


На правах рукописи



Егоров Владимир Федорович

**Повышение эффективности работы цикловых машин
металлургического производства на основе метода
оценки неравномерности нагрузок и энергозатрат**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(металлургического производства)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

31 ОКТ 2013



005536176

Новокузнецк – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Дворников Леонид Трофимович

Официальные оппоненты: Славин Вячеслав Семенович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный ~~технологический~~ университет ~~И.И. Иосифов~~, заведующий кафедрой «Общетехнические дисциплины»;

Каледин Валерий Олегович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Новокузнецкий филиал – институт Кемеровского государственного университета», декан факультета информационных технологий;

Лехов Олег Степанович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», заведующий кафедрой механики

Ведущая организация федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита диссертации состоится «10» декабря 2013 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.252.04 при ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул.Кирова, 42, ауд. 3п.

Факс: (3843) 465792; e-mail: d212_252_04@sibsiu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет».

Автореферат разослан «24» октября 2013 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.х.н., профессор



Горюшкин Владимир Федорович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Без повышения качества и эффективности работы новой создаваемой техники невозможно совершенствование материально-технической базы промышленных предприятий, в том числе металлургических. Современное металлургическое производство характеризуется быстрым ростом интенсификации технологических режимов, созданием быстроходных энергоемких машин, что неизбежно ставит все более жесткие требования к оборудованию, особенно, работающему в цикловых режимах. Как правило, в таких машинах нагрузки имеют пиковый характер, кратковременное действие, значительную продолжительность периодов холостого хода. Многие из них являются виброактивными, вызывающими повышенные дополнительные динамические нагрузки.

Основу энергетической базы металлургического производства составляют электрические двигатели. Механические характеристики двигателей, возможность управления ими определяют технологические качества рабочих машин. В свою очередь, реальные механические нагрузки, характер движения взаимосвязанных масс машины, влияют на работу двигателей и, следовательно, на машину в целом. Неравномерный характер нагружений приводит к повышенному расходу электрической энергии, увеличению используемой мощности электродвигателей и к перегрузкам элементов механической системы. В связи с этим, задачи снижения материалоемкости оборудования, повышения энергетической эффективности, надежности, улучшения его динамических характеристик являются весьма актуальными, определяющими уровень развития машиностроения на перспективу. Успешное решение таких задач неразрывно связано с совершенствованием технологических процессов, обеспечивающих наименьшие энергозатраты, выравнивание рабочих нагрузок, повышение качества переходных процессов и перераспределение мощностей между двигателями.

Развитие производства, увеличение объемов выпуска продукции, рост парка технологических агрегатов настоятельно требуют разработки научно-обоснованных методов оценки комплекса взаимосвязанных процессов эксплуатации сложных машин, что может обеспечить прогнозирование направлений совершенствования их конструкций, принятие новых технических решений, приводящих к повышению надежности, производительности, экономичности и качества машин в целом.

Целью исследований является разработка научных основ выбора режимов нагруженности двигателей и механических передач цикловых машин металлургического производства, обеспечивающих повышение их производительности, надежности и уменьшение энергопотребления на основе метода оценки неравномерности рабочих нагрузок и энергозатрат.

Задачи исследований:

1. Научное обоснование метода оценки неравномерности рабочих нагрузок и энергозатрат при технологических процессах цикловых машин металлургического производства.

2. Разработка нормативных основ и классификации цикловых машин по степени неравномерности нагрузок.

3. Совершенствование методов выравнивания рабочих нагрузок цикловых машин с разработкой специальных технических средств, обеспечивающих регулирование их рабочих процессов в заданном режиме, с целью повышения энергетической эффективности и производительности.

4. Разработка методов оптимизации переходных процессов и технических параметров машин на основе баланса энергозатрат с целью установления эффективных с точки зрения энергоемкости и производительности условий эксплуатации цикловых машин.

5. Развитие теоретических основ проектирования, включающих компьютерное моделирование процесса выравнивания рабочих мощностей двигателей в многодвигательном приводе с общим механическим валом и обеспечение ограничения динамических нагрузок в многомассовых системах.

6. Внедрение результатов теоретических и экспериментальных исследований метода оценки неравномерности нагрузок и энергозатрат в практику производства, применение метода для усовершенствования и развития оборудования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Метод оценки неравномерности рабочих нагрузок и энергетических затрат цикловых машин металлургического производства: научные основы метода и критерии практической реализации по определению неравномерности нагрузок цикловых машин и перспективности их выравнивания.

2. Классификация цикловых машин по степени неравномерности нагрузок и энергозатрат.

3. Теоретические и экспериментальные исследования энергосиловой нагруженности цикловых машин, новые технические решения целенаправленного выравнивания нагрузок в передаточных и исполнительно-преобразующих механизмах, обеспечивающие существенное снижение загруженности приводов, что обеспечивает повышение их энергетической эффективности и увеличение производительности машин, работающих в сложных повторно-кратковременных режимах, с высокой частотой включений, сменой скоростей и направлений движения.

4. Методы выбора переходных процессов и технических параметров цикловых машин с оптимизацией их значений на основе баланса энергозатрат, обеспечивающих выполнение рабочих режимов с минимальными затратами энергии.

5. Теоретические исследования и компьютерное моделирование процесса выравнивания рабочих мощностей между двигателями постоянного тока независимого возбуждения многодвигательного привода с общим механическим валом и ограничение динамических нагрузок многомассовых систем.

6. Технические решения, обеспечивающие снижение неравномерности нагрузок и энергозатрат, приводящие к повышению надежности, срока службы, производительности и экономичности цикловых машин в целом.

Личный вклад автора заключается в постановке задач, развитии теоретических положений и анализе результатов научных исследований, разработке метода и обосновании критериев количественной оценки неравномерности нагрузок, в разработке классификации машин по степени неравномерности рабочих нагрузок, в обосновании способа выравнивания нагрузок «безынерционных» систем, в разработке методов оптимизации переходных процессов и технических параметров цикловых машин, в создании программного обеспечения расчета скоростей, передаточных отношений, формировании переходных процессов, развитии теоретических основ выравнивания нагрузок между двигателями многодвигательного электропривода с общим механическим валом, в совершенствовании конструкций машин, снижении неравномерности их рабочих нагрузок, повышении надежности, производительности, уменьшении энергозатрат и металлоемкости.

Достоверность результатов: теоретические исследования базируются на фундаментальных законах соответствующих разделов механики. При решении поставленных научно-практических задач использовались: математический аппарат дифференциального и интегрального исчисления, классические и численные методы оптимизации функций, математическое моделирование многомассовых и многодвигательных электромеханических систем, проведение экспериментальных исследований с целью идентификации их с аналитическими выводами, в обосновании соответствия теоретических и экспериментальных результатов. Достоверность и новизна научных и технических решений подтверждена эффективностью результатов промышленных испытаний и внедрением в производство, свидетельствами на изобретения и патентами.

Научная новизна исследования заключается:

- в научном обосновании метода оценки неравномерности нагрузок и энергозатрат в рабочих процессах цикловых машин металлургического производства, устанавливающего взаимосвязи между величинами эквивалентных нагрузок при текущих режимах и при максимально выровненных нагрузках, допускающего возможность определения неравномерности нагрузок статических и динамических процессов в системах с одиночными и многодвигательными приводами, что благодаря количественной определенности и однозначности оценок позволяет прогнозировать и целенаправленно осуществлять преобразование нагрузок в соответствии с требуемыми эксплуатационными пока-

зателями машин;

- в разработке пятиуровневой классификации цикловых машин по неравномерности нагрузок и энергозатрат, позволяющей регламентировать энергоэффективность их использования и дающей возможность оценивать имеющиеся резервы снижения энергозатрат и металлоемкости машин;

- в разработке новых научных и технических решений на базе передаточных и исполнительно-преобразующих механизмов, не использующих накопители энергии, и обеспечивающих выравнивание нагрузок путем варьирования передаточными отношениями и размерами рабочих звеньев;

- в обосновании оптимальных режимов переходных процессов и технических параметров цикловых машин на основе метода оценки баланса энергозатрат, исследование влияния отклонения скорости и передаточного отношения от оптимальных значений на изменение производительности и нагруженности цикловых машин;

- в выявлении условий равномерной загрузки двигателей на основе разработки теоретических подходов к оценке неравномерности нагрузок и компьютерного моделирования многодвигательного электропривода постоянного тока независимого возбуждения с общим механическим валом, обеспечивающим при регулировании напряжений питания по цепям якорей равномерное распределение мощностей;

- в разработке совмещенной с электроприводом структурной схемы многомассовой механической системы с учетом упругих связей и демпфирования и на ее основе компьютерной модели, позволяющей выявлять возможности ограничения динамических нагрузок.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- разработан метод определения неравномерности нагрузок цикловых машин металлургического производства, позволяющий количественно однозначно, независимо от их технической принадлежности оценивать неравномерность нагрузок и энергозатрат в рабочих процессах, допускающий возможность прогнозирования и целенаправленного формирования нагрузок, для практической реализации которого разработаны критерии, позволяющие производить оценку неравномерности нагрузок и энергозатрат с учетом конструктивных особенностей машин;

- обоснованы важные для практики уровни классификации по неравномерности распределения нагрузок привода и энергозатрат цикловых машин металлургического производства (I -25 % , II -50 % , III -75 % , IV -100 % , V >100 %), позволяющие применительно к практическим условиям достоверно регламентировать их энергосиловые режимы, резервы снижения энергозатрат и металлоемкости машин;

- разработаны новые технические решения передаточных и исполнительных механизмов, не использующих накопители энергии, обеспечивающих вы-

равнивание нагрузок путем варьирования передаточными отношениями и размерами рабочих звеньев, что позволяет существенно снизить загруженность приводов и увеличить производительность машин, работающих в сложных повторно-кратковременных режимах;

- разработан комплекс мероприятий, защищенных авторскими свидетельствами и патентами (а.с. № 912401, № 1097455, №1219508, № 1602631, № 1606264, № 1654197, патент № 2105641 и другие), направленных на повышение производительности цикловых машин, снижение неравномерности рабочих нагрузок, металлоемкости и энергозатрат;

- предложены приемы оптимизации переходных процессов и технических параметров цикловых машин, определены возможности организации переходных процессов без ограничения моментов (или с ограничением одного из них) перегрузочной способностью двигателя, обеспечении максимального быстродействия по трапецеидальным скоростным диаграммам, с равной длительностью периодов пуска и торможения, определены допустимые отклонения передаточного отношения и скорости от оптимальных значений;

- показано, что при равных магнитных потоках равномерное распределение мощностей между двигателями многодвигательного электропривода постоянного тока независимого возбуждения с общим механическим валом, питаемых от отдельных регулируемых источников, при различных жесткостях механических характеристик обеспечивается регулированием напряжений питания по цепям якорей;

- разработаны принципы конструирования машин, в которых снижение металлоемкости и энергозатрат, повышение качества функционирования и производительности достигается путем контролируемого, целенаправленного варьирования нагрузкой привода;

- созданное научное направление легло в основу 20 конструкторских решений, защищенных авторскими свидетельствами и патентами, результаты научных и экспериментальных исследований вошли в программы учебного процесса по курсу «Электропривод металлургических машин и агрегатов» Сибирского государственного индустриального университета.

Реализация результатов работы. Внедрение технических решений на предприятиях металлургической промышленности (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и ОАО «Евразруда» Абагурский филиал) позволило снизить: затраты электроэнергии на разгрузку одного полувагона на 38 %, необходимую мощность электродвигателей в 1,5 – 1,6 раза, нагрузки двигателей механизмов поворота 350 т конверторов в 1,5 раза (на 240 кВт каждого из двух конверторов), увеличить производительность ножниц блюминга на 3 – 4,5 %, повысить стойкость газоплунительного клапана доменной печи в 1,8 раза (с 10 до 18 месяцев).

Экономия электроэнергии по результатам внедрений составляет около 900 МВт·ч в год. Общий годовой экономический эффект в ценах 2012 г. со-

ставляет более 100 млн. руб.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях: Межвузовской конференции «Управление электромеханическими объектами в горной промышленности», Кемерово, 1980 г.; Всероссийской конференции «Интенсификация технологических процессов в металлургии и повышение качества готовой продукции», Новокузнецк, 1983 г.; Всесоюзной конференции, посвященной рациональному использованию металла в автотракторостроении, Челябинск, 1984 г.; на научно-технических семинарах: Московское высшее техническое училище им. Баумана, Москва, 1986 г.; Ленинградский политехнический институт, Ленинград, 1987 г.; Западно-Сибирский металлургический комбинат (ЗСМК), Новокузнецк, 1993 г., 1998 г.; на технических семинарах кафедр по электроприводу и механическому оборудованию металлургических заводов, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ), Новокузнецк, 2001 – 2010 гг.; на расширенных семинарах кафедр «Теория механизмов и машин и основ конструирования», «Механическое оборудование металлургических заводов», СибГИУ, Новокузнецк, 2009 г., 2012 г., 2013 г., «Общетехнические дисциплины», ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 2011 г.; ежегодных научно-практических конференциях по проблемам механики и машиностроения Кузбасского научного центра Сибирского отделения Международной Академии Наук Высшей Школы, СибГИУ, Новокузнецк, 1998 – 2011 гг.; на технических семинарах ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», 2011 г., Абагурский филиал ОАО «Евразруда», 2012 г.

Соответствие работы паспорту специальности. Диссертационная работа по своей цели, задачам, содержанию, методам исследования, научной новизне, практической значимости соответствует пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций» и пункту 5 «Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса» паспорта специальности 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (металлургического производства)».

Публикации. По теме диссертации опубликованы: монография; 44 научных статьи, в том числе 40 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАКом, а также получены патент и 19 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложенных на 280 страницах машинописного текста, включая 103 рисунка, 27 таблиц, список литературных источников, содержащий 237 наименований, и пяти приложений на 49 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель и ставятся задачи исследования. Дается описание научных положений выносимых на защиту, обосновываются достоверность, новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен обзор работ близких к теме диссертации. Анализируются современные принципы оптимизации производственных процессов, состояние и условия эксплуатации цикловых машин металлургического производства с электрическим приводом, работающих в условиях частых пусков, смен скоростей и направлений движения. Машины данного класса составляют основную часть оборудования прокатного, кузнечно-штамповочного, дробильного производств. Сложившаяся структура технологических процессов металлургических предприятий страны отличается высоким уровнем потребления энергетических ресурсов. Доля электроэнергии в себестоимости продукции составляет около 40 %, и уменьшение этого показателя весьма целесообразно. По мере развития техники разрабатывались и формировались способы и концепции энергетической эффективности ее эксплуатации. Особое внимание уделялось машинам, работающим в цикловых режимах. Снижение неравномерности нагрузок таких машин обеспечивалось путем изменения инерционных свойств и специального подбора режимов работы электродвигателей.

Работами В.П. Андреева, Н.И. Баимова, В.П. Бычкова, С.А. Воробьева, Л.Б. Гейлера, Ф.А. Горайко, Ф.К. Иванченко, О.П. Ильина, Н.Ф. Ильинского, К.И. Кожевникова, Д.А. Попова, В.Г. Созонова, С.П. Тимошенко, М.Г. Чиликина, В.П. Чистова, В.С. Зайцева и многих других исследователей предлагались направления рациональной эксплуатации и пути повышения технико-экономической эффективности цикловых машин. Однако различие в подходах к решению этой задачи пока не привело к единой стратегии их совершенствования. Прогрессирующее увеличение скоростей машин, необходимость автоматизации регулирования скоростных режимов, общая интенсификация производственных процессов потребовали максимального снижения инерционных сил в машинах. Это привело к увеличению неравномерности загрузки двигателей и элементов линий передач. Анализируя современное состояние техники, И. Я. Браславский отмечает, что высокая доля машин, имеет мощность, превышающую необходимую в 1,5 – 2,5 раза. Значительные перепады нагрузок, оказывают отрицательное влияние на надежность, работоспособность, долговечность узлов и конструкций в целом. Недостаточно изучена проблема выравнивания нагрузок многодвигательных электроприводов. Многие вопросы снижения неравномерности нагружения узлов машин фактически не рассматривались, в то время как их исследование имеет важнейшее значение. Все это требует пересмотра многих технических решений и методов организации обслуживания машин.

Анализ совершенствования цикловых машин приводит к заключению,

что, несмотря на достигнутые результаты, основными и нерешенными остаются задачи выравнивания нагрузок в линии привода, снижения расхода электроэнергии на выработку единицы продукции, повышения производительности и надежности конструкции машины в целом.

Во второй главе обосновывается метод оценки неравномерности нагрузок и энергетической эффективности эксплуатации цикловых машин.

При переменных технологических нагрузках проверка необходимой мощности двигателя производится в соответствии с затратами электроэнергии пропорциональными его среднеквадратичной (эквивалентной) мощности ($P_{эк}$).

Известно, что снижение неравномерности нагрузок приводит к уменьшению энергозатрат и необходимой мощности двигателей. В результате более рационального использования электродвигателей создается возможность повышения производительности цикловых машин. Для реализации этого положения, позволяющего заложить перспективы практического применения, необходимо оценивать эффективность снижения неравномерности нагрузок, найти закономерности для ее определения, учитывающие текущее положение и доступные возможности. Способ должен количественно, однозначно характеризовать изменение нагрузок независимо от их технической принадлежности. Решение поставленных вопросов обеспечило создание универсального метода оценки неравномерности нагрузок и энергозатрат в рабочих процессах цикловых машин металлургического производства, устанавливающего взаимосвязь между величинами эквивалентных нагрузок рабочих режимов и при максимально выровненных нагрузках, допускающего возможность определения неравномерности нагрузок статических и динамических процессов, в системах с одиночным, а также многодвигательным приводами.

Энергетическая эффективность работы машины определяется загрузкой привода. Анализ мощности двигателя возможен только на основе его нагрузочной диаграммы $M_d(t)$, $P_d(t)$. В начальной стадии анализа в распоряжении конструктора имеется лишь нагрузочная диаграмма механизма, представляющая зависимость статического момента от времени $M_c(t)$. Нагрузки двигателя отличаются от статических на величину динамической составляющей момента. Поэтому на основе нагрузочной диаграммы механизма строится нагрузочная диаграмма двигателя. Дальнейшая реализация метода возможна в следующей последовательности:

1. В соответствии с технологическим процессом строится нагрузочная диаграмма механизма. Статические нагрузки с учетом затрат энергии при передаче сил приводятся к валу двигателя.
2. После выбора двигателя определяется общий момент инерции системы, приведенный к валу двигателя.
3. Производится расчет переходных процессов и строится нагрузочная диаграмма двигателя.

4. По нагрузочной диаграмме определяются среднеквадратичные (эквивалентные) значения момента ($M_{эк}$) или мощности ($P_{эк}$) двигателя при рабочих режимах.

5. Строится нагрузочная диаграмма двигателя при условии полного выравнивания статической нагрузки, и вычисляются среднеквадратичные значения момента, мощности, соответствующие минимальному технически необходимому уровню для выполнения полезной работы $\min M_{эк}, \min P_{эк}$.

6. По значениям $P_{эк}/\min P_{эк}$ либо $M_{эк}/\min M_{эк}$, определяется эффективность работы машины.

Таким образом, анализ неравномерности нагрузок может производиться на основе критериев:

$$\lambda_B = P_{эк} / \min P_{эк} = M_{эк} / \min M_{эк} \geq 1 \text{ или } \varphi_B = (\lambda_B - 1) \cdot 100 \% \geq 0. \quad (1)$$

Для практического применения метода разработаны критерии оценки в соответствии с условиями работы и конструктивными особенностями машин.

В режиме установившегося движения нижние пределы $P_{эк}, M_{эк}$, соответствуют значениям $P_{ср}, M_{ср}$, поэтому в качестве критерия целесообразно принять отношения:

$$\lambda_B = P_{эк} / P_{ср} = M_{эк} / M_{ср} \geq 1, \text{ или } \varphi_B = (\lambda_B - 1) \cdot 100 \% \geq 0. \quad (2)$$

Приведение переменных нагрузок к эквивалентным, предложенное Д.Н. Решетовым при расчете деталей машин на выносливость, производится аналогично оценке среднеквадратичных моментов, но, как правило, с использованием более высоких степеней. Согласно выполненному исследованию, при соблюдении условий, что в процессе преобразования нагрузок рабочее время, скорость перемещения и совершаемая механическая работа остаются неизменными, пределы отношений $\lambda_B = M_{эк}/\min M_{эк} \geq 1; \varphi_B = (\lambda_B - 1) \cdot 100 \% \geq 0$ не зависят от показателя степени, расчета эквивалентных значений нагрузок. Следовательно, оценка неравномерности нагрузок элементов машин может осуществляться на основе зависимостей (2).

В машинах с многодвигательным приводом, кроме неравномерности технологических нагрузок, отличие механических характеристик двигателей приводит к рассогласованию их мощностей. Общий критерий неравномерности в этом случае:

$$\lambda_{мн} = P_{н мн} / P_{ср мн} = M_{эк макс} / M_{ср} = \lambda_B \cdot \lambda_D, \quad (3)$$

где $P_{н мн}, P_{ср мн}$ – номинальная мощность электропривода и мощность при средней нагрузке; $M_{эк макс}, M_{ср}$ – эквивалентный момент наиболее нагруженного двигателя и средний момент нагрузки; $\lambda_D = n / (1 + \alpha_{ср} (n - 1))$ – критерий неравномерности распределения мощностей между двигателями; n – число, совместно работающих двигателей; $\alpha_{ср}$ – средний коэффициент загрузки двигателей.

Оценка энергетической эффективности переходных процессов возможна сравнением длительностей рабочего ($T_{факт}$) и оптимального ($T_{опт}$) режимов:

$$\lambda_{п/п} = P_{эк} / \min P_{эк} = T_{факт} / T_{опт}. \quad (4)$$

Расчет значений $T_{\text{отт}}$ рассмотрен в третьей главе.

На основе вышеизложенного, машины могут классифицироваться по пяти основным уровням неравномерности нагрузок: 1 – низкий $\varphi_b \leq 25\%$, 2 – средний $25\% < \varphi_b \leq 50\%$, 3 – средневысокий $50\% < \varphi_b \leq 75\%$, 4 – высокий $50\% < \varphi_b \leq 75\%$, 5 – весьма высокий $\varphi_b > 100\%$. Знание неравномерности нагрузок машин позволяет обеспечивать их рациональную организацию технической эксплуатации, а также принятие мер к повышению энергетической эффективности, оценки резерва снижения энергозатрат и металлоемкости машин.

Исследования показали, что основными техническими решениями, обеспечивающими повышение равномерности нагрузок цикловых машин, являются:

- технологические с использованием специальных способов регулирования технологических сопротивлений. Наиболее прогрессивны непрерывные процессы, положительный эффект которых проявляется, как в повышении быстродействия, так и в снижении неравномерности нагрузок за счет исключения холостых режимов работы и пауз. Существенно снизить перепады нагрузок позволяет расширение нормального ряда машин;

- организационные с применением рационального размещения оборудования, рассчитанной периодичности подключения энергоемких агрегатов с учетом времени прохождения максимума нагрузки, регулирования транспортных потоков и другие;

- энергетические с использованием регулирования энергетических режимов:

- распределением работы между двигателем и аккумулятором механической энергии (АМЭ), развитие АМЭ на основе пружинных, гидравлических и иных систем при небольших массах подвижных элементов позволяет успешно применять их в цикловых машинах, работающих преимущественно в переходных процессах;

- регулированием нагрузок передаточными и исполнительно-преобразующими механизмами.

Пренебрегая потерями в передаточном механизме, мощность двигателя при установившемся движении можно определить:

$$P_{\text{дв}} = M_2 \omega_{\text{дв}} / \eta. \quad (5)$$

Выравнивание нагрузок на валу двигателя обеспечивается изменением передаточного отношения редуктора (η) пропорционально распределению моментов на валу исполнительного механизма (M_2). При высокой жесткости механической характеристики двигателя и плавном изменении передаточного числа, возникающие динамические нагрузки могут быть сведены к минимуму.

Выравнивание нагрузок исполнительно-преобразующими механизмами осуществляется изменением размера ведущего звена пропорционально рабочим нагрузкам. В качестве преобразующих элементов могут использоваться барабан лебедки, блоки, звездочки и другие элементы вращательного движе-

ния исполнительного механизма;

- оптимизацией скоростного режима и передаточного отношения редуктора;
- оптимизацией переходных процессов по критерию энергетической эффективности вместо максимума выхода готового продукта;
- применением многодвигательных приводов, позволяющих снизить момент инерции системы и уменьшить потери энергии в переходных процессах.

Во всех решениях кроме тех, где используются аккумуляторы кинетической энергии, необходимости их применения нет, что допускает выравнивание нагрузок в машинах, работающих с частыми пусками, сменами скоростей и направлений движения (ножницы, вагоноопрокидыватели, прессы и другие).

Общепринятым способом снижения динамических нагрузок является ограничение жесткостей трансмиссий и момента инерции системы. Однако снижение жесткости за счет уменьшения сечения вала (балки), несмотря на ограничение амплитуды колебаний, приводит к увеличению их удельной нагрузки. Снижение момента инерции может также приводить к увеличению нагрузок. Если колебания вызваны изменением статических сил (M_c), амплитуда волны $A = M_c / c$ не зависит от динамических процессов. Уменьшение момента инерции в этом случае при сохранении жесткости (c) не приводит к снижению нагрузок, но возрастет частота колебаний и приведенная нагрузка.

Таким образом, обоснован общий метод оценки неравномерности рабочих нагрузок и энергозатрат цикловых машин, определены критерии и их математические выражения. Установлены способы и основные технические решения, обеспечивающие повышение равномерности нагрузок цикловых машин, работающих в повторно-кратковременном режиме. Осуществлена классификация машин по уровням неравномерности нагрузок.

Полученные данные необходимы для последующего анализа и формирования эксплуатационных свойств цикловых машин.

В третьей главе приведены результаты исследования структуры машин и процессов формирования нагрузок двигателя и в линиях передач.

Как правило, машины металлургического производства, представляют рядные цепи с последовательным соединением элементов. Обычно в состав производственной машины (рисунок 1) входят электрический двигатель (M) с системой питания и управления ($СУ$), передаточный ($ПМ$) и исполнительный ($ИМ$) механизмы, с соединительными узлами (1, 2). Также используется безредукторный привод, не содержащий $ПМ$.

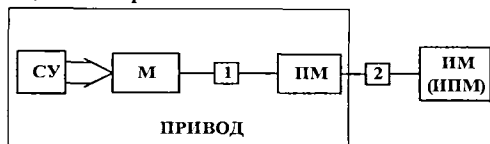
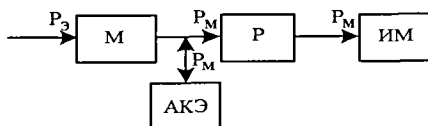


Рисунок 1 – Структурная схема производственной машины с редуктором

С целью снижения нагрузок в дробильных, ковочных, кузнечно-

штамповочных и других машинах применяют аккумуляторы кинетической энергии (АКЭ) в форме шкива или диска. АКЭ устанавливают в общей цепи элементов на быстроходном, либо тихоходном валах редуктора (рисунок 2).



М – привод; АКЭ – аккумулятор кинетической энергии; Р – редуктор; ИМ – исполнительный механизм; P_з, P_м – электрическая и механическая мощности

Рисунок 2 – Структурная схема машины с подключением АКЭ

Для таких систем характерно значительное увеличение момента инерции движущихся масс, приводящее к снижению средней скорости машин и их производительности. При этом неравномерность нагрузок часто фактически не изменяется, а затраты энергии увеличиваются. Уменьшение момента инерции и повышение качества выравнивания нагрузок возможно при разрядке энергетических масс за счет снижения радиуса инерции, что позволяет использовать и накапливать энергию при постоянной скорости и нагрузке двигателя.

В машинах реверсивного типа: вагонопрокидывателях, роботах, манипуляторах, и других для снижения нагрузок применяют грузовые, гидравлические, пружинные и иные виды уравнивающих устройств – аккумуляторы потенциальной энергии (АПЭ), накапливающие и реализующие потенциальную энергию. По характеру изменения момента все уравнивающие устройства могут быть разбиты на четыре вида: с постоянным моментом уравнивания, с линейным законом уравнивания, с гармоническим изменением уравнивающего момента, прочие. В структурных схемах машин установка АПЭ возможна с последовательным и параллельным размещением.

Как правило, выбор параметров уравнивающих устройств производится без учета загруженности электропривода и силовых элементов машины, что существенно снижает эффективность их использования. Обратимся к этой проблеме. Исходя из анализа работы всей машины в целом, будем считать, что движение машины осуществляется с постоянной скоростью. Разобьем путь перемещения ($2\varphi_{пп}$) на два полупериода: рабочий (р) и холостой (х). С учетом момента уравнивания ($f_y(\varphi)$) эквивалентная нагрузка опишется зависимостью:

$$F_{эк} = \pi \sqrt{\int_0^{\varphi_{пп}} \left((f_p(\varphi) - f_y(\varphi))^m + (f_x(\varphi) + f_y(\varphi))^m \right) d\varphi / 2\varphi_{пп}} = \pi \sqrt{J / 2\varphi_{пп}}, \quad (6)$$

где $f_p(\varphi)$, $f_x(\varphi)$ – моменты нагрузки соответственно рабочего и холостого периодов; m – показатель степени; J – подкоренной интеграл.

Если функция изменения уравнивающего момента ($f_y(\varphi)$) известна, задача выбора оптимального закона уравнивания по показателю неравномерности нагрузок сводится к решению системы уравнений $\partial J / \partial x_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$, т. е. к нахождению параметров, определяющих минимум интеграла J . При заданной функции $f_y(\varphi)$ для достижения оптимальных условий выравнивания нагрузок

достаточно найти два параметра. Так, в случае линейного закона изменения $f_y(\varphi)$ постоянную величину момента (b) и угловой коэффициент (k), оптимальное значение которого (k^{opt}) определяется решением следующего уравнения:

$$F_{зк} = (m-1)k \int_0^{\varphi_{opt}} \left((f_p(\varphi))^{m-2} + (f_x(\varphi))^{m-2} \right) \varphi^2 d\varphi - \frac{(m-1)(m-2)}{2!} k^2 \int_0^{\varphi_{opt}} \left((f_p(\varphi))^{m-3} - (-f_x(\varphi))^{m-3} \right) \varphi^3 d\varphi + \dots = \int_0^{\varphi_{opt}} \left((f_p(\varphi))^{m-1} + (f_x(\varphi))^{m-1} \right) \varphi d\varphi. \quad (7)$$

Постоянная b^{opt} может быть найдена решением оптимизационной задачи на основе соотношения $b = f(k^{opt})$. При гармонической зависимости $f_y(\varphi) = F_{y0} \cos(\varphi - \varphi_0)$ необходимо определять значение момента F_{y0} и начальную фазу φ_0 .

Общим показателем эффективности уравнивания является такой режим, при котором затраты энергии за время рабочего и холостого ходов машины минимальны и равны между собой.

При использовании исполнительно-преобразующих механизмов (ИПМ) снижение неравномерности нагрузок предполагается обеспечивать за счет изменения плеча силовых элементов. В реечных и цепных механизмах при размещении за один оборот колеса (звездочки) могут быть применены эксцентричные или некруглые колеса (звездочки). В канатных механизмах – барабаны конической и других форм. В кривошипно-ползунном, коромысловом механизмах – шатуны переменной длины. Регулированием длины шатуна можно осуществлять рабочий процесс за несколько оборотов кривошипного вала, используя кривошипы меньших радиусов.

Неравномерность нагрузок цикловых машин может быть существенно снижена также с применением передаточно-распределительных механизмов (ПРМ), обеспечивающих распределение энергетического потока за счет изменения передаточных отношений передач. Такие передачи могут быть образованы эллиптическими, эксцентричными колесами, механизмом антипараллелограмма, коробками передач и другими. В линиях машин ПРМ следует устанавливать за передаточным механизмом со стороны ИМ.

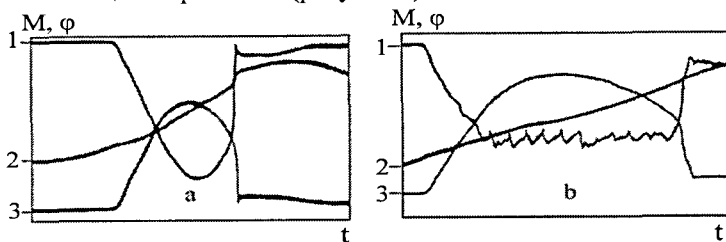
При изменении передаточного отношения ПРМ в соответствии с изменением рабочих нагрузок ($M(\varphi)$) теоретически может быть обеспечено полное выравнивание моментов. Однако добиться абсолютного соответствия законов $M(\varphi)$ и $u(\varphi)$ в практике невозможно, так как требования конструктивного исполнения механизма ограничивают его функциональные возможности. Поэтому для проектирования передачи необходимо располагать информацией о функции передаточного отношения $u(\varphi)$ и возможности ее реализации. При выборе параметров $u(\varphi)$ определяется допустимое снижение неравномерности нагрузок машины, что обеспечивается минимизацией интеграла:

$$\int_0^{\varphi_{opt}} \left(M(\varphi) \right)^m / u(\varphi) d\varphi = D. \quad (8)$$

Передаточно-распределительные механизмы характеризуются набором параметров, таких как величина эксцентриситета, заданное исходное положение и другие, которые могут быть изменены в соответствии с условиями рабо-

ты передачи. Решение этих задач аналогично варианту анализа уравнивающих устройств.

Опытная проверка метода выравнивания нагрузок ПРМ выполнялась на ножницах прессового типа с шатунно-кривошипным механизмом резания. Для воспроизведения переменного передаточного отношения в системе привода последовательно с кривошипным валом устанавливался механизм двух равносмещенных эксцентричных колес, с периодом 2π . Для сравнения проводились исследования двухшарнирной карданной передачи. Результаты исследований представлены осциллограммами (рисунок 3).



а – типовой привод; б – с механизмом эксцентричных колес; 1 – момент на входном валу передачи; 2 – ход ножей φ ; 3 – момент на эксцентриковом валу ножниц
Рисунок 3 – Осциллограммы процесса порезки полосы (масштаб $\mu_{13}=\mu_1/\mu_3=0,525$)

Как видно из осциллограмм, применение специально разработанных передач приводит к существенному перераспределению нагрузок. Эффективность выравнивания зависит от взаимного положения передаточного и исполнительного механизмов, а также от интенсивности изменения передаточного отношения. Применение ПРМ на ножницах прокатных станов с безредукторным приводом позволяет снизить максимальные нагрузки двигателя в 2 – 2,5 раза, а его мощность в 1,5 – 1,7 раза.

Таким образом, в главе 3 создано математическое обеспечение оптимизации энергетических режимов цикловых машин; предложены и реализованы процессы формирования нагрузок без накопителей энергии, невысокая инерционность которых позволяет успешно использовать их в цикловых машинах, работающих преимущественно в переходных процессах; разработаны функциональные структуры машин с использованием новых технических средств снижения неравномерности нагрузок. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность предложенных способов.

В четвертой главе приведены результаты выбора переходных процессов и технических параметров цикловых машин по эффективности реализации энергосбережения и нагруженности элементов механизмов.

Повышение производительности машин привело к созданию электродвигателей, допускающих трех-четыре кратные и более высокие перегрузки, что позволяет за счет увеличения пускового и тормозного моментов снизить время

переходных процессов. Вместе с тем, выбору рациональных режимов пуска и торможения, скоростей перемещения и передаточных отношений передач при изменившихся условиях работы цикловых машин пока не было уделено достаточно глубокого внимания. Установление рациональных технических параметров и режимов обработки перемещений обеспечивает реальную возможность повышения энергетической эффективности цикловых машин. Как правило, их скоростные режимы состоят из трех периодов: пуск, движение с постоянной скоростью, торможение. При коротких путях перемещения применяют двухпериодные диаграммы, содержащие два участка: пуск, торможение. В результате выполненных исследований определены оптимальные значения пусковых и тормозных моментов при соответствующей организации цикла работы и минимуме энергозатрат. В таблице 1 приведены значения кратностей этих моментов относительно номинального момента двигателя.

Таблица 1 – Оптимальные кратности моментов двигателя переходных процессов

Скоростной режим	Двух-периодный асимметрич	Трех-периодный асимметрич	Двух-периодный симметрич	Трех-периодный симметрич
Кратности пусковых и тормозных моментов двигателя при $\xi = 0,4$	$K\sqrt{1/\xi}$	$K\sqrt{1,5/\xi}$	$K\sqrt{2/\xi}$	$K\sqrt{2,5/\xi}$
	1,58K	1,94K	2,24K	2,5K

Принятые в таблице обозначения: ξ – относительная продолжительность включения двигателя ($\xi = t_v/t_{ц}$); t_v , $t_{ц}$ – рабочее и полное время цикла; K – коэффициент формы диаграмм пускового и тормозного моментов (при треугольных диаграммах $K = \sqrt{3}$, для прямоугольных диаграмм $K = 1$).

Из таблицы 1 видно, что при равных значениях пускового и тормозного моментов, допустимая перегрузка двигателя по условию минимума энергозатрат меньше его перегрузочной способности. Повышение моментов в этом случае приводит к увеличению необходимой мощности двигателя. Обеспечение пуска и торможения с равной длительностью процессов позволяет увеличить пусковой момент более, чем в 1,4 раза, также приводит к снижению нагрузок в линиях передач. Дальнейшее повышение интенсивности переходных процессов и снижение энергозатрат возможно при трехпериодных диаграммах скоростей. Необходимая угловая скорость двигателя в этом случае на 25 – 30 % ниже, чем при двухпериодных диаграммах, накапливаемая кинетическая энергия элементами механизма меньше на 55 – 70 %.

Вопросы выбора номинальных скоростей (ω) и передаточных отношений редуктора (u) цикловых машин явились предметом многих научных исследований, основанных на сложившейся практике эксплуатации оборудования. Вместе с тем совершенствование технологических процессов, повышение рабочих скоростей, снижение времени переходных процессов привело к значи-

тельному росту мощностей электродвигателей и общих энергозатрат. Все это вызывает необходимость пересмотра положений оптимизации параметров цикловых машин. Следует учитывать, что скорости и передаточные отношения через нагрузки и длительности периодов влияют на все рабочие режимы. Поэтому их выбор должен производиться по общему времени цикла при оптимальных условиях пуска и торможения. Возможны следующие варианты переходных процессов: 1– при равных динамических моментах, значения которых оцениваются по минимуму энергозатрат; 2 – с ограничением пускового момента, при выборе тормозного момента по энергетической эффективности процесса; 3– оба момента ограничены перегрузочной способностью двигателя.

Принципиальных различий в методах выбора параметров между первым и вторым вариантами нет. Реализуя первый вариант переходных процессов, если отработка перемещений осуществляется по трехпериодным скоростным диаграммам, то при соответствии теплового режима двигателя номинальному, рабочее время цикла определяется зависимостью:

$$t_b = \left(\sqrt{4L_T W_T^2 + C_T^2 u^4} + C_T u^2 \right) / (L_T u) + \varphi_T u / \omega, \quad (9)$$

где $L_T = 2(2\alpha - 1)u^2 + 2(\psi_{yT}^2 - 2\psi_{cT}^2)$; $C_T u^2 = -\varphi_T u^4 / \omega - \beta t_0 u^3 + \psi_{yT}^2 \varphi_T u^2 / \omega$;

$W_T = (j_d u^2 + j_T) \omega$; $\psi_{yT} = M_{yT} / M_n$; $\psi_{cT} = M_{cT} / M_n$; $j_d = J_d / M_n$; $j_T = J_T / M_n$;

J_d – момент инерции якоря двигателя и деталей, находящихся на быстроходном валуредуктора; J_T – момент инерции на тихоходном (τ) валу редуктора; M_{yT} , M_{cT} – моменты нагрузки установившегося движения (y) и в переходных процессах (c) на тихоходном валу редуктора; M_n – номинальный момент двигателя; α , β – коэффициенты, учитывающие ухудшения условий охлаждения двигателя в переходных процессах (α) и во время паузы (β); φ_T – угол поворота тихоходного вала.

Решение задачи методами классического анализа приводит к алгебраическим уравнениям высоких степеней и не позволяет находить точные результаты. Принимая во внимание, что скорость, время и передаточное число – положительные величины, проведено их исследование в области положительных координат, с использованием структурных свойств функции $t_b(\omega, u)$. Это позволило установить, что при отдельной оптимизации по каждому из параметров обеспечивается единственный минимум. Для решения таких задач привлекались методы «золотого сечения» и деления интервала пополам. Оба метода имеют практически одинаковую скорость сужения интервала неопределенности (за 6, 7 шагов) и не требуют дифференцируемости функции. Эти методы в диалоговом режиме, с предварительным выбором передаточного отношения, были использованы для совместного выбора параметров. Следует заметить, что функция $t_b(\omega, u)$ имеет овражную структуру, реализация градиентных методов приводит к закликиванию спуска около точки минимума.

При совместном ограничении пускового и тормозного моментов значи-

тельная часть задач может быть решена классическими методами оптимизации. При двухпериодных скоростных диаграммах, с обработкой переходных процессов по первому и третьему вариантам, оптимальные значения скоростей и передаточных отношений соответствуют минимуму времени перемещения на заданном пути. Проведенные в диссертационной работе сравнения скоростей и передаточных отношений показывают, что их значения могут в 1,5 – 2 раза отличаться от результатов известных методов.

Поскольку выпускаемые электродвигатели и редукторы регламентированы, имеют определенный шаг их нормирования с определенными значениями скоростей и передаточных чисел, обеспечение соответствия их номинальных параметров оптимальным значениям не всегда может быть достигнуто. Поэтому была поставлена задача, исследовать, влияние отклонения угловых скоростей и передаточных чисел от оптимальных значений на изменение времени цикла и нагрузки механизма. Переменные нагрузки приводились к эквивалентным в соответствии с расчетными на усталостную прочность. Из рисунка 4 видно, что при отклонении ω и u от ω^{opt} , u^{opt} до 25 – 30 %, как в сторону увеличения, так и снижения не приводит к значительному увеличению времени цикла. В большей степени такие отклонения влияют на нагрузки механизма.

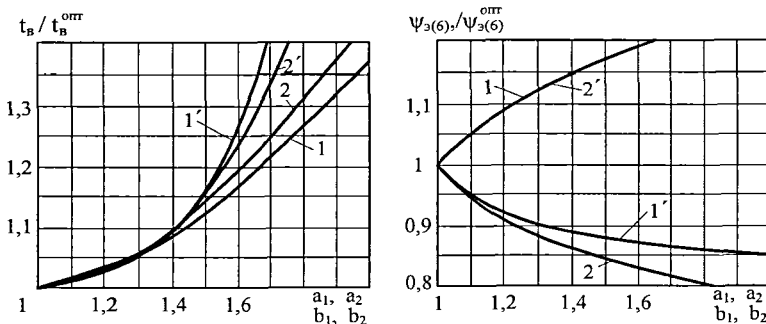


Рисунок 4 – Изменение рабочего времени цикла и нагрузок механизма от отношений: $a_1 - \omega / \omega^{opt}$ (1); $a_2 - \omega / \omega^{opt}$ (2); $b_1 - u / u^{opt}$ (1'); $b_2 - u / u^{opt}$ (2')

Снижение угловой скорости (увеличение передаточного отношения) до 30 % вызывает увеличение момента на 12– 14 %. С увеличением скорости (уменьшением u) нагрузки снижаются примерно на ту же величину. Допустимыми могут считаться отклонения ω и u от оптимальных значений до $\pm(20 - 25 \%)$. При совместном их отклонении до 40 – 50 % нагрузки увеличатся на 20 – 30 %, что может привести к необходимости усиления механической части. Для сохранения минимального уровня нагрузок достаточно обеспечить оптимальное значение одного из параметров.

Таким образом, наибольшее быстродействие цикловых машин при использовании двигателей с высокой перегрузочной способностью, не ограничивающей нагрузки переходных процессов, достигается обработкой переме-

ний при трехпериодных скоростных диаграммах с равной длительностью пусковых и тормозных периодов. Сравнение результатов расчета скоростей и передаточных отношений предложенного метода с известными показывают, что их значения могут отличаться в 1,5 – 2 раза. Это привело к созданию машин: ножниц, манипуляторов, кантователей, ряда прокатных станов, у которых номинальные скорости двигателей и передаточные отношения редукторов завышены и не способствуют увеличению производительности. Допустимыми, как в отношении быстродействия, так и нагрузок, могут считаться отклонения скоростей и передаточного числа от оптимальных значений до $\pm(20 - 25\%)$.

В пятой главе приведены результаты исследования многодвигательных приводов и многомассовых рабочих машин (агрегатов) для установления взаимодействия двигателей в приводах с общим механическим валом и с силовой загруженностью деталей передач.

Стремление к решению конкретных производственных задач с наименьшими затратами материальных и энергетических ресурсов, приводит к расширению числа технологических машин, обслуживаемых не одним, а несколькими электродвигателями. Приводы, двигатели которых объединены механическим валом, будем называть многодвигательными с общим механическим валом (МПМ). Этот тип приводов широко применяется в многодвигательных клетях прокатных станов, конверторах сталеплавильного производства, мощных прессах и многих других машинах. Основной проблемой, возникающей при создании многодвигательных электромеханических систем, является необходимость равномерного распределения нагрузок между двигателями, как в статических, так и в динамических режимах работы. Обычно проектирование МПМ основывается на теоретических положениях одно-двухдвигательного привода. Такие приводы с увеличением числа двигателей не всегда обеспечивают равное распределение нагрузок. При последовательном соединении силовых цепей из-за недостаточной жесткости связей создаются условия для развития механических колебаний. По этой причине приходится отказываться от последовательного соединения двигателей и переходить к параллельному. Несмотря на широкое использование многодвигательных приводов, теоретические основы распределения нагрузок между двигателями при параллельном их соединении не получили достаточно глубокого рассмотрения. Для проведения исследований принят многодвигательный электропривод с двигателями постоянного тока независимого возбуждения, валы которых через зубчатые колеса жестко взаимосвязаны с общим механическим валом исполнительного механизма. Ввиду высокой жесткости механических связей при отсутствии зазоров в звеньях податливостью в системе можно пренебречь. В этом случае все электродвигатели можно рассматривать как двигатели с равными скоростями вращения. Элементы механической части приведем к одномассовой модели, на которую действуют вращающие моменты двигателей и нагрузки. Рас-

смотрим установившиеся режимы работы привода. Полагая, что статические моменты (M_c), скорости (ω) и магнитные потоки двигателей (Φ) остаются постоянными, получим следующие уравнения состояния системы:

$$\left. \begin{aligned} R_{яi} I_{яi} + (с\Phi) \omega = U_{яi}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ \sum_{i=1}^n (с\Phi) I_{яi} = M_c \end{aligned} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

где $I_{яi}$, $U_{яi}$, $R_{яi}$ – соответственно ток, напряжение и сопротивление якорной цепи; c – конструктивная постоянная электродвигателя.

Распределение нагрузок в установившемся режиме движения, прежде всего, определяется механическими характеристиками двигателей. Ввиду их линейности, результирующая характеристика привода также будет линейной:

$$\omega = \omega_0 - M_c / \sum_{i=1}^n (с\Phi)^2 / R_{яi}, \quad (11)$$

где ω_0 – угловая скорость холостого хода привода.

Разрешив уравнения первой системы относительно токов якорей и произведя подстановку значения скорости (11), получим:

$$I_{яi} = \frac{(с\Phi)}{R_{яi}} \left(\frac{U_{яi}}{(с\Phi)} - \omega_0 + M_c / \sum_{i=1}^n \frac{(с\Phi)^2}{R_{яi}} \right). \quad (12)$$

Как следует из (12), при общем источнике питания ($U_{я1} = U_{я2} = \dots = U_{яn}$) выравнивание токов возможно согласованием сопротивлений якорных цепей $R_{яi}$, что приведет к полному соответствию механических характеристик двигателей. При раздельном питании якорей, разброс токов может быть устранен регулированием напряжений источников ($U_{яi}$), что обеспечивает согласование характеристик в одном из положений.

Таким образом, возможны два способа согласования механических характеристик двигателей: полное соответствие, либо в одном из положений.

В первом случае вводятся добавочные сопротивления, что приводит к повышению потерь энергии. Для выполнения второго условия, напряжения питания должны распределяться следующим образом:

$$U_{яi} = с\Phi\omega + \frac{R_{яi}}{R_{я1}} (U_{я1} - с\Phi\omega). \quad (13)$$

При неравенстве магнитных потоков, распределение моментов между двигателями будет неравномерным. Следует заметить, что неравенство моментов при работе двигателей на основной характеристике не влияет на распределение токов и на общую мощность привода, поэтому основной задачей в данном случае становится задача выравнивания токов двигателей. В период холостого хода выравнивание токов позволяет исключить переход части двигателей в генераторный режим и создание дополнительной нагрузки на другие двигатели. Для определения влияния источников питания на токи двигателей в

переходных процессах отобразим ток одного из двигателей в операторной форме ($I_{яг}(p)$) через величину входных воздействий (рисунок 5).

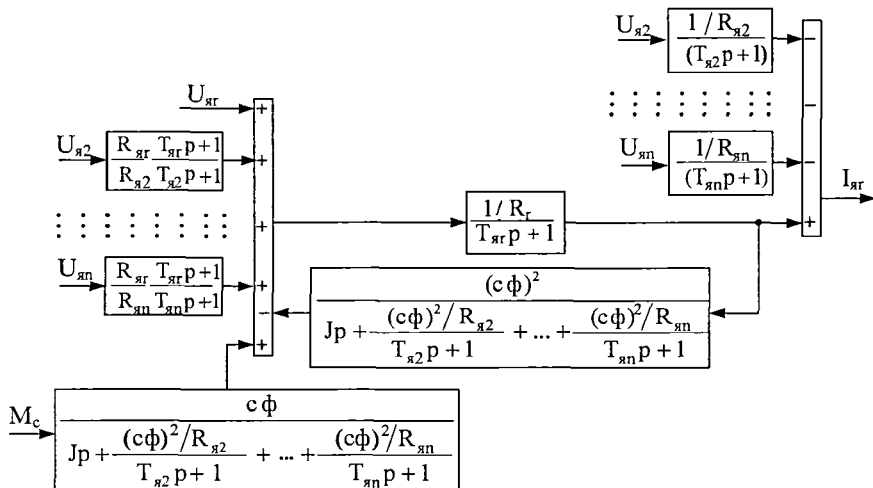


Рисунок 5 – Преобразованная структурная схема МПМ по цепям якорей, отображающая зависимость тока якоря от входных напряжений питания

Составим передаточные функции для соответствующих двигателей: при подаче напряжения по входу $U_{яг}$:

$$\frac{I_{яг}(p)}{U_{яг}(p)} = \frac{Jp + \sum_{i=1, \dots, r-1}^{r+1, \dots, n} \frac{(c\phi)^2/R_{яi}}{T_{яi} p + 1}}{\sum_{i=1, \dots, r-1}^{r+1, \dots, n} \frac{R_{яг} (c\phi)^2}{R_{яi}} \frac{T_{яг} p + 1}{T_{яi} p + 1} + (c\phi)^2 + R_{яг} Jp (T_{яг} p + 1)}; \quad (14)$$

при подаче напряжения по входу $U_{яi}$:

$$\frac{I_{яг}(p)}{U_{яi}(p)} = \frac{((c\phi)^2/R_{яi})/(T_{яi} p + 1)}{\sum_{i=1, \dots, r-1}^{r+1, \dots, n} \frac{R_{яг} (c\phi)^2}{R_{яi}} \frac{T_{яг} p + 1}{T_{яi} p + 1} + (c\phi)^2 + R_{яг} J_{\Sigma} p (T_{яг} p + 1)}. \quad (15)$$

Анализ передаточных функций показывает, что, при наличии существующих взаимосвязей, управлением напряжениями питания $U_{яi}$ можно обеспечить выравнивание нагрузок с любой необходимой точностью. При этом в динамических режимах актуальное значение получает не только равенство токов, но и моментов, а значит, соответствие магнитных потоков.

Взаимодействие электродвигателей с использованием различных систем питания и управления электроприводами приведено на рисунках 6, 7. На рисунке 6 представлено распределение моментов M и токов I двигателей с общим источником питания.

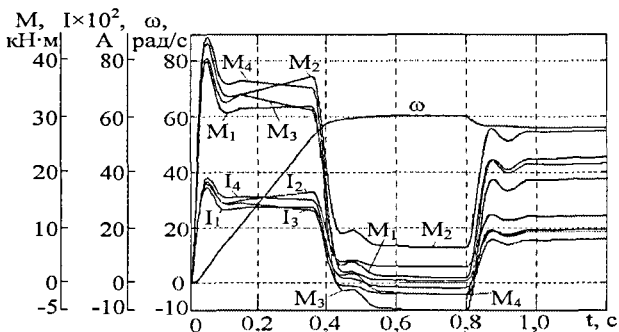


Рисунок 6 – Осциллограммы нагрузок МПМ с общим источником питания и нерегулируемыми магнитными потоками при значениях параметров:

$$\phi_{1c1}/0,98 = \phi_{2c2} = \phi_{3c3}/1,02 = \phi_{4c4}/1,01; R_1/0,95 = R_2 = R_3/1,05 = R_4/1,1$$

Как следует из осциллограмм, имеет место весьма неравномерное распределение токов и моментов во всех режимах нагружения. Из-за неравенства скоростей холостого хода часть двигателей переходит в генераторный режим. Даже при полном сбросе нагрузки двигатели остаются загруженными. Выравнивание токов при рассогласовании магнитных потоков не обеспечивает выравнивания моментов, но их разброс существенно снижается. Если различие магнитных потоков невелико, можно ограничиться только выравниванием токов. Для выравнивания моментов необходимо дополнительно согласовать магнитные потоки (рисунок 7). Так как рассогласование по магнитным потокам протекает достаточно медленно, основной задачей при выравнивании магнитных потоков является их стабилизация.

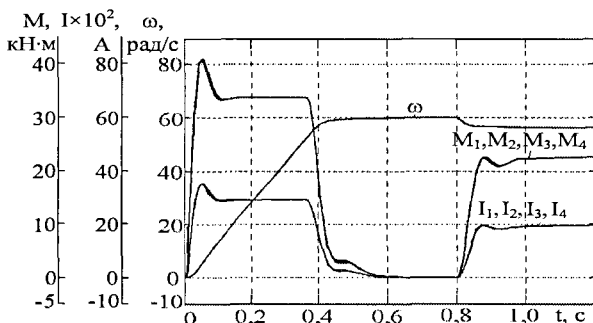
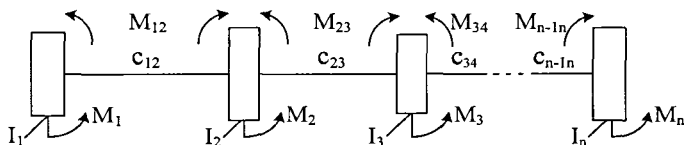


Рисунок 7 – Выравнивание нагрузок МПМ регулированием напряжений питания якорей при согласованных магнитных потоках

Таким образом, совместное выравнивание токов и моментов двигателей при раздельных источниках питания якорей и обмоток возбуждения целесообразно обеспечивать регулированием напряжений питания по цепям якорей и обмоток возбуждения.

Цикловые машины металлургического производства, как правило, пред-

ставляют многомассовые системы с высокой виброактивностью. Соответственно, для всех машин, работающих в переходных процессах, необходимо проводить оценку инерционных сил и применять специальные способы их ограничения. Независимо от размеров, конструктивных различий и выполняемых задач динамическая схема машины составляется в соответствии с общими методами механики: силового (метод Даламбера), либо энергетического (метод Лагранжа) состояния системы. Поэтому исследования динамических явлений различных машин может производиться на основе общей модели для соответствующего типа машин. Динамические схемы, как правило, представляются в виде системы рядного типа (рисунок 8).



I – моменты инерции; c – жесткости связей; $M_1, \dots, M_{12}, \dots$ – моменты внешних сил и сил упругости

Рисунок 8 – Многомассовая динамическая система

Все параметры такой схемы приводятся к одному выбранному звену. Для машинных агрегатов в качестве звена приведения обычно принимают вал электродвигателя либо исполнительного органа. Известные методы исследования многомассовых машин с учетом упругости звеньев, тем более при наличии привода весьма трудоемки и не приспособлены для инженерной практики. При решении конкретных конструкторских задач на стадии проектирования, как правило, достаточно оценить основные нагрузки в элементах конструкции, ограничиваясь их линейными приближениями. Такие исследования позволяют существенно упростить и обобщить накопленный опыт анализа. Составим уравнения движения для динамической модели (рисунок 8) с учетом действия диссипативных сил и наличия двигателя. Выразив уравнения в операторной форме, получим:

$$\left. \begin{aligned}
 J_1 \omega_1(p) p &= M_d(p) - M_{y_{12}}(p) - M_{c_{12}}(p); \\
 J_2 \omega_2(p) p &= M_{y_{12}}(p) - M_{y_{23}}(p) - M_{c_{23}}(p); \\
 &*****; \\
 J_{n-1} \omega_{n-1}(p) p &= M_{y_{n-2, n-1}}(p) - M_{y_{n-1, n}}(p) - M_{c_n}(p); \\
 J_n \omega_n(p) p &= M_{y_{n-1, n}}(p) - M_{c_n}(p).
 \end{aligned} \right\} (16)$$

где $M_{y_{i, i+1}}(p) = C_{i, i+1} \Delta \omega(p)_{i, i+1} \frac{1}{p} + h_{i, i+1} \Delta \omega(p)_{i, i+1}$ – моменты сил упругости;

$\Delta \omega(p)_{i, i+1} = (\omega_i(p) - \omega_{i+1}(p))$; $i = 1, 2, \dots, n$ – нумерация масс;

$C_{i, i+1}$ – жесткости трансмиссий; $h_{i, i+1}$ – коэффициенты вязкого демпфирования.

Схема модели (16), с учетом электрической части приведена на рисунке 9.

На базе представленной схемы была реализована программа и выполнен анализ динамических явлений, возникающих в переходных режимах работы системы с двух и трехмассовой механической частью. Такой анализ позволяет наглядно проследить реакцию механизма на любые возмущения.

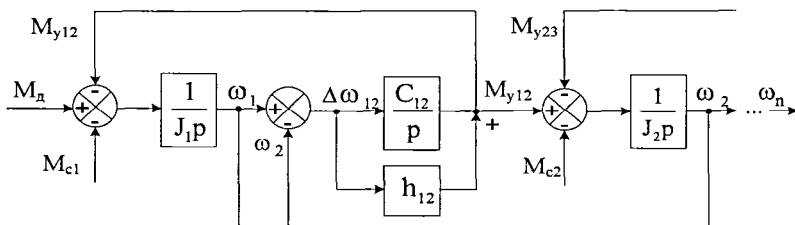


Рисунок 9 – Структурная схема многомассовой механической системы с упругими связями и демпфированием

Одной из причин возникновения высоких динамических нагрузок в цикловых машинах является несоответствие соотношения масс и жесткостей элементов системы. Снижение момента инерции двигателя относительно концевой массы способствует снижению динамичности нагрузок и более быстрому затуханию колебаний. Снижение инерционности концевой массы при сохранении жесткости вала приводит к повышению интенсивности колебаний и нагруженности машин. Радикальным способом снижения динамических нагрузок является уменьшение жесткости звеньев трансмиссий. Однако при уменьшении размеров сечения вала, несмотря на снижение уровня максимальных нагрузок, их удельная величина возрастает.

Не менее важны в формировании динамических процессов демпфирующие свойства связей. Быстрое затухание колебаний во многих случаях может быть достигнуто только применением демпфирующих элементов. При выборе демпферов, если сопротивление колебаниям пропорциональны скорости, достаточно хорошие показатели могут быть достигнуты, когда коэффициент пропорциональности демпфера, примерно, на порядок, ниже жесткости соответствующей трансмиссии.

Приведенная структурная схема многомассовой механической системы с упругими связями позволяет выполнять анализ работы машины с учетом демпфирования и взаимодействия с электродвигателем.

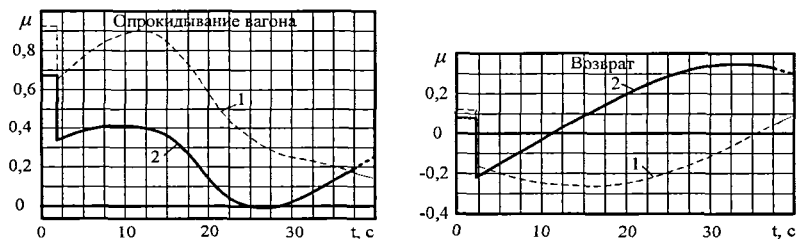
В шестой главе представлены результаты внедрения новых технических решений.

1. Уравновешивание ротора вагоноопрокидывателя с боковой разгрузкой вагонов на ОАО «Евразруда» Абагурский филиал.

Ротор вагоноопрокидывателя представляет балансирный рычаг, на одном плече которого размещен полувагон, на втором противовес. При повороте ротора на 170^0 осуществляется разгрузка полувагона. Обратным поворотом сис-

тема возвращается в исходное положение. Масса, разгружаемого материала 93 т. Привод осуществляется двумя электродвигателями, номинальная мощность каждого двигателя $P = 100$ кВт при ПВ = 25%.

Проведенные исследования (рисунок 10) показывают, что из-за недостаточного уравнивания нагрузки имеют высокую неравномерность.



1 – до реконструкции; 2 – после замены противовесов

Рисунок 10 – Моменты двигателя разгрузки и обратного хода (масштаб 5,2766 кН·м)

Необходимая мощность двигателей составляет $P_{\text{общ}} = 78,8 \times 2 = 157,6$ кВт. Для снижения неравномерности нагрузок момент уравнивания увеличили с $M_{\text{максур}} = 3395$ кН·м до 5355 кН·м, исходный угол установки с 45° до 60° , что позволило равномерно распределить нагрузку между периодами рабочего хода и возвращением системы в исходное положение и снизить затраты мощности на 60 кВт, в 1,6 раза. Годовая экономия электроэнергии составляет более 196 МВт·ч. Годовой экономический эффект в ценах 2012 г. около 0,175 млн. руб.

2. Изменение режима работы ножниц блюминга «1300» «ОАО ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат (ЗСМК)»

Время порезки раската сечением 140×740 мм² составляет 52 с, время цикла прокатки 50,4 с. Из-за низкого быстродействия ножниц невозможно повышение производительности стана. Для снижения времени раскроя раската предложено подачу на рез начинать до остановки ножниц. В результате перехода на новый режим с изменением продолжительности включения двигателя повысилась равномерность нагрузок, увеличилась производительность ножниц на 3 %.

Экономия энергозатрат от снижения неравномерности нагрузок составляет около 8,3 МВт·ч в год

Общий годовой экономический эффект в ценах 2012г более 10 млн. руб.

3. Изменение режима замыкания газоплотнительных клапанов загрузочного аппарата доменной печи № 2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Замыкание клапанов загрузочного устройства обеспечивается силами упругости элементов системы. Максимальное усилие ограничивается муфтой предельного момента. Торможение осуществляется свободным выбегом механизма. В начальном варианте замыкание клапана выполнялось при работающем двигателе, что приводило к, повышению нагрузок, пробуксовкам муфты и снижению срока службы механизма.

В предложенном автором решении запираание клапана осуществляется за счет энергии движущихся масс системы при обесточенном двигателе. Для снижения кинетической энергии и ограничения нагрузок перед отключением двигателя производится торможение до частоты вращения двигателя $n_d = 390$ об/мин. Оставшийся запас кинетической энергии обеспечивает запираание клапана без пробуксовки муфты предельного момента. С внедрением предложения срок службы клапанов увеличился с 10 до 18 месяцев.

Экономия электроэнергии за счет снижения неравномерности нагрузок и затрат энергии составляет около 3 МВт·ч. в год

Увеличение срока службы клапанов, повышение их быстродействия обеспечили прирост производства чугуна, снижение эксплуатационных затрат по замене и обслуживанию клапанов, а также снижение расхода кокса.

Годовой экономический эффект в ценах 2012 г. более 90 млн. руб.

4. Изменение способа регулирования привода поворота конвертора.

Кислородно-конверторный цех – 2 ОАО ЗСМК оснащен двумя конверторами емкостью 350 – 400 т. Привод поворота конверторов осуществляется двенадцатью электродвигателями постоянного тока независимого возбуждения, мощностью по 60 кВт каждый, образующих шесть однотипных параллельных ветвей. На случай неравномерного распределения нагрузок принят полуторократный запас мощности. Основную часть времени двигатели работают в переходных процессах. В качестве источника питания двигателей конверторов используются регулируемые тиристорные преобразователи. Согласно нормативным положениям, рассогласование сопротивлений якорных цепей пар двигателей может составлять 10 %, а индуктивностей – свыше 8 %. На совместную работу регуляторы настраиваются вручную, по параметрам соответствующих двигателей. При такой настройке часто несоответствие токов при перерегулировании составляет $\pm(5 - 8 \%)$ (рисунок 11, а, для наглядности приведены две ветви привода).

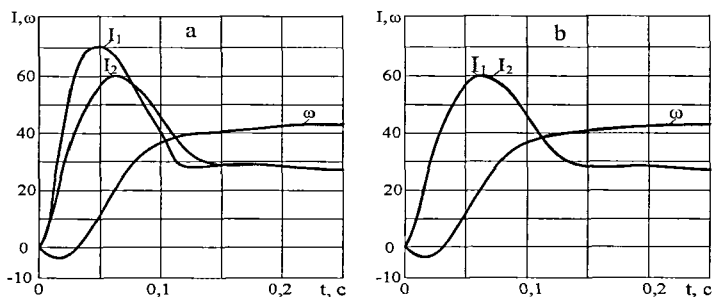


Рисунок 11 – Диаграммы токов (I) и угловых скоростей (ω) переходных процессов электродвигателей при настройке на совместный режим работы

В результате разброса токов неравномерность нагрузок составляла 12 – 16 %, что приводило к высоким энергозатратам. При настройке регуляторов на

оптимальные режимы по данным двигателя с наименьшим сопротивлением якорной цепи разброс токов снизился до $\pm(0,5-1\%)$ (рисунок 11, б).

Кроме того, были изменены управляющие программы контроллера и регуляторов преобразователей привода поворота конвертора.

Внедрение этих решений обеспечило снижение мощности привода на 240 кВт. Годовая экономия электроэнергии составляет около 684 МВт·ч.

Годовой экономический эффект при цене электроэнергии 1,5 руб. около 1 млн. руб.

Результаты внедрений свидетельствуют о высокой эффективности метода усреднения нагрузок. Общая экономия электроэнергии от внедрения разработанных мероприятий составляет около 900 МВт·ч в год. Повышение производительности процессов обеспечило общую экономию более 100 млн. рублей в ценах 2012 г.

Акты о внедрении и использовании результатов приведены в приложении.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе проведенного анализа эксплуатации цикловых машин сформулирован и научно обоснован метод оценки неравномерности нагрузок и энергозатрат в рабочих процессах цикловых машин металлургического производства, устанавливающий взаимосвязь между значениями эквивалентных нагрузок текущих режимов с максимально выровненными нагрузками. Метод может быть применен для анализа неравномерности нагрузок как статических, так и динамических процессов в системах с одно – и многодвигательными приводами и может рассматриваться, как универсальный. Количественная определенность и однозначность метода оценки позволяют прогнозировать и целенаправленно осуществлять преобразование нагрузок. Для практической реализации метода разработаны критерии, обеспечивающие возможность оценки неравномерности нагрузок с учетом условий работы и конструктивных особенностей машин.

2. В соответствии с типовыми условиями эксплуатации цикловых машин разработана пятиуровневая классификация по степени неравномерности нагружения и энергозатрат: 1 – низкий уровень $\varphi_b \leq 25\%$, 2 – средний $25\% < \varphi_b \leq 50\%$, 3 – средневысокий $50\% < \varphi_b \leq 75\%$, 4 – высокий $50\% < \varphi_b \leq 75\%$, 5 – весьма высокий $\varphi_b > 100\%$. Обоснование классификации позволяет регламентировать степень эффективности загрузки машин и дает основание к выработке технических решений по рациональной их эксплуатации, с возможностью обеспечения минимизации энергозатрат и металлоемкости машин.

3. Разработанное математическое обеспечение анализа и оптимизации энергетических режимов цикловых машин позволило предложить и реализовать новые способы формирования нагрузок на основе передаточных и исполнительно-преобразующих механизмов. В исполнительно-преобразующих меха-

низмах снижение неравномерности нагрузок обеспечивается изменением длины плеча силовых элементов, применением некруглых или эксцентрично установленных блоков, звездочек, конических барабанов. В шатунно-кривошипных механизмах при регулируемой длине шатуна можно использовать кривошипы меньшего радиуса, с осуществлением полного перемещения за несколько оборотов вала.

Неравномерность нагрузок может быть существенно снижена передаточными механизмами, в которых целенаправленно производится варьирование передаточного отношения в соответствии с изменением рабочих нагрузок. Невысокая инерционность таких механизмов позволяет успешно использовать их при переходных процессах в быстроходных системах.

4. Исследование перегрузочной способности приводов в цикловых машинах позволило разработать переходные процессы по энергетическим затратам, пусковой и тормозной моменты которых могут быть существенно снижены по отношению к допустимой перегрузочной способности двигателей. Установлено, что оптимальные режимы обеспечиваются при скоростных диаграммах с равной длительностью периодов пуска и торможения. При ограничении пускового и тормозного моментов перегрузочной способностью двигателя увеличиваются затраты энергии и необходимая мощность электродвигателей.

Доказано, что скорости двигателей (ω) и передаточные отношения (u) редукторов цикловых машин должны выбираться в соответствии с общим временем цикла, при оптимальных режимах переходных процессов. Исследованиями в области положительных значений рабочего времени цикла (t_b) установлено, что при каждом из параметров (ω , u) обеспечивается единственный экстремум, доставляющий минимум функции t_b . Таким образом, для нахождения номинальной скорости и передаточного отношения могут привлекаться численные методы, не требующие дифференцируемости функций $t_b(\omega)$, $t_b(u)$. Допустимые отклонения скоростей и передаточных отношений могут достигать от оптимальных значений до $\pm(20-25\%)$.

5. На основе теоретических исследований и компьютерного моделирования разработаны методы оценки неравномерности нагрузок многодвигательных электроприводов постоянного тока независимого возбуждения с общим механическим валом. Установлено, что даже однотипные двигатели приводов отличаются механическими характеристиками и скоростями идеального холостого хода. Эти различия приводят к неодинаковой загруженности двигателей и увеличению их необходимой мощности. Выравнивание нагрузок между двигателями при отдельных источниках питания независимо от условий работы может быть обеспечено регулированием напряжений питания якорей и согласованием их магнитных потоков.

6. Разработаны технические решения цикловых машин, защищенные авторскими свидетельствами и патентами (а. с. № 912401, № 1097455, №1219508,

№ 1602631, № 1606264, № 1654197, патент № 2105641 и другие), направленные на повышение их производительности, энергоэффективности, на снижение рабочих нагрузок и металлоемкости машин.

7. Полученные в работе результаты повышения технического уровня машин внедрены на ряде предприятий металлургической промышленности (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и ОАО «Евразруда» Абагурский филиал), что обеспечило снижение максимальных нагрузок привода вагоноопрокидывателей в 1,7 – 2,2 раза, затрат электроэнергии на разгрузку одного полувагона на 38 %, за цикл резки тонких раскатов на ножницах заготовочных станов до 1,6 %, повышение производительности ножниц на 3 – 4,5 %. Выравнивание нагрузок двигателей механизма поворота 350 т конвертора позволило снизить мощность привода в 1,5 раза (на 240 кВт), что внедрено на двух конверторах. В результате оптимизации режима работы и сбалансированности энергозатрат стойкость газоплотительного клапана доменной печи возросла в 1,8 раза (с 10 до 18 месяцев), это обеспечило сокращение простоев печи и дополнительное увеличение производства чугуна.

Экономия электроэнергии по результатам внедрений составляет около 900 МВт·ч в год. Общий годовой экономический эффект в ценах 2012 г. составляет более 100 млн. руб.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Егоров В.Ф. Электромеханические системы циклического нагружения: монография / В.Ф. Егоров. – Челябинск: Металлургия, 1991. – 205 с.

В изданиях рекомендованных ВАК:

2. Маховичный электропривод с переменным передаточным отношением редуктора / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.Н. Широков [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1976. – № 4. – С. 177 – 178.

3. Усреднение нагрузок привода пресс ножниц. Сообщ. 3 / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.Н. Широков [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1976. – № 8. – С. 158 – 159.

4. Выбор длительности разгона и торможения механизмов с повторно-кратковременным режимом работы. Сообщ. 1 / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, А.М. Паунов [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1977. – № 12. – С. 157 – 160.

5. Выбор длительности разгона и торможения механизмов с повторно-кратковременным режимом работы. Сообщ. 2 / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, А.М. Паунов [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1978. – № 2. – С. 157 – 159.

6. Егоров В.Ф. Производительность вспомогательных механизмов повторно-кратковременного режима работы с поступательным движением рабочего звена / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1978. –

№ 4. – С.153 – 155.

7. Анализ скоростных характеристик механизмов повторно-кратковременного режима работы / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, А.М. Паунов [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1978. – № 8. – С. 157 – 160.

8. Анализ переходных процессов механизмов повторно-кратковременного режима работы при статическом моменте, зависящем от пути / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, Ш.В. Хамицев [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1978. – № 12. – С. 149 – 152.

9. Егоров В.Ф. Кинематический анализ передаточных механизмов, образованных эксцентричными колесами / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.П. Прилуков // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1979. – № 4. – С. 132 – 135.

10. Формирование нагрузочных диаграмм электропривода механизмов металлургического производства / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, Ш.В. Хамицев [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1979. – № 10. – С. 133 – 136.

11. Егоров В.Ф. К оценке длительности переходных процессов механизмов повторно-кратковременного режима работы // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1981. – № 10. – С. 158 – 160.

12. Замыкающее усилие газоплотнительного клапана / А.С. Шинкаренко, В.И. Люленков, В.Ф. Егоров [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1981. – № 10. – С. 160 – 162.

13. Скоростные режимы механизмов повторно-кратковременного действия. Сообщ. 1 / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.П. Прилуков [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1981. – № 12. – С. 111 – 113.

14. Егоров В.Ф. Передаточное отношение систем позиционного действия // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1982. – № 2. – С. 138 – 141.

15. Егоров В.Ф. О некоторых соотношениях между моментом инерции и быстродействием механизмов повторно-кратковременного режима работы // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1982. – № 10. – С.132–133.

16. Егоров В.Ф. Исследование влияния переходных процессов и величины момента инерции на быстродействие механизмов повторно-кратковременного режима работы // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1982. – № 12. – С. 115–118.

17. Егоров В.Ф. Методы оптимизации параметров механизмов повторно-кратковременного режима работы // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1983. – № 2. – С. 136 – 138.

18. Оптимизация параметров электромеханических систем с грузовым уравновешиванием / В.Ф. Егоров, Ш.В. Хамицев, Г.Б. Трушевич [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1983. – № 4. – С. 126 – 129.

19. Оптимизация параметров электромеханических систем с грузовым уравновешиванием / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, А.С. Шинкаренко [и др.] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1984. – № 4. – С. 127 – 128.

20. Егоров В.Ф. Вагоноопрокидыватель с боковой разгрузкой / В.Ф. Егоров, Ш.В. Хамицев, В.П. Прилуков // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1985. – № 4. – С. 137 – 140.
21. Егоров В.Ф. Пути повышения экономической эффективности функционирования оборудования // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1986. – № 4. – С. 144 – 147.
22. Егоров В.Ф. Приближение исходных и эквивалентных нагрузок // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1986. – № 10. – С. 127 – 129.
23. Егоров В.Ф. Оптимизация параметров механизмов циклического действия с периодически изменяемыми режимами нагружения // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1988. – № 12. – С. 122 – 123.
24. Егоров В.Ф. Расчет опрокидывающих моментов вагоноопрокидывателя / В.Ф. Егоров, Ш.В. Хамицев, С.В. Егоров // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1990. – № 2. – С. 99–100.
25. Егоров В.Ф. Расчетная модель вагоноопрокидывателя / В.Ф. Егоров, Ш.В. Хамицев, С.В. Егоров // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1990. – № 4. – С. 97 – 99.
26. Егоров С.В. Нагрузочные графики производственных машин / С.В. Егоров, В.Ф. Егоров, П.Н. Кунинин // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2001. – № 12. – С. 36 – 38.
27. Егоров С.В. Пуско-тормозные режимы электродвигателей повторно-кратковременной работы / С.В. Егоров, В.Ф. Егоров, П.Н. Кунинин // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2003. – № 1. – С. 67 – 69.
28. Егоров С.В. Пусковые режимы электромеханических систем при переменных статических нагрузках и моменте инерции системы / С.В. Егоров, В.Ф. Егоров, П.Н. Кунинин // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2003. – № 3. – С. 68 – 70.
29. Егоров В.Ф. Применение уравнивающих устройств для снижения неравномерности нагрузок в элементах электромеханических систем / В.Ф. Егоров, С.В. Егоров // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2003. – № 10. – С. 44 – 46.
30. Егоров В.Ф. Выбор уравнивающих систем по условию минимума приведенной нагрузки / В.Ф. Егоров, С.В. Егоров // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2003. – № 12. – С. 51 – 54.
31. Егоров В.Ф. Выбор параметров уравнивающих систем при свободно формируемой модели уравнивания / В.Ф. Егоров, С.В. Егоров // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2004. – № 6. – С. 67 – 69.
32. Егоров В.Ф. Пусковые режимы электромеханических систем при переменных статических нагрузках и моменте инерции системы // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – № 2. – С. 52 – 55.
33. Егоров В.Ф. Структуры переходных процессов при трехпериодных графиках движения // Вестник КузГТУ. – 2010. – №1. – С 81 – 84.

34. Егоров В.Ф. Нагрузки упруго-механических колебаний / В.Ф. Егоров, С.В. Егоров // Вестник КузГТУ. – 2010. – №1. – С. 81 – 84.

35. Егоров В.Ф. Распределение нагрузок в многодвигательных электроприводах / В.Ф. Егоров, С.В. Егоров // Вестник КузГТУ. – 2010. – № 2. – С. 97 – 99.

36. Егоров В.Ф. Управление распределением нагрузок цикловых механизмов с электрическим приводом / В.Ф. Егоров, С.В. Егоров // Известия ТПУ. – 2010. – № 4 (316). – С. 160 – 164.

37. Егоров В.Ф. Переходные процессы механизмов с электрическим приводом в двухпериодном режиме работы // Известия ТПУ. – 2010. – № 4 (316). – С. 165 – 168.

38. Егоров В.Ф. Динамические режимы электромеханических систем циклического действия // Омский научный вестник. – 2010. – №1 (87). – С. 77–80.

39. Егоров В.Ф. Динамические режимы многодвигательных электромеханических систем / В.Ф. Егоров, С.В. Егоров // Омский научный вестник. – 2010. – №1 (87). – С. 80 – 84.

40. Егоров В.Ф. Снижение неравномерности нагрузок позиционных механизмов // Изв. вузов. Строительство. – 2010. – № 6 (87). – С. 69 – 75.

41. Егоров В.Ф. Нагрузки эксцентриковых ножниц при использовании передаточных механизмов с переменным передаточным числом / В.Ф. Егоров, М.И. Ступаков, М.Л. Босняк // Омский научный вестник. – 2010. – №1 (87). – С. 57 – 60.

Авторские свидетельства и патенты:

1. А. с. 912401 СССР, М.Кл³ В 23 D 15/02. Ножницы для резки металла / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.П. Прилуков (СССР). – № 2954199/25 – 27; заявл. 10.07.80; опубл. 25.03.82. Бюл. № 10. – 3 с. : ил.

2. А. с. 980968 СССР, М.Кл³ В 23 D 15/02. Ножницы для резки металла / В.П. Прилуков, В.Ф. Егоров, В.И. Люленков (СССР). – № 3266923/25 – 27; заявл. 31.03.81; опубл. 15.12.82, Бюл. № 46. – 3 с. : ил.

3. А. с. 1044368 СССР, М.Кл³ В 21 В 39/16. Манипулятор-кантователь обжимного прокатного стана / В.А. Воскресенский, В.Ф. Егоров, В.И., В.С. Горяшин (СССР). – № 3462078/22 – 02; заявл. 05.07.82; опубл. 30.09.83, Бюл. № 30. – 3 с. : ил.

4. А. с. 1073012 СССР, М.Кл³ В 23 D 15/02. Ножницы для резки металла / В. Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.П. Прилуков, В.М. Новиков (СССР). – № 3405120/25 – 27; заявл. 12.03.82; опубл. 15.02.84, Бюл. № 6. – 3 с. : ил.

5. А. с. 1097455 СССР, М.Кл³ В 23 D 15/02. Ножницы для резки металла / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.П. Прилуков (СССР). – № 3576547/25 – 27; заявл. 12.04.83; опубл. 15.06.84, Бюл. № 22. – 3 с. : ил.

6. А. с. 1102754 СССР, М.Кл.³ В 65 G 67/48. Вагонопрокидыватель / Ш.В. Хамицев, В.П. Прилуков, В.Ф. Егоров, Г.Б. Трушевич, В.И. Люленков (СССР). – № 3605103/27 – 11; заявл. 24.02.83; опубл. 15.07.84, Бюл. № 26. – 3 с. : ил.

7. А. с. 1166917 СССР, М.Кл.⁴ В 23 D 23/00. Штамп для резки профилей / В.П. Прилуков, В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.В. Мясников (СССР). – № 3660191/25 – 27; заявл. 31.10.83; опубл. 15.07.85, Бюл. № 26. – 2 с. : ил.
8. А. с. 1219508 СССР, М.Кл.⁴ В 65 G 67/48. Вагоноопрокидыватель / Ш.В. Хамицев, В.Ф. Егоров, Г.Б. Трушевич (СССР). – № 3838653/25 – 27; заявл. 04.01.85; опубл. 23.03.86, Бюл. № 11. – 2 с. : ил.
9. А. с. 1326395 СССР, М.Кл.⁴ В 23 D 23/00. Способ резки металлических изделий и устройство для его осуществления / В.И. Люленков, В.П. Прилуков, В.Ф. Егоров (СССР). – № 3609844/31 – 27; заявл. 27.06.83; опубл. 30.07.87, Бюл. № 28. – 3 с. : ил.
10. А. с. 1329929 СССР, М.Кл.⁴ В 23 K 7/10. Привод устройства для газопламенной резки изделий / В.Ф. Егоров, В.С. Чалков, И.И. Логунов, В.С. Гярашин (СССР). – № 4037707/31 – 27; заявл. 13.03.86; опубл. 15.08.87, Бюл. № 30. – 3 с. : ил.
11. А. с. 1333481 СССР, М.Кл.⁴ В 23 D 23/00. Штамп для резки профилей / В.Ф. Егоров, В.П. Прилуков, В.И. Люленков, В.С. Чалков, И.И. Логунов (СССР). – № 4058359/31 – 27; заявл. 22.04.86; опубл. 30.08.87, Бюл. № 32. – 3 с. : ил.
12. А. с. 1355383 СССР, М.Кл.⁴ В 23 D 23/00. Штамп для резки профилей / В.Ф. Егоров, В.П. Прилуков, В.И. Люленков, В.С. Чалков, И.И. Логунов (СССР). – № 4087370/31 – 27; заявл. 13.05.86; опубл. 30.11.87, Бюл. № 44. – 3 с. : ил.
13. А. с. 1397196 СССР, М.Кл.⁴ В 23 D 19/02. Ножницы для резки листового металла / В.И. Люленков, В.П. Прилуков, В.Ф. Егоров (СССР). – № 4091566/31 – 27; заявл. 10.07.86; опубл. 23.05.88, Бюл. № 19. – 3 с. : ил.
14. А. с. 1544693 СССР, М.Кл.⁵ В 65 G 67/48. Вагоноопрокидыватель / Ш.В. Хамицев, В.Ф. Егоров (СССР). – № 4437099/27 – 11; заявл. 06.06.88; опубл. 23.02.90, Бюл. № 7. – 2 с. : ил.
15. А. с. 1602631 СССР, М. Кл.⁵ В 23 D 15/02. Ножницы для резки металла / В.И. Люленков, В.Ф. Егоров, В.П. Прилуков (СССР). – № 4445669/31 – 27; заявл. 23.06.88; опубл. 30.10.90, Бюл. № 40. – 3 с. : ил.
16. А. с. 1606264 СССР, М.Кл.⁵ В 23 D 15/08. Ножницы для резки металла / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.П. Прилуков (СССР). – № 4460378/31 – 27; заявл. 13.07.88; опубл. 15.11.90, Бюл. № 42. – 2 с. : ил.
17. А. с. 1654197 СССР, М.Кл.⁵ В 65 G 67/48. Вагоноопрокидыватель / Ш.В. Хамицев, В.Ф. Егоров (СССР). – № 4432067/27 – 11; заявл. 25.05.88; опубл. 07.06.91, Бюл. № 21. – 5 с. : ил.
18. А. с. 1735379 Российская Федерация, С21 В 7/20. Распределитель шихты загрузочного устройства доменной печи / И.В. Зуев, В.Ф. Егоров, В.И. Люленков (РФ). – № 1366534; заявл. 22.08.89; опубл. 23.05.92, Бюл. № 19. – 3 с. : ил.
19. А. с. 2008143 Российская Федерация, М.Кл.⁵ В 23 D 15/02. Способ резки изделий из металла / В.Ф. Егоров (РФ). – № 4825419/27; заявл. 14.05.90; опубл. 28.02.94, Бюл. № 4. – 3 с. : ил.

20. Пат. 2105641 Российская Федерация, МКП В 23 D 15/04. Способ резки прокатных заготовок / В.И. Люленков, В.Ф. Егоров (РФ). – № 96101983/02; заявл. 01.02.96; опубл. 27.02.98, Бюл. № 6. – 3 с. : ил.

В других изданиях:

1. К вопросу проектирования ножниц с параллельными ножами / В.И. Люленков [и др.] // Кузнецкие металлурги в борьбе за технический прогресс и повышение эффективности производства: сб. науч. тр. – Кемерово, 1974.

2. Егоров В.Ф. Развитие автоматизированного электропривода в условиях ограничения энергоресурсов / В.Ф. Егоров, С.В. Егоров // Материалы шестнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения: сб. науч. тр. / Кузбасс. Науч. центр Сиб. отделения Международ. АН ВШ; под редакцией проф. Л.Т. Дворникова, Э.Я. Живаго. – Новокузнецк, 2006 – Вып. 6. – С. 119 – 127.

3. Анализ расчетных схем вагоноопрокидывателей / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, С.В. Егоров [и др.] // Материалы шестнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения : сб. науч. тр. / Кузбасс. Науч. центр Сиб. отделения Международ. АН ВШ; под редакцией проф. Л.Т. Дворникова, Э.Я. Живаго. – Новокузнецк, 2006. – Вып. 6. – С. 137–140.

4. Егоров В.Ф. Усилия передавливания полосы плоскими ножами / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, С.В. Егоров // Материалы шестнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения: сб. науч. тр. / Кузбасс. Науч. центр Сиб. отделения Международ. АН ВШ; под редакцией проф. Л.Т. Дворникова, Э.Я. Живаго. – Новокузнецк, 2006. – Вып. 6. – С. 141–144.

Подписано в печать « 1 » октября 2013. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,16. Уч. изд. л. 2,0.

Тираж 130 экз. Заказ № 434.

Сибирский государственный индустриальный университет.
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, типография СибГИУ