексы и системы, требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук:

Пункт 9 – диссертация Соколовского М.А. является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития промышленных электротехнических комплексов страны.

Пункт 10 – диссертация написана автором самостоятельно, имеет прикладной характер, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

Предложенные автором диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Пункты 11, 13 – Основные научные результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, из них пять статей в рецензируемых научных изданиях и одна публикация в издании, индексируемом в международной базе данных Scopus. Также получены 2 патента на изобретение, 4 патента на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Пункт 14 – Использованные результаты научных работ, полученные Соколовским М.А. лично или в соавторстве, отражены в тексте диссертации. На материалы других авторов, отраженных в диссертации, имеются ссылки на источник заимствования.

Автор диссертации Соколовский Михаил Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Зюзев Анатолий Михайлович

«21» января 2022 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Почтовый адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, дом 19

Телефон: +7 (343) 375-44-44

Электронный почтовый адрес: contact@urfu.ru

Официальный сайт: <https://urfu.ru/>

Подпись Зюзева А.М. заверяю:

