

ВЕСТНИК

**Магнитогорского государственного
технического университета им. Г. И. Носова**

№ 2 (14) июнь 2006 г.

Издается с марта 2003 года

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

Б.А. Никифоров – проф., д-р техн. наук.

Заместители:

Г.С. Гун – проф., д-р техн. наук;

М.В. Чукин – проф., д-р техн. наук (ответственный редактор).

Члены редколлегии:

В.А. Бигеев – проф., д-р техн. наук;

М.В. Бушманова – проф., канд. физ.-мат. наук;

К.Н. Еремин – проф., д-р техн. наук;

В.Н. Калмыков – проф., д-р техн. наук;

А.С. Карандаев – проф., д-р техн. наук (редактор номера);

В.М. Колокольцев – проф., д-р техн. наук;

О.В. Лешер – проф., д-р пед. наук;

И.Ю. Мезин – проф., д-р техн. наук;

С.И. Платов – проф., д-р техн. наук;

В.М. Салганик – проф., д-р техн. наук;

А.С. Сарваров – проф., д-р техн. наук.

© Журнал «Вестник МГТУ им. Г.И.Носова», 2006

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Тел.: (3519) 29-85-17

Факс (3519) 23-57-60

E-mail: mgtu@mgtu.ru; nis@mgtu.ru

Журнал подготовлен к печати Издательским центром
МГТУ им. Г.И.Носова.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ.

Подписано к печати 09.06.2006.

Заказ 477. Тираж 500 экз.



СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| <i>Журавлев Ю.П.</i> Развитие энергетики ОАО «ММК» в современных условиях..... | 3 |
| <i>Головин В.В.</i> К 70-летию ЦЭТЛ ОАО «ММК»..... | 5 |
| <i>Селиванов И.А., Карандаев А.С.</i> Инновационные разработки МГТУ в области совершенствования автоматизированных электроприводов металлургического производства..... | 7 |
| <i>Головин В.В.</i> Анализ составляющих запаса выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя электропривода клетки широкополосного стана горячей прокатки..... | 17 |
| <i>Шляев П.В., Головин В.В., Косенков А.В.</i> Основные направления модернизации электроприводов технологических агрегатов в ходе реконструкции ОАО «ММК»..... | 22 |
| <i>Коваленко А.Ю.</i> Расчет электрических потерь энергии в питающей сети при работе агрегата «ковш-печь»..... | 26 |
| <i>Лукьянов С.И., Васильев А.Е., Швидченко Д.В., Суспицын Е.С., Погорелов И.Л., Лукьянов В.П., Данилов В.Н.</i> Автоматизированный электропривод тянуще-правильного устройства машины непрерывного литья..... | 30 |
| <i>Кирпичников Ю.А., Николаев А.А.</i> К определению скоростных режимов работы взаимосвязанных электроприводов выходной зоны агрегата непрерывного горячего цинкования ОАО «ММК»..... | 34 |
| <i>Буланова О.В.</i> Расчет показателей статической устойчивости систем электроснабжения крупных промышленных предприятий, имеющих в своем составе собственные электростанции..... | 37 |
| <i>Ишматов З.Ш.</i> Коэффициентные методы оценки робастности линейных непрерывных систем управления..... | 40 |
| <i>Сарваров А.С., Демин С.А.</i> Математическая модель электропривода машины центробежного литья валков на базе системы АВК..... | 50 |
| <i>Копцев В.В.</i> Снижение энергозатрат при эксплуатации газовых одностопных колпаковых печей..... | 53 |
| <i>Копцев В.В.</i> Исследование аэродинамики сопла горелочного устройства с центральным телом..... | 56 |
| <i>Омельченко Е.Я., Фадеев А.В., Чесноков С.В.</i> Модернизация электропривода четырехклетьевого плющильного стана..... | 59 |
| <i>Ячиков И.М., Ларина Т.П., Вдовин К.Н.</i> Сравнение тепловой работы кристаллизаторов МНЛЗ с охлаждающим и каналами различной формы..... | 65 |
| <i>Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н.</i> Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения..... | 71 |
| <i>Евсеев О.М.</i> Технологические требования к регуляторам деления нагрузок между валками станов холодной прокатки с индивидуальным электроприводом..... | 75 |
| Сведения об авторах | 82 |
| Инновационные разработки энергетического факультета..... | 84 |
| Инновационные разработки факультета автоматики и вычислительной техники..... | 86 |

УДК 621.31.004.18:669.1

Ю.П. Журавлев

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ ОАО «ММК» В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В середине 1990-х годов Магнитогорский металлургический комбинат, как и все предприятия России, прошел жесткие испытания: сокращение объемов производства, недостаток финансовых средств, нарушение внешних и внутренних экономических связей. Энергетика инерционна по своей природе, она не успевала за изменившимися условиями. Девяностые годы решительно изменили прежнее отношение к энергетическому хозяйству, как к вспомогательной сфере производства. Именно тогда вопросы обеспечения стабильной энергетики предприятия и повышения эффективности использования энергоресурсов вошли в число приоритетных. И именно в то время стратегическим направлением ОАО «ММК» было принято развитие собственной энергетической базы, жизненно необходимой для предприятия с полным металлургическим циклом.

Концептуальный подход к развитию энергетики в ОАО «ММК» был сформулирован в виде двух основополагающих документов: в «Программе энергосбережения на период до 2002 г.» и «Концепции развития энергохозяйства ОАО «ММК» в 1997–2005 гг.», в которых была поставлена задача снижения уровня энергозатрат до 5,5–6 Гкал на тонну сырой стали.

Достижение такого уровня энергозатрат и максимального экономического эффекта возможно при реализации программ по следующим направлениям:

1. Модернизация существующих энергетических объектов, ориентированная на максимальную выработку собственных энергоресурсов предприятия.

2. Максимально возможная утилизация вторичных энергетических ресурсов, направленная прежде всего на выработку электроэнергии.

3. Реализация мероприятий, обеспечивающих сокращение энергетических затрат.

4. Внедрение энергосберегающих технологий.

При создании «Концепции развития энергохозяйства...» были проанализированы основные направления и этапы реконструкции производства и сформулированы следующие принципы:

- рациональное количество и типы источников энергии и их размещение на промплощадке комбината;
- оптимальное построение энергосетей и всей инженерной инфраструктуры;
- оптимальное управление потоками энергоносителей;
- минимальные затраты на реконструкцию энергохозяйства.

Основным условием успешного выполнения энергосберегающих программ является эффективная организация работ и создание действенного технико-экономического механизма стимулирования энергосберегающих проектов и мероприятий.

Выполнение программы началось с сокращения потребления покупных энергоресурсов – электроэнергии и природного газа, а также с развития систем управления энергетическими потоками. Для обеспечения полного использования вторичных газов, ликвидации их избытка на комбинате планомерно создаются дополнительные потребители. Так, низкокалорийные газы целесообразно использовать в качестве топлива, поэтому котлы на центральной электростанции (ЦЭС) и паровоздуховной электростанции (ПВЭС) были приспособлены для сжигания доменного газа, хотя традиционно доменный газ используют в самом доменном цехе для обогрева воздухонагревателей.

Решающую роль в развитии энергосистемы комбината играет увеличение мощности электростанций. Это направление потребовало наибольших затрат. Прежде всего, все три электростанции комбината требовали обновления. Две из них, ЦЭС и ПВЭС, строились и развивались вместе с предприятием, их нужно было реконструировать, третья – теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) – самая «молодая» из электростанций, построенная в 1954 году, нуждалась в модернизации.

В начале 1996 года электростанции вырабатывали 497 МВт электрической мощности, чем «закрывали» потребности металлургического комплекса на 65–70 %, остальное комбинат брал из региональной системы. Кроме того, собствен-

ные мощности полностью обеспечивали потребности предприятия в тепловой энергии в виде тепла и пара, и на 70 % комбинат обеспечивал потребности города в тепле.

Ввод в строй двух турбогенераторов в паросиловом цехе ММК в июле 2005 года является уникальным энергосберегающим проектом. Реализация этого проекта позволила увеличить выработку электроэнергии, а также использовать сбросовый пар, вырабатываемый кислородно-конвертерным цехом (ККЦ). Этот пар поступает с котлов-охладителей конвертерного газа ККЦ и котлов-утилизаторов второй котельной и является продуктом утилизации тепла отходящих газов конвертера и нагревательных печей. Пуск двух турбогенераторов увеличил электрическую мощность энергосистемы комбината и позволил утилизировать 60–80 т пара в час. Суммарная электрическая мощность двух турбогенераторов ST3 производства фирмы «Siemens» составляет 14,8 МВт. Увеличение выпуска электроэнергии позволило ММК снизить ее закуп и соответственно обеспечить экономию в объеме около 70 млн руб.

Реализация мероприятий по увеличению производительности электростанций дала существенный прирост электроэнергии. В настоящее время на комбинате вырабатывается в среднем 614 МВт электрической мощности. Потребности промплощадки полностью обеспечены собственной электроэнергией, несмотря на то, что за последние годы в эксплуатацию введен ряд энергоемких агрегатов, такие как «печь-ковш» в кислородно-конвертерном цехе, двухклетевой реверсивный стан в пятом листопрокатном цехе, агрегат непрерывного горячего цинкования в цехе покрытий, новые сортовые станы. Комбинат из региональной системы покупает лишь 40 МВт электрической мощности для дочерних предприятий. Кроме того, значительная часть электроэнергии, произведенной на ММК, поставляется на нужды города и региона.

Если в 1997 году энергетическая составляющая в себестоимости металлопродукции ММК достигала среднего российского показателя – 35 %, то в 2000 году она снизилась до 19,66 %. На сегодняшний день при существенно возросшей за последние годы цене на энергоносители этот показатель составляет 21,94 %. Все это повышает рентабельность металлопродукции ММК, улучшает экономическую эффективность предприятия.

Развивается и система локальных энергостанций для дочерних предприятий комбината. Так, построенная и пущенная мини-ТЭЦ в ЗАО «Русская металлургическая компания» (коксохимическое производство ММК) – уникальное энергетическое сооружение. Установка включает в себя котел-утилизатор типа КВГ-3Г производительностью 75 т пара в час, изготовленный по конверсионной технологии, противодавленческую турбину с генератором мощностью 4 МВт, мощный газораспределительный узел, оптимальную схему водоподготовки. В перспективе на комбинате планируется продолжить строительство небольших энергетических объектов на различных участках.

В 2005 году общее использование энергоресурсов по предприятию, характеризуемое показателем «гигакалория на тонну сырой стали», составило 6,61 Гкал на тонну. Этот показатель ниже уровня 2004 года на 0,13 Гкал, или на 1,9 %. При этом в 1995 году обобщенное удельное энергопотребление на ММК составляло 7,4 Гкал/т, а в 1996 г. – 8,23 Гкал/т. Учитывая разницу в климатических условиях, можно утверждать, что уровень энергопотребления на ММК вполне сопоставим с уровнем зарубежной металлургии.

Повышение эффективности энерго- и ресурсопотребления во всех структурах производства ОАО «ММК» позволило достичь значительного социального и экономического эффекта:

- снижена себестоимость металлопродукции на 13,6 % и повышена ее конкурентоспособность на рынке;
- увеличена выработка собственной электроэнергии до 100 % от потребности предприятия и обеспечена ее стоимость в 2,5–3 раза ниже покупной;
- сокращено удельное потребление природного газа на 18 %;
- обеспечена независимость в электроснабжении от РАО «ЕС России», повышена надежность энергоснабжения и энергобезопасность предприятия;
- на 20% сокращены удельные затраты энергоресурсов на производство тонны стали, достигнут уровень энергопотребления металлургических предприятий ведущих зарубежных стран.

В результате проводимых мероприятий комбинат вышел на передовые позиции по энерго-

эффективности среди металлургических предприятий отрасли. ММК выбрал путь, по которому прошли ведущие зарубежные компании, успешно использовал мировой опыт и собственные разработки.

В настоящее время ММК обладает развитым комплексом энергетических цехов. Он объединяет три собственные электростанции – ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС, кислородно-конвертерное производство, цех электросетей и подстанций, паросиловой и газовый цеха, цех водоснабжения и энергоцех, а также цеха инженерного обеспечения: центр энергосберегающих технологий, электротехническую лабораторию, цех связи, цех КИПиА. Развитие каждого из этих звеньев и энергохозяйства в целом позволило энергетикам комбината выполнить поставленную задачу – обеспечить энергобезопасность предприятия и снизить энергетическую составляющую в себестоимости продукции до мировых показателей.

Специалисты УГЭ всегда успешно решали задачи, поставленные перед ними технологами. Можно привести множество примеров. Ограничимся одним. Большие проблемы сложились в работе нового агрегата «печь-ковш» для внепечной обработки стали австрийской компании «Voest Alpine». Электротехническое оборудование агрегата работало неудовлетворительно и выходило из строя, а это уже ситуация аварийная. Инженеры УГЭ не только установили причины неполадок работы импортного оборудования, но и нашли оптимальные инженерные решения, внедрили их и обеспечили бесперебойную работу агрегата, где сегодня доводится до необходимых качественных характеристик до 5,5 млн тонн стали в год.

Управление главного энергетика (УГЭ) ОАО «ММК», отмечающее свой 75-летний

юбилей, объединяет три с половиной тысячи специалистов энергетических цехов и работников управляющей структуры. Коллектив обладает мощным научным и практическим потенциалом. Специалисты УГЭ эффективно работают по развитию перспективных направлений. В УГЭ каждому работнику предоставлены широкие возможности для профессионального и творческого роста. В работе по повышению квалификации персонала управление главного энергетика успешно сотрудничает с Магнитогорским государственным техническим университетом, Южно-Уральским государственным университетом и другими ведущими вузами страны. При Управлении успешно работает школа главного энергетика, где набираются знания и опыта молодые менеджеры, включенные в резерв на замещение руководящих должностей. Крепкие базовые знания, дополнительное образование и полученный практический опыт помогают энергетикам эффективно работать по развитию перспективных научных направлений и самых актуальных вопросов.

Уникальный опыт энергетиков Магнитогорского металлургического комбината признан в научном мире. За плодотворную научно-практическую работу в области энергетики и электрификации, за высокие достигнутые результаты ОАО «ММК» избран коллективным членом Академии электротехнических наук Российской Федерации. Главный энергетик Г. В. Никифоров, заслуженный энергетик Российской Федерации, доктор технических наук, избран действительным членом этой Академии. В 2002 году группа руководителей управления главного энергетика награждена Государственной премией правительства Российской Федерации в области науки и техники.

УДК 669.1.013.5

В.В. Головин

К 70-ЛЕТИЮ ЦЭТЛ ОАО «ММК»

История возникновения и создания службы лаборантов-электротехников связана с пуском центральной электростанции (ЦЭС) 23 октября 1931 года. Легендарные инженеры-первостроители Елена Джапаридзе, Владимир Фастовский работали в тесном контакте со специалистами

будущей электротехнической лаборатории. 23 октября 1936 года приказом директора комбината А.П. Завенягина выделена электротехническая лаборатория из состава цеха сетей и подстанций с её переводом в управление главного энергетика. По мере технического роста,

лаборатория пополняется и новыми кадрами. К началу Великой Отечественной войны штат лаборатории составлял 31 человек, из них ИТР – 17 человек, рабочих – 14 человек.

В послевоенные десятилетия в связи с расширением электрохозяйства, внедрением новой техники, автоматизации и телемеханизации производственных процессов в системах электроснабжения и электроприводов возникла необходимость в расширении функций отдельной Электротехнической лаборатории (с 1958 г. – это название ЦЭТЛ), которая реально к этому была готова. В связи с этим, в октябре 1963 года, ОЭТЛ была преобразована в самостоятельное подразделение – центральную заводскую электротехническую лабораторию комбината ЦЗЭТЛ.

В 1960–70 гг. бурно развивается и совершенствуется система электроснабжения комбината, строятся и вводятся в эксплуатацию новые (слябинг, листопрокатный цех № 4 (ЛПЦ-4), ЛПЦ-5) и реконструируются старые цеха с совершенно новым технологическим и электрическим оборудованием. Вводятся новые схемы электроснабжения Магнитогорского энергоузла, начинается интенсивное внедрение полупроводниковой техники. В 1970–80 гг. на ММК были введены в строй ЛПЦ-6, ЛПЦ-7, ЛПЦ-8, а это дальнейшее развитие схем электроснабжения, появление новых, более сложных защит, нового оборудования, систем управления и регулирования, и опять ЦЗЭТЛ на самом «острие» работ по вводу в эксплуатацию и в обслуживании всех этих систем.

В 1973 году ЦЗЭТЛ была переименована в ЦЭТЛ. В функциях ЦЭТЛ появляются и успешно решаются вопросы обеспечения технического прогресса в области организации новых технологий, повышения качества, снижения трудозатрат ремонтов электрооборудования, сокращения простоев из-за неисправностей и отказов электрооборудования, роста его надёжности.

Происходят изменения в стране, происходят они на комбинате, не обходят они и ЦЭТЛ. Второе дыхание лаборатория получает при строительстве и вводе в эксплуатацию кислородно-конвертерного цеха, стана 2000 горячей

прокатки, реконструкции и переориентировании отдельных цехов, создании новых производственных подразделений. В 2002 году силами сотрудников ЦЭТЛ в ЛПЦ-5 был запущен 2-клетьевого реверсивный стан холодной прокатки, благодаря которому выпуск холоднокатаной продукции увеличился в 2 раза. Агрегат непрерывного горячего цинкования, линия хромирования валков, линия полимерных покрытий в ЛПЦ-6, печь-ковш и агрегат доводки стали в мартеновском цехе, реконструкция стана «2500» горячей прокатки в ЛПЦ-4, реконструкция травильного отделения ЛПЦ-5, реконструкция доменных печей – это лишь небольшой перечень работ, выполненных специалистами ЦЭТЛ в 2002–2004 годах.

Сортовые станы, запущенные в июле 2005 года, стали важнейшими пусковыми объектами ММК. Они представляют собой новейшие, полностью автоматизированные агрегаты, позволяющие выпускать весь спектр качественного сортового проката. Наладку этих агрегатов также осуществляли работники участков ЦЭТЛ.

Центральная электротехническая лаборатория из года в год подтверждает свою значимость в реализации крупномасштабной программы модернизации материально-технической базы комбината.

Без работников лаборатории не обходится ввод в строй и социальных объектов, таких как Ледовый дворец им. И.Х. Ромазана, детский ледовый дворец, новый международный аэропорт города Магнитогорска, горно-лыжные центры в Абзаково и на озере Банном, Православный Храм, медицинские диагностические центры.

В настоящее время ЦЭТЛ, история которой началась 70 лет назад, – это слаженный коллектив высококвалифицированных профессионалов, готовых решать любые поставленные перед ними задачи. В штате лаборатории насчитывается 212 человек, из них 181 – с высшим образованием, несколько специалистов имеют ученую степень кандидата технических наук.

И.А. Селиванов, А.С. Карандаев

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ МГТУ В ОБЛАСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Приоритетными направлениями совместных научных разработок электротехнических кафедр МГТУ и электротехнических служб ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») в области совершенствования автоматизированных электроприводов являются:

- энергосбережение в электроприводах металлургического производства;
- совершенствование автоматизированных электроприводов и систем управления технологических комплексов;
- разработка систем мониторинга и диагностирования технического состояния электромеханических систем технологических агрегатов.

Энергосбережение в электроприводе

В течение последних лет учеными МГТУ выполняется комплекс исследовательских работ под общим названием «*Оптимальное управление энергоемкими объектами горно-металлургического производства*» (научный руководитель направления – д-р техн. наук, проф. Селиванов И.А.).

Наиболее энергоемкими электромеханическими системами металлургических предприятий являются синхронные электроприводы (единичная установленная мощность двигателя достигает 20 МВт) и электроприводы (ЭП) постоянного тока прокатных станов. Для примера, единичная мощность тиристорного электропривода клетки широкополосного стана горячей прокатки 2500 ОАО «ММК» составляет 8,9 МВт, мощность электропривода клетки стана 2000 равна 16 МВт. Суммарная установленная мощность ЭП стана 2500 превышает 180 тыс. кВт, в том числе мощность главных ЭП постоянного тока – 89 тыс. кВт. Годовой расход электроэнергии более 20 млн кВт.ч, из них более половины приходится на тиристорные ЭП чистой группы.

Энергетические показатели электроприводов металлургических агрегатов далеки от оптимальных. Для синхронных ЭП это вызвано от-

сутствием либо несовершенством систем автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронных двигателей (СД). Для тиристорных ЭП постоянного тока большая часть потерь связана с потреблением реактивной мощности, вызванной фазовым регулированием напряжения. Это предопределило два основных направления поиска резервов экономии электроэнергии в электроприводах названных классов.

Первое направление исследований связано с *разработкой систем автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей* (научный руководитель – канд. техн. наук, доц. Корнилов Г.П.).

Разработка и внедрение систем АРВ позволяет использовать СД в качестве потребителей регуляторов и за счет этого значительно повысить эффективность установленного оборудования при минимальных капитальных затратах.

Исследования режимов работы СД, проведенные в цехах ОАО «ММК», показали, что большая часть СД, оборудованных системами АРВ, работает в «ручном» режиме, с постоянным током возбуждения, величина которого составляет (0,7–0,9) номинального значения. На **рис. 1** представлена диаграмма, из которой следует, что около 65,5% двигателей работает со спокойной (вентиляторной) нагрузкой (компрессоры, насосы, вентиляторы и др.), остальные (главные ЭП клетей прокатных станов, приводы вспомогательных механизмов и преобразовательных агрегатов) – с переменной [1]. Системы АРВ на большинстве СД отсутствуют, что приводит к неоправданным потерям электрической энергии, повышению загрузки оборудования, снижению надежности его работы.

В тех случаях, когда в системе электроснабжения нет необходимости в дополнительной реактивной мощности, наиболее экономичным является режим работы СД с $\cos\varphi = 1$, т.к. обеспечивается минимум электрических потерь в двигателе. Ток статора в этом случае минимален и определяется только моментом нагрузки СД.

Для реализации этого режима разработана система векторного управления возбуждением, которая обеспечивает устойчивую работу двигателя с коэффициентом мощности, близким к единице

* В подготовке материала статьи принимали участие В.В. Головин, С.А. Евдокимов, Г.П. Корнилов, В.И. Косматов, С.И. Лукьянов, Ю.В. Мерзляков, А.С. Сарваров.

при изменении напряжения и момента на валу двигателя [2]. В основе векторного управления СД лежит представление тока возбуждения \bar{I}_f двумя ортогональными составляющими, одна из которых пропорциональна активной составляющей тока статора \bar{I}_{fa} и создает магнитный поток двигателя, другая пропорциональна реактивной составляющей тока \bar{I}_{fp} и определяет электромагнитный момент при заданном напряжении: $\bar{I}_f = \bar{I}_{fa} + \bar{I}_{fp}$.

Функциональная схема системы АРВ СД, реализующей данный принцип, представлена на рис. 2. Векторное сложение составляющих выполнено на переменном токе. Суммируются два синусоидальных напряжения, сдвинутых по фазе на 90° , что поясняется векторной диаграммой (рис. 3, а). Напряжение питающей сети U_{BC} , пропорциональное реактивной составляющей тока возбуждения, снимается со вторичной обмотки трансформатора напряжения, а напряжение на вторичной обмотке трансформатора тока, установленного в фазе А, пропорционально активной составляющей тока возбуждения.

Система работает в устойчивом режиме, если

ток является чисто активным (совпадает по фазе с вектором U_A). В этом режиме СД работает в нижнем экстремуме U-образной характеристики (рис. 3, б), что соответствует $\cos\varphi = 1$ и оптимальному режиму работы СД с точки зрения потерь электрической энергии.

Исследования разработанной системы, выполненные с помощью математической модели и в промышленных условиях, подтверждают ее работоспособность и высокую эффективность применения [2].

Второе направление связано с разработкой тиристорных электроприводов прокатных станов с улучшенными энергетическими показателями (научный руководитель – д-р техн. наук, проф. Карандаев А.С.). Большинство ЭП клетей прокатных станов выполняется с двухзонным регулированием скорости (ДЗРС). К ним предъявляются жесткие требования в отношении быстродействия и надежности при отработке ударного приложения нагрузки, возникающего при захвате металла валками, а также в режиме разгона под нагрузкой, возникающем при прокатке с ускорением. Данные требования выполняются, если динамический запас системы регулирования, и в первую очередь запас выпрямленной ЭДС тиристорного

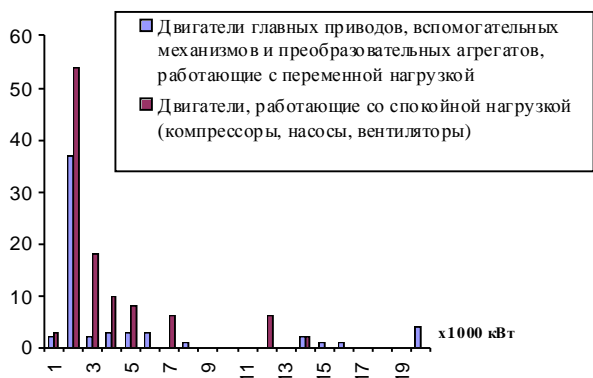


Рис. 1. Гистограмма распределения синхронных двигателей по мощности для ОАО «ММК»

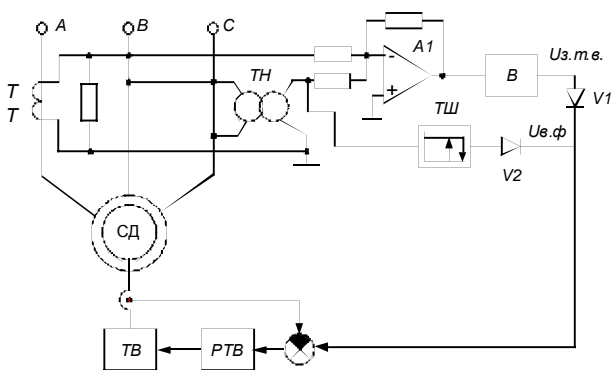


Рис. 2. Функциональная схема системы векторного управления

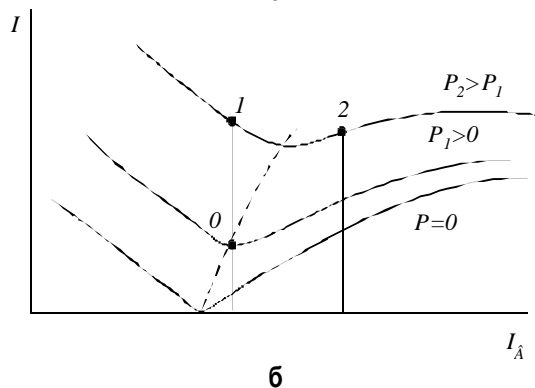
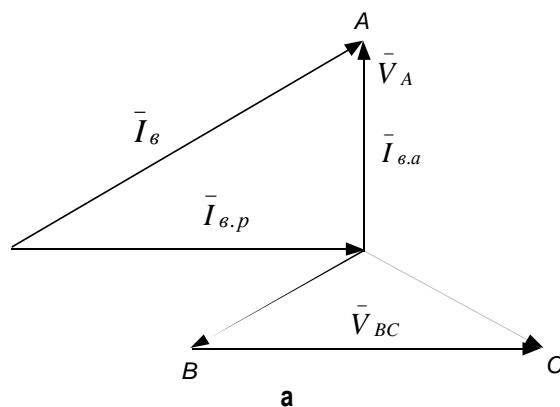


Рис. 3. Векторные диаграммы (а) и U-образные характеристики (б), поясняющие принцип управления СД

преобразователя (ТП), будет обеспечен в названных динамических режимах. Дополнительное увеличение запаса обеспечивает повышение надежности ЭП, однако это приводит к ухудшению энергетических показателей за счет увеличения потребления реактивной составляющей, зависящей от степени регулирования выпрямленной ЭДС.

С целью улучшения энергетических показателей разработана концепция систем двухзонного регулирования, в основу которой положен принцип перераспределения запаса выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя в установившемся и динамических режимах, вызванных изменением нагрузки ЭП [3].

В рамках названной общей концепции предложены способ и система зависимого управления потоком возбуждения в функции выпрямленной ЭДС ТП [3, 4]. Суть способа заключается в том, что задающее воздействие на регулятор внешнего контура в цепи возбуждения формируется пропорциональным номинальной выпрямленной ЭДС. Реализация способа позволяет уменьшить запас выпрямленной ЭДС ТП при относительно плавном изменении нагрузки (для тиристорных ЭП прокатных станов – в режиме разгона под нагрузкой). Применение разработанной системы рекомендуется в ЭП непрерывных и реверсивных станов холодной прокатки, работающих в широком диапазоне изменения нагрузки.

Для ограничения запаса выпрямленной ЭДС ТП при отработке ударного приложения нагрузки разработаны способ и система зависимого управления потоком возбуждения с автоматическим изменением уставки выпрямленной ЭДС [3], а также системы ДЗРС с переключением координаты, регулируемой по цепи возбуждения (см. статью в настоящем номере).

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования предложенных систем двухзонного регулирования продемонстрировали возможность снижения запаса выпрямленной ЭДС ТП практически без ухудшения динамических показателей и надежности работы электропривода. Улучшение энергетических показателей обеспечивается практически без капитальных затрат за счет снижения вторичного напряжения преобразовательного трансформатора.

Энергосбережение средствами электропривода (научный руководитель – д-р техн. наук, проф. Сарваров А.С.).

В рамках совместных проектов по программе энергосбережения и повышения эффективности электропотребления была впервые обоснована

концепция целесообразности ступенчатого регулирования частоты вращения электроприводов вентиляторного типа и на этой основе сформулирована задача создания относительно простых, дешевых и надежных объектно-ориентированных тиристорных непосредственных преобразователей с программным формированием различных ступеней частоты напряжения [5]. Для существенного упрощения системы управления были разработаны специальные алгоритмы программного формирования напряжения. В их основе лежат коммутационные функции, реализующие алгоритмы 2-фазного питания обмоток асинхронного двигателя (АД) и питания с чередованием интервалов 2- и 3-фазного питания. Их реализация позволила отказаться от контроля проводящего состояния вентиля и заметно упростить систему управления. На основе перепрофилирования преобразователей постоянного тока с использованием силовых блоков типа «трехфазный мост» были созданы опытные варианты НПЧ с программным управлением на базе простейшего микроконтроллера типа AT89S8252 [6].

Исследования, проведенные в ОАО «ММК», показали целесообразность реализации алгоритмов 2-фазного питания. На их основе полностью исключается возникновение коротких замыканий между вентиляльными триадами. Кроме того, исследования показали, что при соединении обмоток статора АД в схеме «треугольник» алгоритмы 2-фазного питания позволяют формировать на фазах двигателя 2-ступенчатое напряжение (рис. 4), что еще раз подтверждает эксплуатационные преимущества данного типа алгоритмов (в цехах ОАО «ММК» достаточно много вентиляторных установок с двигателями, обмотки которых соединены в «треугольник»).

Проблемы пуска мощных электродвигателей переменного тока являются весьма острыми. Речь идет о преодолении тяжелых условий пуска высоковольтных машин. Количество прямых пусков для них, как известно, лимитировано. В этих условиях возникла идея использования трансформаторов для создания высоковольтных трансформаторно-тиристорных пусковых устройств с использованием высвобождаемого оборудования (трансформаторов и тиристорных силовых блоков). На рис. 5 показан вариант схемной реализации такого пускового устройства.

Перспективы применения такого пускателя для высоковольтного электродвигателя весьма оптимистичны, так как трансформатор является

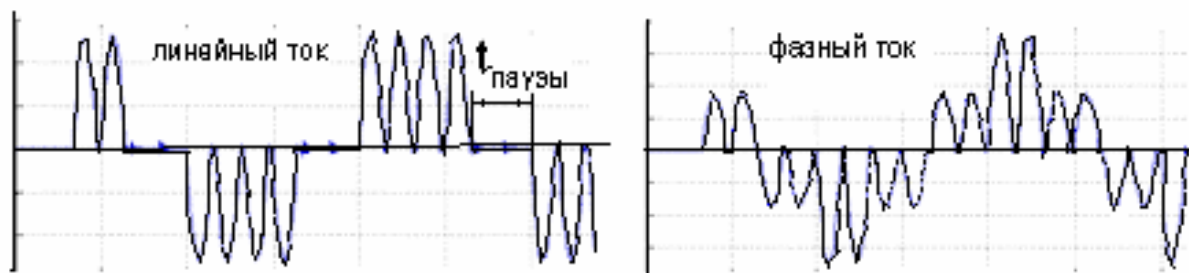


Рис. 4. Осциллограммы линейного и фазного тока при формировании алгоритмов 2-фазного питания нагрузки по схеме «треугольник» с частотой 25 Гц

простым и относительно дешевым устройством, а в качестве коммутатора может быть использован любой тиристорный преобразователь постоянного тока низковольтного исполнения.

Разработка и внедрение импульсных датчиков скорости и угла поворота вала двигателя (научный руководитель – канд. техн. наук, доц. Косматов В.И.).

В быстродействующих системах автоматического регулирования скорости электроприводов наличие оборотных пульсаций тахогенераторов приводит к появлению значительных вынужденных колебаний тока (момента) двигателя (до 100% и более), что, в свою очередь, вызывает снижение качества готовой продукции, делает технологический процесс неустойчивым и плохо управляемым.

На кафедре ЭиАПУ разработан индукционный импульсный датчик скорости (ИДС) без механической стыковки с валом двигателя. Принцип действия датчика основан на измерении частоты ЭДС зубцовой гармонической, обусловленной пульсациями магнитного потока, вызванными зубчатостью якоря двигателя, с последующим умножением этой частоты и формированием выходных сиг-

налов. Конструктивно ИДС состоит из двух измерительных элементов (основного и резервного), установленных на поверхности главного полюса, и блока преобразователя, установленного в шкафу системы регулирования.

Разработанный ИДС прошел длительные испытания, внедрен в промышленную эксплуатацию в системах регулирования скорости главных электроприводов на ряде прокатных станов акционерных обществ «ММК», «Нижне-Тагильский металлургический комбинат», «Синарский трубный завод», «Ново-Липецкий металлургический комбинат», «Череповецкий металлургический комбинат».

Длительный (более 10 лет) опыт эксплуатации датчика показал его высокую эксплуатационную надежность, стабильность параметров, что позволило отказаться от серийно выпускаемых прецизионных тахогенераторов и импульсных датчиков скорости для электроприводов механизмов и агрегатов, работающих в широком диапазоне скоростей, в условиях повышенных уровней вибраций, загрязненности и температуры окружающей среды, что наиболее характерно для предприятий металлургии и некоторых других отраслей промышленности.

Разработка и внедрение систем регулирования электроприводов валков листовых станов холодной прокатки с целью устранения дефекта полосы «ребристость» (научный руководитель – канд. техн. наук, доц. Евсеев О.М.).

«Ребристость» является основным дефектом, ограничивающим выпуск листа с 1 группой отделки поверхности. Дефект этот существует практически на всех станах холодной прокатки и до сих пор нет эффективных способов его устранения. Автором направления исследования сам дефект, выявлены причины его возникновения, которые согласуются с экспериментальными исследованиями, проведенными на станах 2500, 2030, 630, 1700 и др., и с теоретическим описанием процесса зарождения и существования «ребристости».

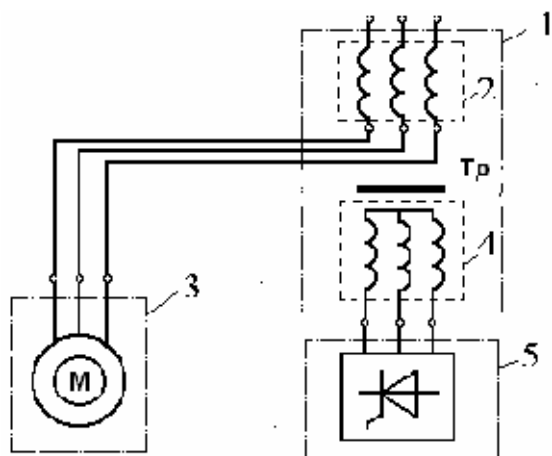


Рис. 5. Схема реализации трансформаторно-тиристорного пускового устройства

Для устранения дефекта на дрессировочном стане ЛПЦ-5 ОАО «ММК» спроектирована система регулирования, для реализации которой требуется изготовление ячейки регулятора, выполнение электромонтажных работ, связанных с подключением к действующей схеме, и наладка.

Включение системы регулирования совместно с изменением режима обжаты на дрессировочном стане позволяет практически полностью избавиться от дефекта «ребристость». В настоящее время кафедрой электропривода и автоматики промышленных установок МГТУ совместно с центральной электротехнической лабораторией и электрослужбами цехов ОАО «ММК» проводятся научно-исследовательские работы в принятом направлении.

Разработка автоматизированных электроприводов тянуще-правильного участка МНЛЗ (научные руководители – д-р техн. наук, проф. Селиванов И.А., д-р техн. наук, проф. Лукьянов С.И.).

Разработана обобщенная методика проектирования электропривода ТПУ МНЛЗ, в составе которой содержатся следующие методики [7, 8]: анализа случайных и детерминированных изменений токов нагрузки электродвигателей тянущих роликов, общего тока электропривода ТПУ и скорости литья заготовки в различных технологических режимах работы МНЛЗ; анализа распределения общего момента электропривода ТПУ по электродвигателям тянущих роликов; статистического влияния показателей настройки электропривода ТПУ на показатели качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок; рационального распределения электроприводов тянущих роликов вдоль технологического канала зоны вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ; технического диагностирования текущего состояния электроприводов тянущих роликов и точности выставки тянущих роликов вдоль технологической линии МНЛЗ как факторов негативного влияния на качество макроструктуры заготовок; проектирования автоматизированного электропривода ТПУ. Методики базируются на авторских математических моделях расчета: требуемых по технологии значений моментов нагрузки на тянущих роликах ТПУ с учетом усилия сопротивления вытягиванию слитка из кристаллизатора, усилий ферростатического давления на ролики, нормальной и тангенциальной составляющих силы тяжести слитка на криволинейном участке МНЛЗ, усилий давления на ролики от температурных поводов заготовки, усилий сопротивления вытягиванию выпученной корки заготовки и усилий давления затвердевшей заготовки на ролики горизонтального участка МНЛЗ; распределения статических продольных усилий, создаваемых в слитке электроприводом ТПУ в

процессе вытягивания заготовки из роликовой проводки МНЛЗ; динамических продольных усилий, создаваемых в слитке электроприводами тянущих роликов при периодических буксовках последних и в результате прогиба бочки тянущих роликов; динамической модели электропривода ТПУ с учетом упругой связи якорь электродвигателя – тянущий ролик, фрикционной связи тянущий ролик – слиток и взаимосвязи электроприводов тянущих роликов через кристаллизующийся слиток; параметров девяти диагностических функций (периодических и случайных буксовок электроприводов тянущих роликов, износа и прогиба бочки тянущих роликов, автоколебаний скорости литья заготовки, распределения статических и динамических продольных усилий вдоль технологического канала ЗВО, точности выставки роликовой проводки МНЛЗ, исправности редукторов линий привода); растягивающих продольных усилий, возникающих в слитке по малому радиусу от разгиба заготовки на криволинейном участке ЗВО.

Разработаны принципы построения и варианты реализации силовой части электропривода ТПУ, а также способы, системы и алгоритмы управления электроприводом, позволяющие непосредственно в ходе разливки металла:

- минимизировать растягивающие статические продольные усилия, создаваемые в кристаллизующемся слитке электроприводом ТПУ, посредством целесообразного перераспределения моментов нагрузки между электроприводами тянущих роликов;
- выполнить коррекцию числа рабочих электроприводов за счет исключения неисправных линий привода и приводов, не имеющих контакта со слитком;
- обеспечить неизменность скорости литья заготовки в процессе перераспределения моментов нагрузки по электродвигателям тянущих роликов и их группам;
- ограничить динамические продольные усилия в слитке за счет «мягкого» восстановления контакта тянущий ролик – слиток при буксовке и целесообразного управления электроприводом тянущего ролика с прогибом его бочки;
- стабилизировать скорость разливки в пределах $\pm 2\%$ от заданного значения при появлении гармонической составляющей в общем моменте сопротивления вытягиванию заготовки;
- выполнить по девяти диагностическим функциям диагностику текущего состояния тянущих роликов, контроля правильной выставки роликов вдоль технологиче-

ской оси ЗВО и исправности механического и электрического оборудования линий привода тянущих роликов.

Внедрение разработки на МНЛЗ № 2 ОАО «ММК» позволило:

- стабилизировать скорость разливки стали в пределах $\pm 2\%$ от заданного значения;

- снизить растягивающие статические продольные усилия в слитке с 600 до 50 кН;
- ограничить динамические продольные усилия в слитке со 100 до 10 кН;
- повысить коэффициент использования агрегата посредством сокращения времени проведения ремонтных работ за счет свое-

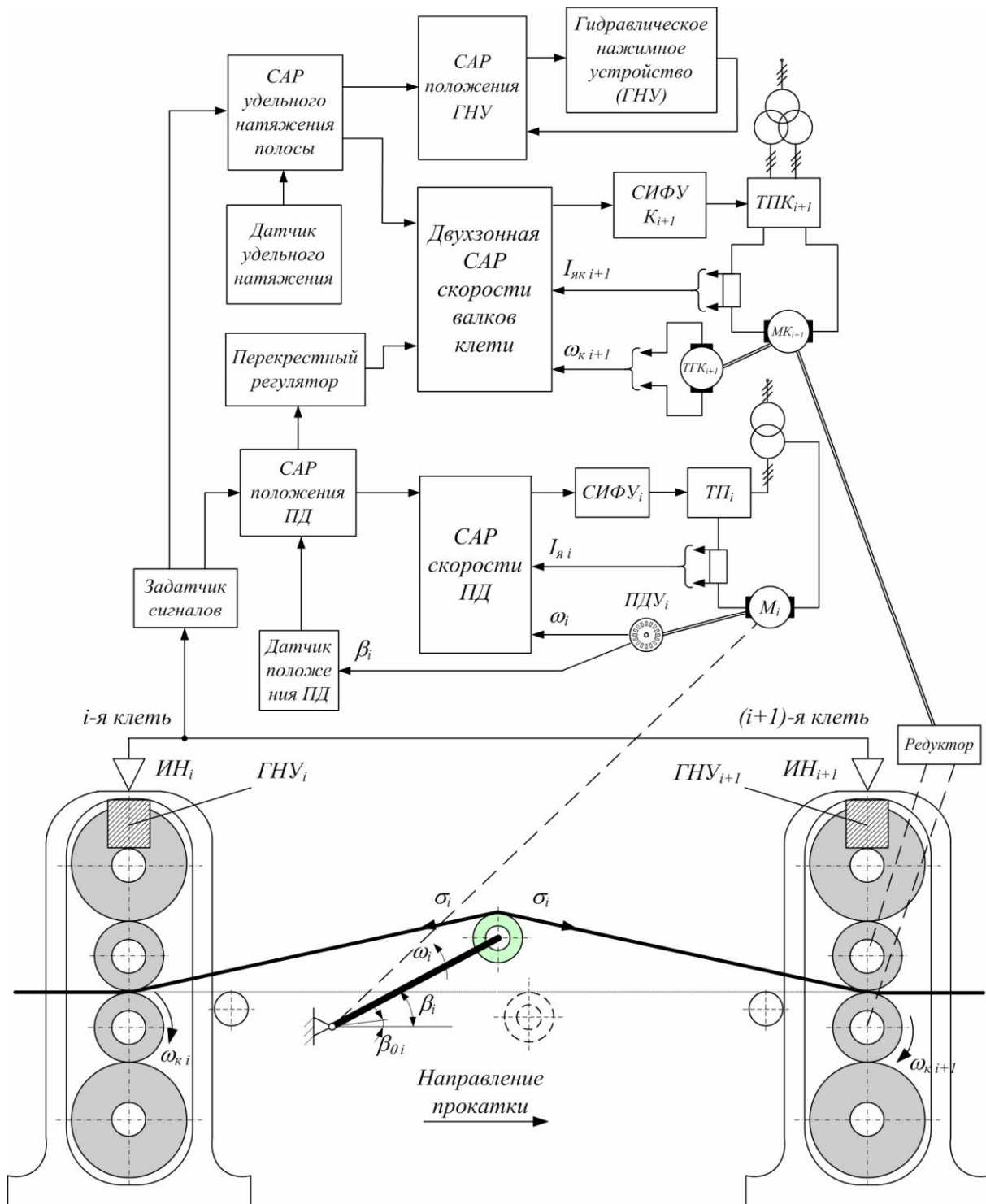


Рис. 6. Функциональная схема разработанной САРНИП с комбинированным воздействием

временной подготовки к их проведению в соответствии с информацией от системы технического диагностирования.

Совершенствование системы автоматического регулирования натяжения полосы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки.

В настоящее время научной группой, возглавляемой А.С. Карандаевым, проводятся исследования, направленные на создание высокودинамичных систем автоматического регулирования натяжения и высоты петли (САРНИП) широкополосных станов горячей прокатки. Практические разработки выполняются совместно со специалистами ЦЭТЛ ОАО «ММК» применительно к широкополосному стану горячей прокатки 2500.

Действующая САРНИП стана 2500, построенная по косвенному принципу, обеспечивает требуемую точность регулирования натяжения тонкой полосы лишь в установившихся технологических режимах. Значительное влияние на качество регулирования удельного натяжения в динамических режимах оказывают инерционность электромеханического петледержателя и инерционность прокатной клетки. Это не позволяет эффективно использовать ресурсы быстродействующей системы автоматического регулирования толщины полосы чистовой группы, выполненной на базе современных гидравлических нажимных устройств (НУ) [9].

Основным требованием к современной САРНИП при прокатке тонких полос является обеспечение удельных натяжений в диапазоне 0,5...17 Н/мм² во всех динамических режимах,

при этом допустимые отклонения могут составлять не более ±10%, разнотолщинность полосы не должна превышать 3,7%.

В результате совместных исследований специалистов Магнитогорского государственного технического университета и ОАО «ММК» разработана электромеханическая САРНИП с перекрестной внутренней связью, с контурами регулирования удельного натяжения, воздействующими как на скорость валков, так и на положение гидравлических НУ последующей клетки. Функциональная схема системы представлена на рис. 6.

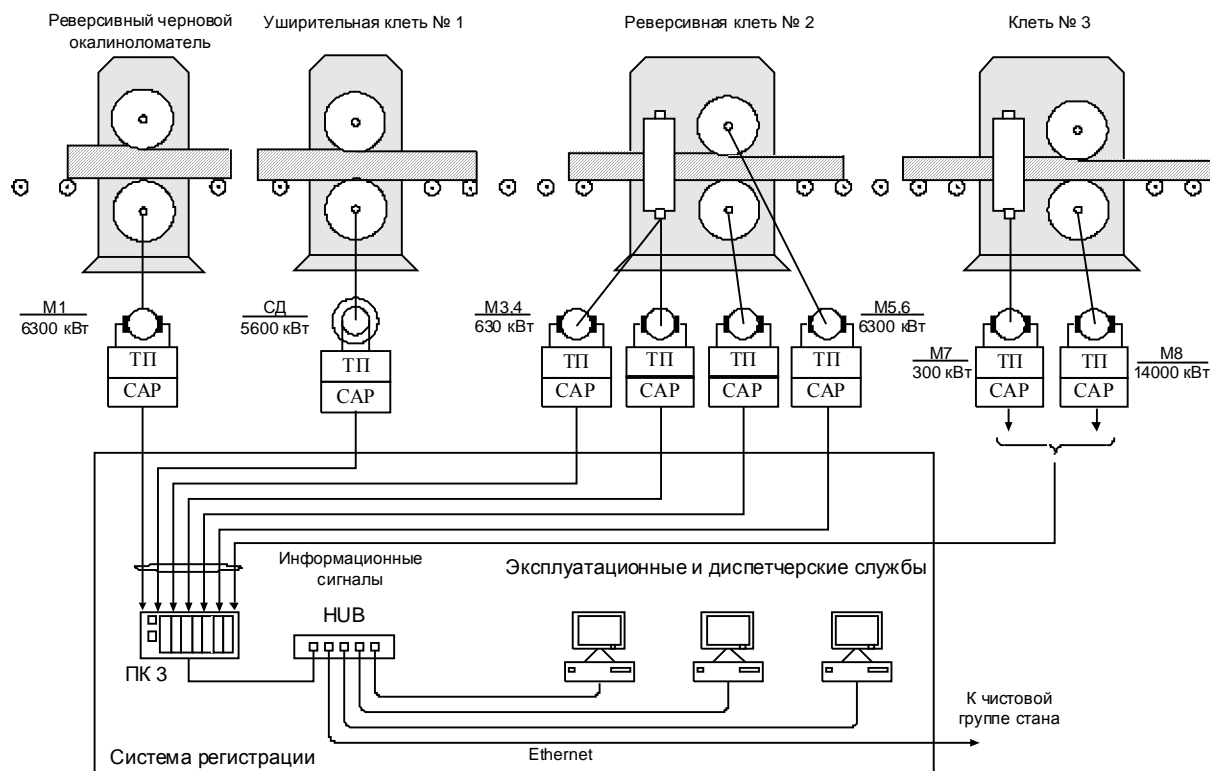
Разработка системы потребовала решения следующих задач [10]:

- разработка математической модели существующей САРНИП, включающей главные электроприводы клеток, электропривод петледержателя, гидравлический привод НУ с учетом их взаимосвязи через прокатываемый металл;
- разработка наиболее точной математической модели взаимосвязи удельного натяжения и толщины полосы;
- проведение теоретических и экспериментальных исследований действующей САРНИП с целью анализа динамических показателей, а также оценка адекватности разработанных моделей промышленному объекту;
- разработка функциональных и принципиальных схем комбинированной САРНИП с улучшенными показателями регулирования; разработка способа выделения сигнала удельного натяжения по параметрам электропривода петледержателя;

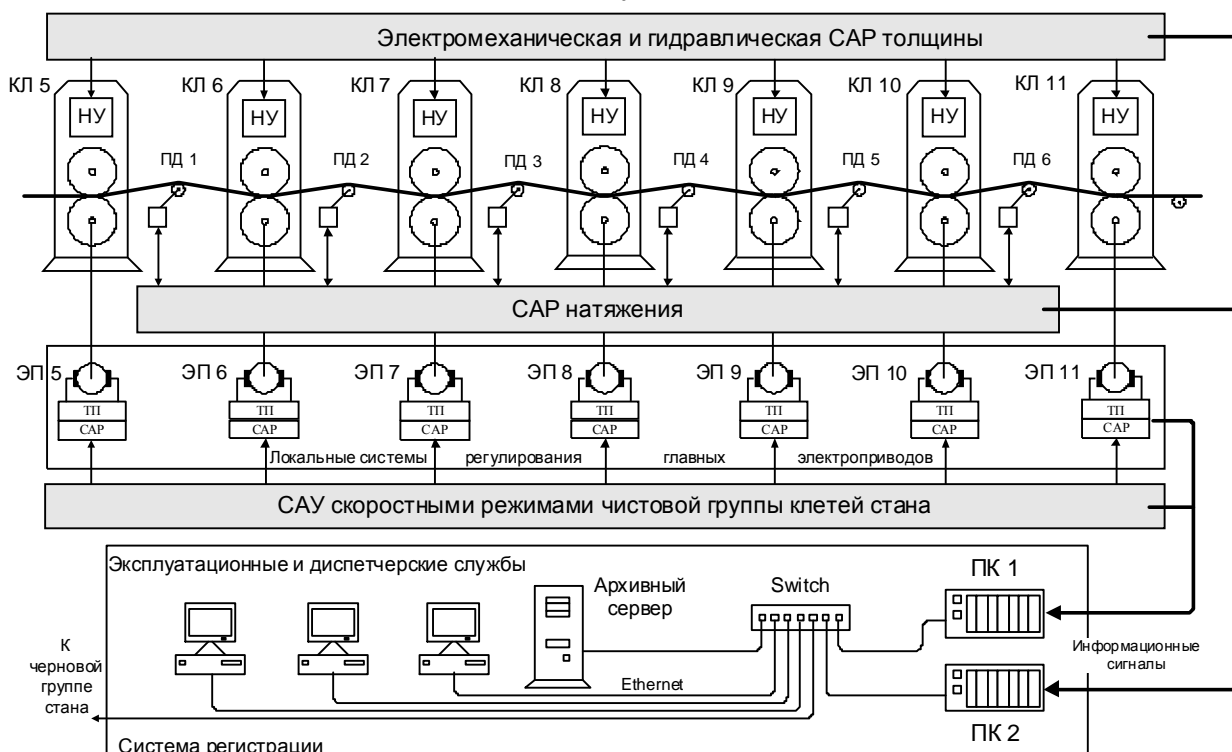
Таблица 1

Показатели регулирования для действующей и разработанной систем

| Технологический режим | Время регулирования удельного натяжения, с | | Перерегулирование, % | | | | | |
|--|--|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| | Действующая система стана 2500 | Предлагаемая комбинированная система | удельного натяжения | | угла петледержателя | | приращения толщины | |
| | | | Действующая система стана 2500 | Предлагаемая комбинированная система | Действующая система стана 2500 | Предлагаемая комбинированная система | Действующая система стана 2500 | Предлагаемая комбинированная система |
| Прокатка переднего конца полосы | 0,8–1,1 | 0,15–0,3 | 68–79 | 5–10 | 3–4,2 | 0,4–0,7 | 3,5–4,5 | 2–2,1 |
| Прокатка заднего конца полосы | 0,7–0,9 | – | 65–80 | 0,7–1,5 | 2,5–4 | 0,2–0,5 | 4–4,5 | 2,8–2,9 |
| Изменение задания положения петледержателя | 0,9–1,0 | – | 50–57 | 0,2–0,4 | 4–5 | 0,5–1 | 3,2–3,8 | 1,9–2,1 |
| Изменение межвалкового зазора последующей клетки | 0,4–0,6 | 0,15–0,2 | 25–32 | 7,5–9,3 | 3,2–5 | 0,2–0,4 | 3,6–3,9 | 3,0–3,2 |
| Изменение скорости последующей клетки | 0,6–0,8 | 0,14–0,2 | 22–29 | 6,4–9,8 | 3–4,2 | 0,3–0,46 | 3,5–3,7 | 3,1–3,2 |



а



б

Рис. 7. Главные электроприводы и системы автоматизации участка черновой (а) и чистовой (б) групп клетей стана 2500 с интегрированной структурой системы регистрации:
 ТП – тиристорные преобразователи; САР – системы автоматического регулирования электроприводов;
 ПК – промышленные компьютеры системы регистрации; КЛ5–КЛ11 – клетки чистовой группы стана;
 ЭП5–ЭП11 – главные электроприводы прокатных клетей; ПД1–ПД6 – петледержатели;
 НУ – нажимные устройства

– исследования разработанной комбинированной системы на математической модели, экспериментальных исследований и промышленного внедрения результатов.

Результаты сравнения показателей регулирования для действующей и предлагаемой САР-НиП в основных динамических режимах представлены в табл. 1.

Динамические отклонения удельного натяжения не выходят за требуемые пределы $\pm 10\%$, динамическая составляющая толщины полосы не превышает 3,2%. Применение в комбинированной системе перекрестного регулятора позволяет исключить влияние системы регулирования положения петледержателя на систему регулирования удельного натяжения.

По результатам выполненных разработок и исследований приняты следующие решения по реконструкции САР-НиП стана 2500 ОАО «ММК»:

- замена в трех последних межклетевых промежутках существующей САР-НиП на разработанную систему при сохранении установленного механического и силового электрического оборудования;
- техническое исполнение системы на базе внедряемых промышленных контроллеров.

Диагностика технического состояния электрооборудования электротехнических и энергетических комплексов (научный руководитель – канд. техн. наук, доц. Евдокимов С.А.).

Своевременное выявление и предупреждение возникновения неисправностей позволяют перейти от проведения традиционных планово-предупредительных ремонтов к практике ремонтов по техническому состоянию. Это требует оснащения сложных, энергоемких агрегатов (прокатных станов, промышленных печей, турбогенераторов и т.п.) современными средствами контроля и визуализации параметров технологического процесса и технического состояния оборудования. В настоящее время находятся в эксплуатации системы диагностирования автоматизированных электроприводов нескольких широкополосных станов горячей и холодной прокатки. В их числе система мониторинга технического состояния электроприводов шестиклетьевого стана 630 холодной прокатки [11]. Успешно эксплуатируется стационарная система регистрации и мониторинга параметров главных электроприводов широкополосного стана 2500 горячей прокатки. Функциональная схема узлов системы представлена на рис. 7 [12].

В процессе разработки данной системы решены следующие задачи:

- обоснованы и сформулированы требования к системе регистрации в соответствии с техническими характеристиками контролируемых объектов, определяющие эффективную скорость информационного потока;
- разработана общая структура системы регистрации параметров главных электроприводов и систем управления стана на базе четырех промышленных компьютеров, укомплектованных адаптерами ввода аналоговых и дискретных сигналов;
- определены оптимальный аппаратный состав и операционные характеристики промышленных компьютеров в составе системы;
- разработана децентрализованная сетевая топология, реализованная в машинном зале № 1 ЛПЦ-4;
- разработано специализированное программное обеспечение, основными модулями которого являются программа «Клиент реального времени», обеспечивающая непрерывную визуализацию на мониторах осциллограмм работы электрооборудования в реальном времени, программа «Клиент архивный», позволяющая просматривать ранее записанную информацию в виде непрерывной виртуальной ленты с глубиной хранения до двух месяцев (либо информацию за заданный интервал времени с возможностью выбора количества отображаемых сигналов). Кроме того, программное обеспечение включает серверную часть и непосредственно архив.

Наряду с рассмотренной стационарной системой разработан переносной вариант компьютерного регистратора сигналов (ПКР), общий вид которого представлен на рис. 8 [13].

Аппаратная часть ПКР включает в себя компактный системный блок промышленного компь-



Рис. 8. Переносной компьютерный регистратор

Таблица 2

Основные технические характеристики ПКР

| | |
|---|---|
| Системные параметры промышленного компьютера | CPU Pentium III 1000 МГц, ОЗУ DIMM PC-133 512 Мб, HDD UDMA100 80 Гб, Ethernet 100 Мбит/с |
| Количество каналов аналогового ввода | 16 каналов с диапазоном напряжений от $\pm 0,1В$ до $\pm 10В$ |
| Частота оцифровки аналоговых сигналов | до 100 кГц на 16 каналов, устанавливается программно |
| Количество каналов дискретного ввода | 24 канала с входным напряжением от 0 до 24 В |
| Полоса пропускания каналов дискретного ввода | до 1 кГц |
| Время непрерывной записи параметров в архивную базу данных при объеме HDD 80 Гб | до 30 суток |

ютера, оснащенного многоканальными адаптерами ввода аналоговых и дискретных сигналов, а также блок нормализации и гальванического разделения регистрируемых сигналов. Блок обеспечивает гальваническую изоляцию как между входными и выходными цепями, так и между каналами, что полностью исключает электрическое влияние входных цепей ПКР на работу систем автоматизации исследуемого объекта (табл. 2).

В настоящее время ведутся работы по применению разработанных регистраторов для диагностирования технического состояния мощного энергетического оборудования. Кроме того, портативные регистраторы успешно эксплуатируются при ремонтах и пуско-наладочных работах.

Применение информационных технологий в области технического обслуживания обеспечивает повышение экономической эффективности производства за счет сокращения количества аварий и продолжительности простоев, а также снижения затрат на планово-предупредительные ремонты.

Заключение

Исследования в области совершенствования автоматизированных электроприводов и систем управления технологических агрегатов проводятся всеми электротехническими кафедрами МГТУ при тесном сотрудничестве с подразделениями управления главного энергетика ОАО «ММК». Основные направления научных исследований связаны с энергосбережением, повышением качества продукции и интенсификацией производства и поэтому являются актуальными и востребованными.

Работы по улучшению энергетических характеристик синхронных и тиристорных электроприводов ведутся в направлении разработки новых способов автоматического регулирования возбуждения, реализация которых обеспечивает снижение потерь электрической энергии за счет схемных решений при минимальных капитальных затратах. Для асинхронных электроприводов с вентиляторной нагрузкой ведутся разработки непосредственных преобразователей частоты с программным формированием напряжения, обеспечивающих длительную работу на фиксированных пониженных ступенях частоты враще-

ния. Реализуется идея использования трансформаторов для создания высоковольтных трансформаторно-тиристорных пусковых устройств.

Не менее важным и успешно реализуемым направлением является создание и совершенствование автоматизированных электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров агрегатов литейного и прокатного производств. Исследования касаются машин непрерывного литья заготовок, главных электроприводов и систем автоматического регулирования натяжения непрерывных прокатных станов. Данное направление развивается в тесной взаимосвязи с решением актуальных задач компьютерного мониторинга и диагностики состояния электрооборудования технологических агрегатов.

По результатам исследований в перечисленных направлениях за истекшие пять лет сотрудниками МГТУ и ОАО «ММК» защищены четыре докторские и более пятнадцати кандидатских диссертаций. Выполнение совместных научно-технических разработок электротехнических кафедр университета и электротехнических служб комбината является взаимовыгодной формой сотрудничества, расширение которого способствует общему делу развития отечественного автоматизированного электропривода.

Библиографический список

1. Энергосбережение в электроприводах металлургического производства / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, В.В. Головин // Образование, наука, производство и управление в XXI веке: Сб. трудов Междунар. науч. конференции: В 4 т. / Под ред. В.Б. Крахта. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2004. Т. 2. С. 63–67.
2. Система векторного управления возбуждением синхронного двигателя / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, Г.В. Шурыгина и др. // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 2. С. 28–30.
3. Концепция построения электроприводов прокатных станов с двухзонным регулированием скорости и улучшенными энергетическими показателями / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.В. Головин и др. // Труды IV Международной (XV

- Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004). Ч. 2. Магнитогорск, 2004. С. 260–264.
4. Карандаев А.С., Радионов А.А., Головин В.В. Система двухзонного зависимого регулирования скорости в функции выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 2. С. 40–46.
 5. Сарваров А.С. Энергосберегающий электропривод вентиляторных механизмов по системе НПЧ-АД с программным формированием напряжения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ, 2002. 36 с.
 6. Сарваров А.С. Асинхронный электропривод на базе НПЧ с программным формированием напряжения: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 236 с.
 7. Лукьянов С.И. Электропривод тянуще-правильного устройства МНПЗ: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 100 с.
 8. Селиванов И.А., Лукьянов Д.С. Исследование моментов нагрузки электроприводов тянущих роликов горизонтального участка машины непрерывного литья заготовок // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 2. С. 53–57.
 9. Система автоматического регулирования натяжения и высоты петли с перекрестными связями для широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Чертоусов // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 2. С. 21–27.
 10. Совершенствование системы автоматического регулирования натяжения полосы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Чертоусов и др. // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., 20–22 октября 2005 г. Томск: ТПУ, 2005. С. 293–296.
 11. Компьютерная система регистрации параметров и диагностики технического состояния электрооборудования и систем автоматизации широкополосного стана горячей прокатки / С.А. Евдокимов, А.С. Карандаев, А.А. Чертоусов и др. // Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сборник статей. Ч. I: Общие вопросы электрических машин и трансформаторов. Машинно-вентильные системы. Вопросы диагностики. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. № 5 (25). С. 428–431.
 12. Система технического мониторинга автоматизированных электроприводов широкополосного стана горячей прокатки / С.А. Евдокимов, А.С. Карандаев, А.Л. Колцев и др. // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 2. С. 31–39.
 13. Новые информационные технологии для технического обслуживания и диагностирования электроприводов технологических агрегатов / С.А. Евдокимов, К.Э. Одинцов, В.Б. Славгородский // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004). Ч. 1. Магнитогорск, 2004. С. 258–264.

УДК 621.314.001.5

В.В. Головин

АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЗАПАСА ВЫПРЯМЛЕННОЙ ЭДС ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КЛЕТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Надежная, безаварийная работа электропривода (ЭП) может быть обеспечена лишь в том случае, если будут обеспечены динамический запас системы регулирования и, в первую очередь, запас выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя (ТП), определяемый как разность между выпрямленной ЭДС при нулевом угле управления и значением выпрямленной ЭДС в установившемся режиме работы при максимальной статической нагрузке.

Следствием ударного увеличения нагрузки электропривода, происходящем при захвате металла валками, является снижение его скорости. Скорейшее восстановление скоростного режима имеет для непрерывных станов важное значение в связи с необходимостью поддержания постоянства секундного объема металла, проходящего через каждую клеть. Время восстановления скорости зависит от темпа нарастания тока, так как он определяет динамический момент двигателя.

При настройке двухконтурной автоматической системы регулирования (АСР) скорости на модульный оптимум максимальная производная тока якоря при ударном приложении нагрузки определяется зависимостью [1]:

$$\left(\frac{di}{dT} \right)_{\max} = \frac{I}{1,4T_T \cdot a}.$$

При настройке на симметричный оптимум

$$\left(\frac{di}{dT} \right)_{\max} = \frac{I}{1,05T_T \cdot a},$$

где I – ток статической нагрузки; T_T – постоянная времени контура тока; a – отношение постоянных времени контуров скорости и тока.

Производная $\left(\frac{di}{dT} \right)_{\max}$, наряду с максимальным током статической нагрузки I_{\max} , определяет

величину максимальной выпрямленной ЭДС ТП в динамическом режиме, согласно уравнению равновесия якорной цепи:

$$E_{d \max} = E + I_{\max} R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \left(\frac{di}{dT} \right)_{\max},$$

где E – ЭДС электродвигателя; L_{Σ} – эквивалентная индуктивность цепи выпрямленного тока.

В подтверждение сказанному на рис. 1 представлены осциллограммы обработки ударного приложения нагрузки электроприводом клетки

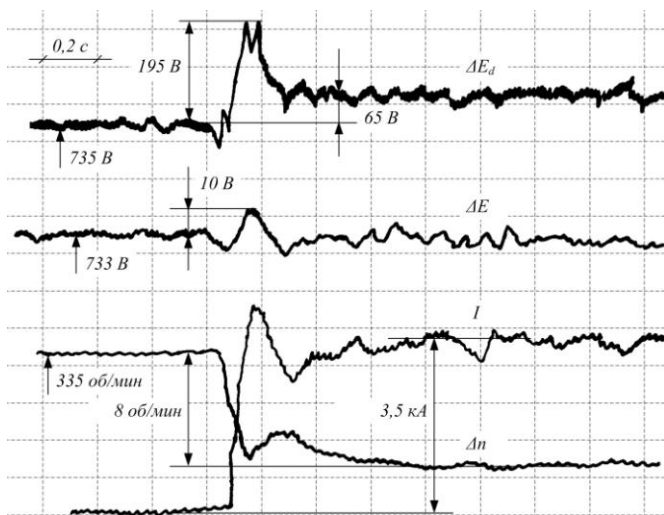


Рис. 1. Переходные процессы электропривода клетки прокатного стана при ударном приложении нагрузки: ΔE , Δn , ΔE_d – приращения ЭДС, скорости двигателя и выпрямленной ЭДС ТП соответственно

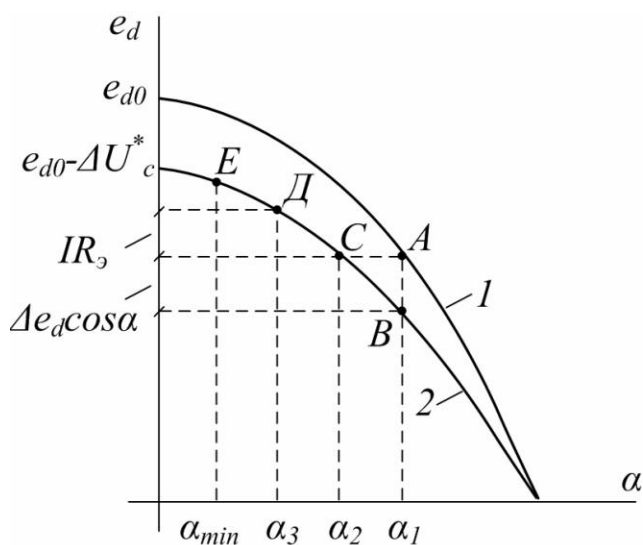


Рис. 2. Статические регулировочные характеристики ТП в замкнутой системе автоматического регулирования скорости

широкополосного стана горячей прокатки [2]. Система регулирования скорости ЭП настроена на модульный оптимум. Превышение выпрямленной ЭДС ТП своего установившегося значения составляет 16%.

Вторым условием, определяющим величину запаса, являются отклонения напряжения питающей сети. Для пояснения этого на рис. 2 представлены арккосинусоидальные статические регулировочные характеристики ТП при номинальном (кривая 1) и пониженном (кривая 2) подводимых напряжениях [3].

При снижении напряжения сети выпрямленная ЭДС ТП уменьшается на величину

$$\Delta U_c^* = k_{CX} \Delta U_c / k_{TP}$$

где ΔU_c^* – отклонение напряжения сети, приведенное к выпрямленному напряжению ТП; k_{CX} и k_{TP} – коэффициенты схемы выпрямления ТП и трансформации преобразовательного трансформатора соответственно.

Рабочая точка преобразователя, занимавшая в режиме холостого хода положение А, переместится вместе со статической характеристикой и окажется в положении В. Однако при обработке задания на угловую скорость в замкнутой системе ЭП она переместится в точку С, соответствующую заданному значению ЭДС ТП. При появлении нагрузки на валу двигателя за счет действия АСР скорости она переместится в точку Д. Это соответствует изменению угла управления ТП от значения α_1 до α_2 , а затем до α_3 . При недостаточном запасе выпрямленной ЭДС ТП может возникнуть ситуация, при которой точка Д должна находиться левее точки Е, соответствующей минимальному углу регулирования α_{\min} . При этом происходит размыкание контура регулирования скорости, что в условиях непрерывной прокатки недопустимо.

На рис. 3 представлены осциллограммы токов нагрузки электроприводов 8-й и 10-й клетей чистой группы широкополосного стана 2500 горячей прокатки и отклонений напряжения секции шин 10 кВ. В моменты времени t_1 , t_2 происходит захват металла валками клетей, сопровождающийся ударным увеличением тока нагрузки и практически ступенчатым снижением напряжения сети (соответственно на 2 и на 1,5%). В результате экспериментов установлено, что после захвата металла последней клетью при максимальной нагрузке ЭП уровень напряжения снижается на 5–7%.

На рис. 4 показаны отклонения напряжения сети, полученные при прокатке трех полос, не

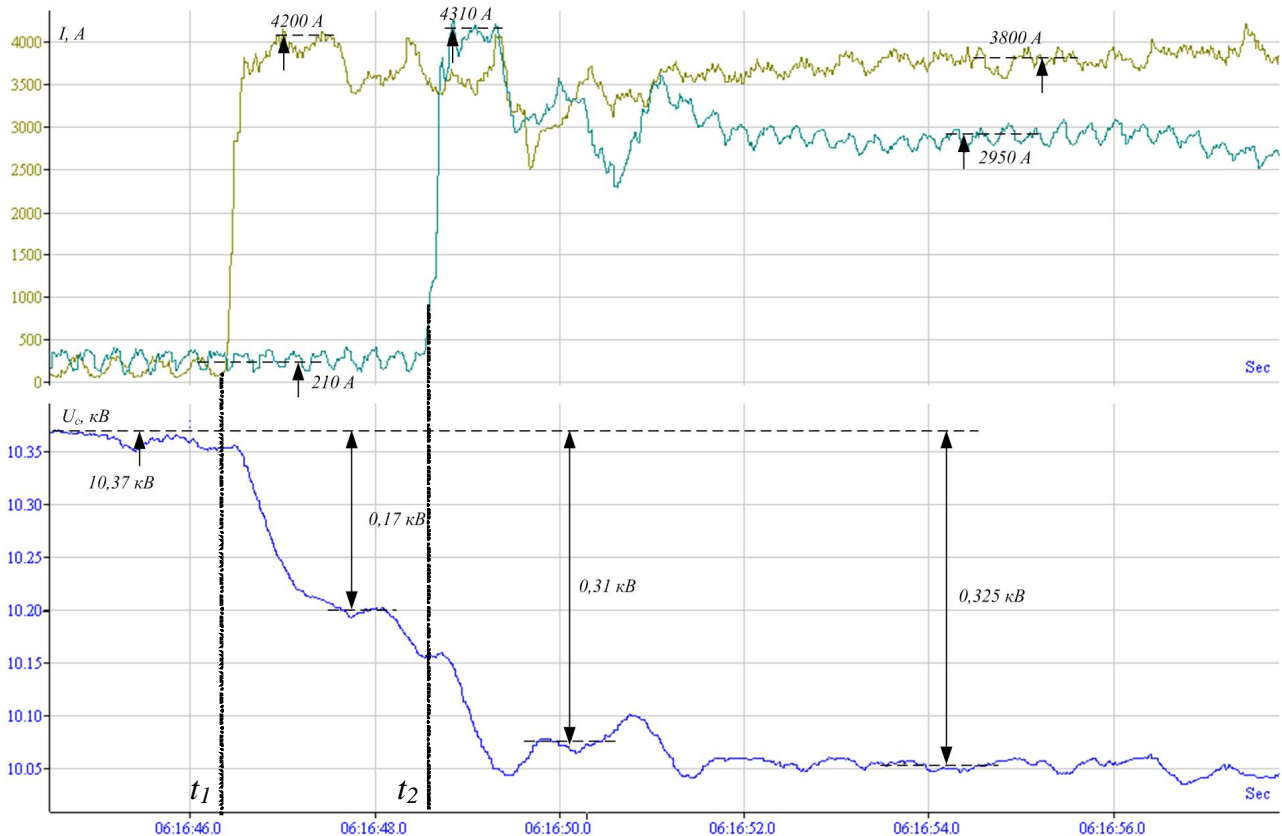


Рис. 3. Отклонения напряжения сети, вызванные нагрузкой ЭП клеток чистой группы

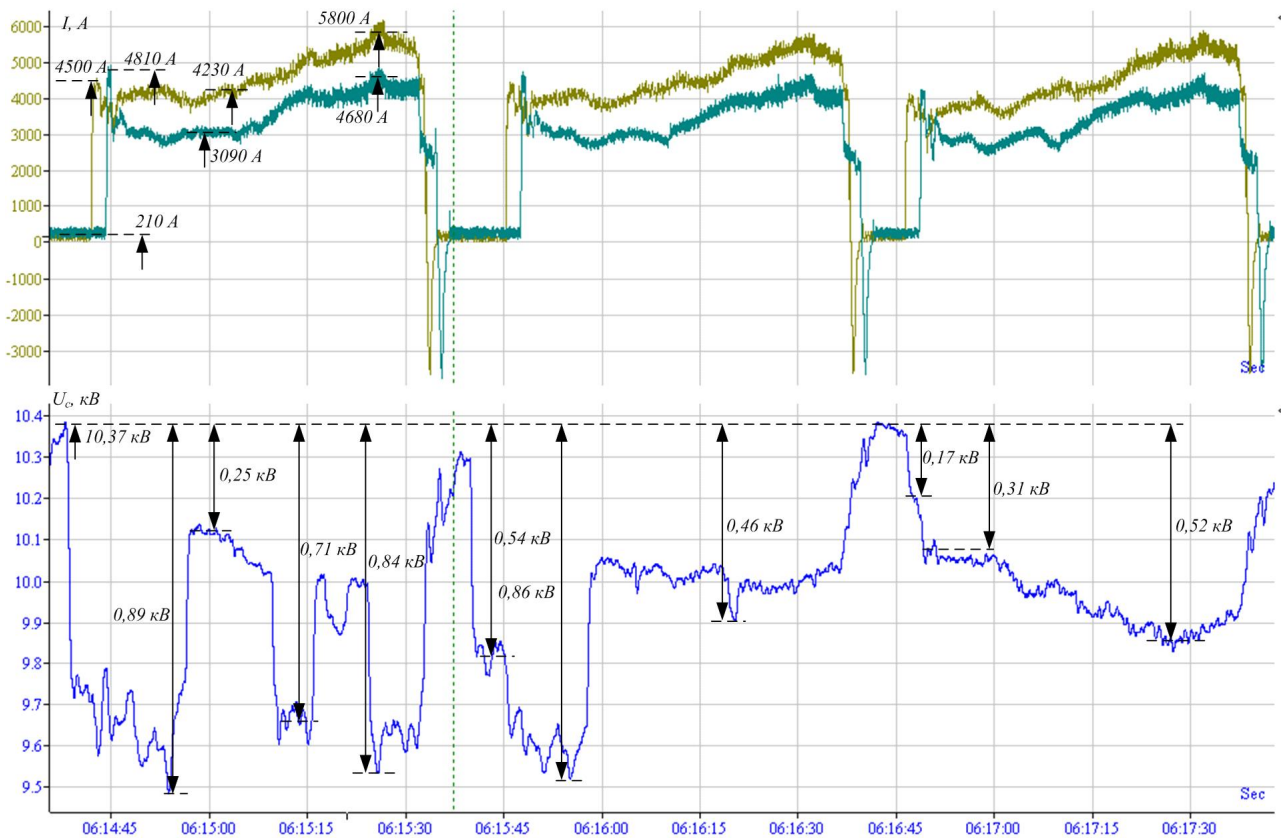


Рис. 4. Отклонения напряжения сети, не связанные с нагрузкой ЭП

связанные с нагрузкой электроприводов клетей. Такие отклонения вызваны нагрузкой других потребителей, подключенных к той же секции шин 10 кВ, и для ЭП исследуемых клетей являются случайными. Видно, что их уровень достигает значительных величин (5–7,5% номинального значения).

Приведенные осциллограммы подтверждают известные из литературы сведения о том, что отклонения напряжения сети, питающей ЭП станов горячей прокатки, достигают 10–12% в сторону уменьшения и должны учитываться при расчете запаса ТП по напряжению.

На рис. 5 представлены диаграммы, характеризующие распределение запаса выпрямленной ЭДС, необходимого для безаварийной отработки ударного приложения нагрузки главным ЭП клетки чистовой группы стана 2000 [4]. Выделены следующие составляющие:

1. Падение напряжения на активном сопротивлении R_{Σ} цепи выпрямленного тока ($I_{max}R_{\Sigma}$).
2. Запас ΔU_{dmax} на динамическое приращение выпрямленной ЭДС преобразователя при увеличении нагрузки (падение напряжения на индуктивном сопротивлении L_{Σ} цепи выпрямленного тока).
3. Составляющая ΔU_C^* , связанная с отклонениями на напряжения питающей сети.
4. Составляющая $E_{d0}(1 - \alpha_{min})$, определяемая ограничением минимального угла регулирования α_{min} .

Из диаграммы следует, что величина запаса составляет 23,6% максимальной выпрямленной ЭДС ТП или 27,1% номинального выпрямленного напряжения. Данный запас определяет уровень бесполезно циркулирующей в сети реактивной мощности, которая вызывает дополнительные потери электрической энергии.

В таблице представлены результаты расчета потерь мощности для чистовых клетей стана 2000 при номинальных токах нагрузки. Реактивная

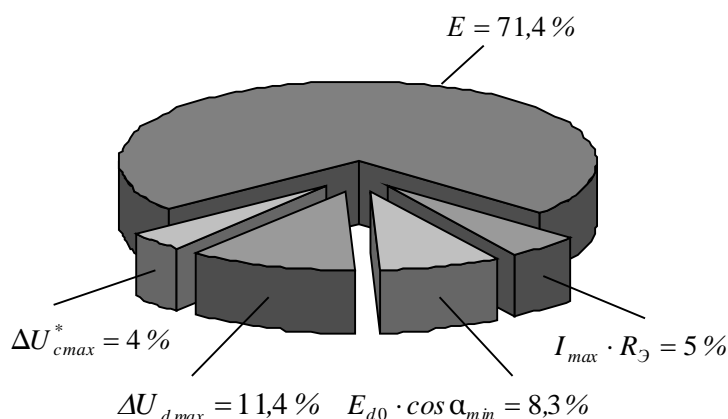


Рис. 5. Составляющие запаса выпрямленной ЭДС электропривода клетки стана 2000

мощность Q по клетям посчитана по зависимости

$$Q = I_d \sqrt{E_{d0}^2 - E_d^2},$$

где E_{d0} – максимальная выпрямленная ЭДС при нулевом угле управления.

Потери мощности вычислялись по зависимости [5]:

$$\Delta P_Q = K_{ИП} Q,$$

где $K_{ИП}$ – коэффициент изменения потерь (кВт/квар), задается предприятию энергосистемой или принимается по справочным данным.

Величина $K_{ИП}$ изменяется от 0,02 до 0,25 кВт/квар и зависит от удаленности предприятия от источника питания. Наименьшее значение коэффициента приведено для трансформаторов, присоединенных непосредственно к шинам станции. В соответствии с рекомендациями [5] величина $K_{ИП}$ при расчетах принята равной 0,12 кВт/квар.

Годовые потери электрической энергии, связанные с потреблением реактивной мощности, рассчитаны по зависимости

$$W_{Qi} = K_{вкл} T_{год} P_{Qi},$$

Расчетные потери при номинальных токах нагрузки

| Параметр | Значения по клетям чистовой группы стана 2000 г/п | | | | | | |
|---------------------------|---|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Тип двигателя | 2МП114200 50У3 | 2МП114200 50У4 | 2МП114200 125У4 | 2МП114200 125У4 | 2МП114200 200У3 | 2МП114200 200У3 | 2МП11200 300У3 |
| Номинальная мощность, кВт | 2×6300 | 2×6300 | 2×7100 | 2×7100 | 2×7100 | 2×7100 | 2×7100 |
| I_{di} , А | 16200 | 16300 | 16050 | 15600 | 14950 | 13700 | 12100 |
| Q_i , Мвар | 9,33 | 9,41 | 9,22 | 9,88 | 9,39 | 8,43 | 7,22 |
| P_{Qi} , кВт | 1200 | 1130 | 1100 | 1186 | 1127 | 1012 | 866 |
| W_{Qi} , млн кВт·ч | 7,56 | 7,12 | 6,93 | 7,47 | 7,1 | 6,38 | 5,46 |

где $K_{вкл} = \frac{T_{ц}}{T_{нагр}}$ – коэффициент включения;

$T_{ц}$ – время цикла прокатки; $T_{нагр}$ – время работы под нагрузкой за цикл; $T_{год}$ – среднегодовое число часов работы под нагрузкой.

При $T_{год}=7000$ часов в год суммарные потери электрической энергии составляют

$$W_{\Sigma} = \sum_7^{13} W_{Qi} = 48 \text{ млн кВт}\cdot\text{ч/год.}$$

В подтверждение достоверности приведенных результатов выполнен расчет реактивной мощности, потребляемой электроприводом седьмой клетки (первая клетка чистой группы). Установленная мощность двигателя $P_{7кл}=12,6$ МВт. При среднем взвешенном значении $\cos \varphi=0,82$

$$S_{7кл} = \frac{P_{7кл}}{\cos \varphi} = 15,37 \text{ МВА;}$$

$$\sin \varphi = 0,57 ;$$

$$Q_{7кл} = S_{7кл} \cdot \sin \varphi = 8,76 \text{ Мвар.}$$

Расхождение значений, посчитанных двумя способами, составляет 6,1%.

Анализ известных способов улучшения энергетических показателей показал, что в большинстве случаев такое улучшение обеспечивается за

счет существенного снижения быстродействия, т.е. за счет ухудшения динамических свойств ЭП. Такой путь для электроприводов станов горячей прокатки не может быть приемлемым.

Тиристорные ЭП клетей прокатных станов выполняются, как правило, с двухзонным регулированием скорости (ДЗРС). В связи с этим возникла задача разработки новых систем ДЗРС, применение которых позволяет уменьшить запас выпрямленной ЭДС ТП, но сохранить при этом требуемые высокие динамические свойства и показатели надежности электропривода. Были разработаны зависящая система в функции выпрямленной ЭДС ТП [6], система с автоматическим изменением задания ЭДС [4], а также системы ДЗРС с переключением координаты, регулируемой по цепи возбуждения [7, 8]. В [9] дана оценка эффективности применения последней системы в электроприводах клетей стана 2000. Определено расчетное снижение потерь мощности и электроэнергии в электроприводах клетей чистой группы, составляющее не менее 7% или 2,9 млн кВт ч/год.

Исследования разработанных систем методами математического моделирования, а также промышленные испытания системы с переключающейся структурой на действующем прокатном стане подтвердили работоспособность и высокую эффективность их применения.

Библиографический список

1. Неймарк В.Е. Методика определения динамического запаса напряжения систем стабилизации скорости электроприводов постоянного тока // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. 1971. № 7. – С. 15–16.
2. Карандаев А.С., Кузнецов И.Ю. Сравнительный анализ энергетических характеристик тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости // Энергосбережение на промышленных предприятиях: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, 1997. С. 126–132.
3. Волков В.Т., Левинтов С.Д. Оценка динамических показателей вентильного электропривода со случайными параметрами // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Челябинск: ЧПИ, 1976. С. 148–153.
4. Концепция построения электроприводов прокатных станов с двухзонным регулированием скорости и улучшенными энергетическими показателями / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.В. Головин и др. // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004). Ч. 2. Магнитогорск, 2004. С. 260–264.
5. Федоров А.А., Ристхейн Э.М. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Энергия, 1981. 360 с.
6. Карандаев А.С., Радионов А.А., Головин В.В. Система двухзонного зависимого регулирования скорости в функции выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 2. С. 40–46.
7. Головин В.В. Система двухзонного регулирования скорости тиристорного электропривода с переключением регулируемой координаты по цепи возбуждения // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. трудов. Магнитогорск: МТУ, 2006. Вып. 13. С. 22–30.
8. Головин В.В. Разработка тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с переключающейся структурой // Материалы 64-й НТК по итогам научно-исследовательских работ за 2004–2005 гг.: Сб. докл. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. Т. 2. С. 92–95.
9. Головин В.В. Анализ эффективности внедрения системы двухзонного регулирования скорости с переключающейся структурой в электроприводах стана 2000 ОАО «ММК» // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. трудов. Магнитогорск: МТУ, 2006. Вып. 12. С. 61–67.

УДК 62-83.001.76:669.1

П.В. Шиляев, В.В. Головин, А.В. Косенков

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ В ХОДЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ОАО «ММК»

Коренная реконструкция, внедрение современных технологических решений вывели ОАО «ММК» на ведущие позиции среди самых современных предприятий мировой металлургии. Несомненно, что долговременное удержание лидирующих позиций невозможно без современного уровня оснащения производства и постоянного внимания к вопросам его модернизации. Программа реконструкции и технического перевооружения реализуется по нескольким направлениям: модернизация существующих цехов и отдельных агрегатов, полная замена морально и физически устаревших производств, ввод в эксплуатацию принципиально новых технологических комплексов. Все это приводит к коренным изменениям в структуре применяемого электрооборудования.

За период с 2001 по 2005 гг. произведена модернизация действующего оборудования и введены в строй новые технологические объекты в кислородно-конвертерном цехе (ККЦ), цехе покрытий, листопрокатных цехах (ЛПЦ) и других подразделениях ОАО «ММК» [1].

В 2004 году закончилась *реконструкция электроприводов чистой группы стана 2500 ЛПЦ-4*. Были выполнены модернизация тиристорных преобразователей главных электроприводов клеток и полная либо частичная замена приводов всех вспомогательных механизмов (моталок, линеек, манипуляторов и др.).

Основными целями реконструкции явились [2]:

- повышение надежности работы электроприводов;
- уменьшение времени обслуживания оборудования, поиска неисправностей;
- наиболее полная и прозрачная интеграция их в новую систему автоматизации всей чистой группы стана;
- организация системы постоянного сбора данных о протекании технологических процессов и состоянии оборудования.

Были реконструированы:

- 7 преобразователей главных приводов чистой группы (плюс один резервный);
- 14 преобразователей нажимных винтов чистой группы (плюс два резервных);
- 6 преобразователей приводов петледержателей (плюс один резервный);

- 6 преобразователей приводов межклетевых линеек-манипуляторов (плюс один резервный).

Для выполнения вышеуказанных задач было решено провести реконструкцию тиристорных преобразователей электроприводов на базе цифровых модулей Simoreg фирмы Siemens, уже широко применяющихся в ОАО «ММК» при строительстве новых агрегатов и технологической реконструкции существующих.

Основным отличием, новизной данного проекта явились необходимость переделки уже существующих преобразователей большой мощности и проведение реконструкции без остановки производства. В этих условиях логичной оказалась разбивка реконструкции на два этапа. На первом этапе была осуществлена модернизация собственно тиристорного преобразователя с сохранением всех старых внешних связей, с управлением по прежним схемам и выдачей информации в существующие устройства отображения. По окончании первого этапа фактически был введен в действие полностью модернизированный индивидуальный электропривод. Такая «оцифровка» уже обеспечивает повышение надежности работы электропривода, упрощает обслуживание и диагностику оборудования. На втором этапе произведена передача управления и обмена информацией с новой системой автоматизации стана в цифровую локальную сеть Profibus DP. Завершающим этапом модернизации явилась интеграция электроприводов в АСУ ТП стана.

В ходе технико-экономического анализа было принято решение о проведении полной замены преобразователей малой и средней мощности (линеек и петледержателей) и модернизации системы управления с «привязкой» к существующей силовой части преобразователей большой мощности (главные электроприводы клеток и приводы нажимных устройств).

Реконструкция в условиях действующего цеха, без остановки и снижения производства означала, что окончательная наладка и ввод в работу модернизированных электроприводов каждой клетки должны быть проведены в регламентные ремонты (24- и 32-часовые ремонты стана). На монтажные, проверочные и предварительные наладочные ра-

боты предоставлялось 5–7 дней, непосредственно перед ремонтом, когда реконструируемый электропривод работает от резервного тиристорного преобразователя.

В результате первый этап реконструкции действующих электроприводов чистовой группы был проведен за восемь месяцев, с сентября 2003 года по май 2004 года. За это время в условиях действующего производства были реконструированы более тридцати преобразователей.

После модернизации электроприводов стана 2500 количество отказов только по главным приводам чистовой группы за пять месяцев работы снизилось в 3 раза – с 34 до 12 за аналогичный период, и это при том условии, что на модернизированных преобразователях не была закончена режимная наладка, когда большинство отказов было связано с выявлением недостатков монтажа и наладки.

В июле 2002 года *пущен в эксплуатацию реверсивный стан холодной прокатки* с годовой производительностью 800 тыс. т холоднокатаного листа. Генеральным подрядчиком была машиностроительная компания SMS Demag (Германия), а субподрядчиком – германская фирма Siemens, установившая уникальное электронное оборудование. Стан фирмы SMS Demag – первый стан холодной прокатки в ОАО “ММК”, оснащенный всеми современными системами, необходимыми для получения высококачественного холоднокатаного листа: системой осевой сдвижки рабочих валков, системой автоматического контроля плоскостности и геометрии полосы, плавающими моталками, системами гидроизгиба и зонного охлаждения рабочих валков, современными перевалочными машинами и устройствами обвязки рулонов. Новый комплекс систем автоматического регулирования толщины и натяжения (САРТиН), управления режимами стана (СУРС), управления гидронажимными устройствами (СУ ГНУ) выполнен на контроллерах Simadyn D фирмы Siemens, специально предназначенных для создания высокодинамичных систем управления электро- и гидроприводами.

Крупными проектами 2001–2003 годов были *АСУ ТП агрегатов отделки полосы ЛПЦ-5*. В проектах применены электроприводы постоянного тока на базе тиристорных преобразователей с цифровым управлением с применением модулей управления Simoreg CM фирмы Siemens. Регулируемые электроприводы переменного тока выполнены на базе Simovert Master Drive и Micromaster 440 той же фирмы [3].

На агрегатах продольной резки (АПР) установлено 18 регулируемых электроприводов по-

стоянного тока и 5 приводов переменного тока. На каждой из хвостовых частей непрерывных травильных агрегатов (НТА-1, 2) установлено 7 регулируемых приводов постоянного тока и 2 регулируемых привода переменного тока. На каждом из агрегатов АПР – 4, 5 установлено 8 регулируемых приводов постоянного тока.

АСУ ТП каждого объекта является двухуровневой системой с использованием децентрализованной периферии. Первый уровень – базовый уровень управления, второй – информационный (система визуализации, диагностики и контроля). Кроме того, со второго уровня осуществляется связь агрегатов с цеховыми АСУ. Ведущим элементом систем является контроллер Simatic S7-400 с центральным процессором CPU-414 и коммуникационными модулями. В системах широко используется обмен информацией с применением сетевых связей фирмы Siemens: Profibus-DP, MPI, промышленный Ethernet, сеть USS.

В проектах использована децентрализация управления посредством станций ET200M, которые установлены в шкафах связи с гидро- и пневмоприводами, нерегулируемыми электроприводами, датчиками на механизмах и в пультах управления.

Локальные системы смазки, насосные аккумуляторные станции (НАС), системы центрирования полосы и следящие системы моталок выполнены на контроллерах S7-300 с центральным процессором CPU-315, связанных с ведущим контроллером по сети MPI.

Для визуализации технологических процессов и диагностики работы оборудования агрегаты оснащены АРМами оператора, технолога, электрика, связанными с ведущим контроллером по сети Industrial Ethernet.

Для программирования АСУ ТП применено следующее системное программное обеспечение фирмы Siemens:

- программный пакет Step7 V5.1 – для программирования контроллеров Siemens S7-400, Simatic S7-300;
- комплексный пакет WinCC V5.0 и InTouch – для реализации задач визуализации;
- программа Simovis – для параметрирования управляющих модулей Simoreg;
- пакеты PDA-Bundle и IBA Analyzer фирмы IBA GmbH, NL West для записи аналоговых и дискретных сигналов;
- при параметрировании систем управления на наиболее сложных электроприводах использованы опции свободного программирования Simoreg.

Спроектированная АСУ ТП на АПР-4, 5 и 8 позволила получить точность подрезки кромки

не ниже +1 мм и телескопичность смотки рулонов не более 1 мм. Точность подрезки кромки с управляемой системой центрирования полосы на НТА-1, 2 составила +2 мм, а телескопичность смотки рулонов со следящими системами моталок не более 5 мм.

В 2004 году была произведена **полная реконструкция непрерывного травильного агрегата НТА-1 и реконструкция технологической части НТА-2** ЛПЦ-5. В процессе реконструкции были заменены ванны травления на более современные турбулентного типа немецкой фирмы "UVK" с использованием соляной кислоты. На НТА-1 все электроприводы постоянного тока заменены на наиболее надежные в эксплуатации приводы переменного тока с частотным управлением. Это позволило увеличить скорость движения полосы во входной части до 800 м/мин. АСУ ТП является также двухуровневой системой с использованием децентрализованной периферии. Внедрение современной системы управления и контроля на основе микропроцессорной техники позволило объединить одиночные операции технологического процесса в автоматические последовательности, что позволило существенно сократить время на выполнение операций по задаче полосы в агрегат, контролировать все возможные технологические параметры в виде графиков, трендов и журналов, внедрить систему сопровождения полосы на агрегате.

Не менее важным событием стал **пуск в 2002 году агрегата непрерывного горячего цинкования** с годовой производительностью 500 тыс. т, который является логичным завершением технологического цикла "кислородно-конверторный цех – стан 2000 горячей прокатки – двухклетевой реверсивный стан холодной прокатки". С вводом этого агрегата Магнитогорский металлургический комбинат стал крупнейшим в России производителем оцинкованного стального автомобильного листа. Проект реализован совместно с итальянской фирмой "Danieli".

АСУ ТП агрегата непрерывного горячего цинкования выполняет следующий ряд функций:

- центрирование полосы;
- автоматическая загрузка рулона на размотыватель, управление размотывателем;
- управление смоткой полосы, разделением непрерывной полосы на отдельные рулоны;
- управление моталкой и съемом рулонов с моталки;
- управление обвязочной машиной;
- управление петлевыми накопителями, согласование скоростей входной и технологической секций, технологической и выходной секций;

- сопровождение сварного шва;
- управление сварочной машиной.

АСУ ТП машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) ККЦ предназначена для автоматизированного управления технологическим процессом непрерывной разливки стали и формирования мерных слябовых заготовок.

Основными целями модернизации системы явились:

- повышение качества и увеличение выпуска годного металла за счет оптимизации процесса разливки;
- сокращение расхода материалов и энерго-ресурсов;
- создание комфортных и безопасных условий деятельности персонала;
- минимизация отходов производства и загрязнения окружающей среды.

АСУ ТП МНЛЗ является системой агрегатного уровня, ее деятельность обеспечивается многокомпонентными взаимодействующими системами технического, информационного, программного и организационного обеспечения и построена как децентрализованная двухуровневая система, выполняющая информационные и управляющие функции. Уровень базовой автоматизации включает в себя локальные микропроцессорные системы, реализуемые на программируемых контроллерах, средствах визуализации процесса и архивирования. Уровень организационного управления реализует оптимальное управление по математическим моделям, планирование работы агрегатов, слежение за качеством продукции. Все происходящее на технологическом объекте архивируется в АСУ ТП с целью создания отчетных документов за определенный период времени. Базовая автоматизация выполняет следующие информационные и управляющие функции:

- контроль массы металла в стальковше;
- контроль температуры жидкого металла в проковше;
- слежение за прохождением слитка;
- контроль отклонений аварийных параметров и действий защит;
- контроль работы электрооборудования, систем смазки, гидравлики, механического оборудования;
- токовая диагностика;
- контроль и управление уровнями металла в проковше и кристаллизаторе;
- контроль и управление работой кристаллизатора;
- контроль теплового режима зоны вторичного охлаждения;
- контроль процесса порезки слитка;

- управление приводами роликов МНЛЗ;
- управление тепловыми режимами зоны вторичного охлаждения

и ряд других функций.

Производственный процесс, связанный с разливкой жидкого металла, предъявляет повышенные требования к электрооборудованию с точки зрения надежности и безопасности. Грамотно проработанные и внедренные идеи по автоматизации МНЛЗ сократили вмешательство человека в технологический процесс, тем самым максимально снизили влияние “человеческого фактора”. Автоматизированная система управления построена таким образом, чтобы обезопасить персонал, обеспечивающий процесс разливки (аварийное закрытие шибера стальной ковша и промковша). Управление процессом разливки осуществляется с помощью программируемых контроллеров SIMATIC фирмы SIEMENS со станциями удаленного ввода-вывода. В целях обеспечения надежности и защиты оборудования от исчезновения и снижения напряжения, питание устройств автоматизации осуществляется от источников бесперебойного питания фирмы MASTERGUARD.

В реконструкции машин при тесном сотрудничестве с производителем ОАО “Уралмаш” и “Дата-центр” учтен весь опыт работы цеха, родственных российских и зарубежных предприятий. *Автоматизация МНЛЗ мартеновского цеха* выполнена на современной промышленной базе с использованием оборудования ведущих фирм мира: SIEMENS, ABB, DANFOSS, LENZE, CONTROL TECHNIQUES и др.

Производство непрерывнолитых слэбов и блюмов за последние годы заметно возросло. Особый прогресс наметился с момента широкомасштабного внедрения высокоскоростной разливки в начале 1990-х годов. Такой прогресс в новой технологии разливки стал возможным во многом благодаря совершенствованию конструкции кристаллизатора, секции вторичного охлаждения и прочего оборудования. Помимо конструктивных новшеств реализовывались также и технологические решения с целью повышения скорости разливки без ухудшения качества продукции.

Технология M-EMS продемонстрировала весьма благоприятное воздействие на внутреннее качество отливаемой продукции, особенно наиболее востребованных марок стали. С этой точки зрения роль электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе является главенствующей в повышении производительности и улучшении качества продукции. Оно обеспечивает равномерность

затвердевания корки заготовки и смягчает негативное воздействие высоких скоростей разливки.

Как известно, разливка через стакан-дозатор требует более интенсивного перемешивания в зоне мениска для предупреждения образования пор, пузырей и захватывания шлака коркой заготовки. При использовании погружного стакана перемешивание в области мениска должно быть менее интенсивным во избежание разрушения смазки кристаллизатора, захватывания шлакообразующей смеси и эрозии самого погружного стакана. Эти особые условия потребовали внесения ряда модификаций в M-EMS системы, работающие на одной индукционной катушке.

Максимальная эффективность перемешивания и эксплуатационная гибкость могут достигаться лишь в условиях независимого управления интенсивностью перемешивания в области мениска и в остальных зонах кристаллизатора. Только такой контроль обеспечивает полную совместимость системы перемешивания с моделями разливки в открытый ручей и через погружной стакан. Двухкатушечная система M-EMS обеспечивает этот контроль.

Оборудование конвертера представляет собой большой и взаимосвязанный комплекс механизмов и датчиков, количество электроприводов превышает 200. На всех этапах реконструкции специалисты службы автоматизации ККЦ совместно с наладчиками участка (группа разработчиков), имея богатый опыт проектирования подобных систем, явились полноценными разработчиками идеологии, принципов управления и структуры АСУ ТП. Этой группой было разработано техническое задание для тендера на поставку оборудования, в результате которого контракт на поставку системы автоматизации выиграла австрийская фирма «VAI».

На этапе проектирования системы поиск и изучение новинок на рынке автоматизации управления электроприводами позволил применить для управления механизмами принципиально новые технические решения. Так, впервые на ММК для развязки слаботочных цепей контроллера и силовой части приводов было решено для сокращения затрат на монтажные работы и кабельную продукцию применить импортные малогабаритные реле и установить их внутри шкафов с модулями ET в непосредственной близости от модулей ввода-вывода. Это позволило избавиться от промежуточных панелей с развязывающими реле и подключить кабели цепей управления непосредственно в шкафах ET.

Для управления маломощными (до 5,5 кВт) асинхронными электроприводами впервые на

комбинате применены интеллектуальные силовые модули из серии ET200S. Модуль состоит из автоматического выключателя и реверсивного (или нереверсивного) пускателя с необходимыми обвязками, конструктивно объединёнными в одном каркасе. Модуль на разъёмах легко вставляется в шину ET и не требует никакой дополнительной обвязки, силовые кабели подключаются к шине. Преимущество данных модулей в том, что они легко заменяемы (без какой либо коммутации), компактны и управляются контроллером по шине данных, не требуя никакого дополнительного устройства управления.

Для мощных электроприводов, опять же впервые, применены программируемые модули управления, контроля и защиты "Simocode". Эти модули имеют в своём составе все компоненты, необходимые для реализации любой существующей схемы управления короткозамкнутым асинхронным двигателем. Управляется модуль по сети «Profibus» от контроллера. В своём составе модуль имеет также датчики тока, что позволяет реализовать комплекс защит электропривода при возникновении аварийных ситуа-

ций. Модуль является свободно программируемым, внутри него возможно запрограммировать требуемый алгоритм воздействия на сигналы контроллера от внешних источников. Программирование Simocode позволяет, во-первых, уменьшить загрузку контроллера, во-вторых, оптимально для каждой требуемой задачи настроить интерфейс обмена данными с контроллером, и, если это требуется, реализовать алгоритм автономной работы механизма даже при неработающем контроллере. Причем переход на автономную работу и обратно может происходить автоматически, что существенно повышает надёжность работы электропривода в нестандартных ситуациях.

Таким образом, применение модулей Simocode позволило не только практически полностью избавиться от применения релейной схемы управления, но и дополнить систему управления конкретным приводом функциями, реализация которых была ранее затруднительной либо экономически невыгодной (контроль тока, контроль утечек на землю, контроль асимметрии тока либо обрыв фазы двигателя и т.д.).

Библиографический список

1. Головин В.В., Карандаев А.С. Промышленное внедрение и опыт эксплуатации современных электроприводов в ОАО «ММК» // Регулируемый электропривод. Опыт и перспективы применения: Доклады науч.-практ. семинара. М.: МЭИ, 2006. С. 9–35.
2. Шляев П.В. Модернизация электроприводов чистой группы стана «2500» горячей прокатки // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004). Ч. 2. Магнитогорск, 2004. С. 23–27.
3. Последние разработки фирмы «Уралмаш – Металлургическое оборудование» в области АСУ ТП агрегатов обработки холоднокатаной полосы / А.Е. Браун, Т.Т. Бусылко, А.С. Валдырев и др. // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004). Ч. 2. Магнитогорск, 2004. С. 28–30.

УДК 621.31.001.57

А.Ю. Коваленко

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ ПРИ РАБОТЕ АГРЕГАТА «КОВШ-ПЕЧЬ»

В ОАО «ММК» установлено несколько агрегатов «ковш-печь» (АКП), в которых производится доводка стали до заданного химсостава и поддержание температуры перед разливкой. Наиболее мощный из работающих агрегатов имеет емкость ковша 375 т, его печной трансформатор мощностью 45 МВА присоединен по схеме глубокого ввода к шинам 110 кВ. Вместе с пуском электродуговых печей планируется ввод еще нескольких агрегатов. Подобные приемники

отличаются резкопеременным, прерывистым характером изменения мощности (см. рисунок).

С учетом сказанного особую актуальность приобретают вопросы расчета потерь мощности и электроэнергии в питающей сети, поскольку упрощенные методики, применяемые в настоящее время, приводят к существенным погрешностям и искажениям в оценке распределения электрических потерь в заводской схеме электроснабжения. Доля электрических потерь в питающей сети от подоб-

ных электроприемников становится все более значительной, при этом наблюдается занижение результатов примерно в 2 раза (см. таблицу) вследствие использования в расчетах широких интервалов времени для усреднения графиков нагрузки.

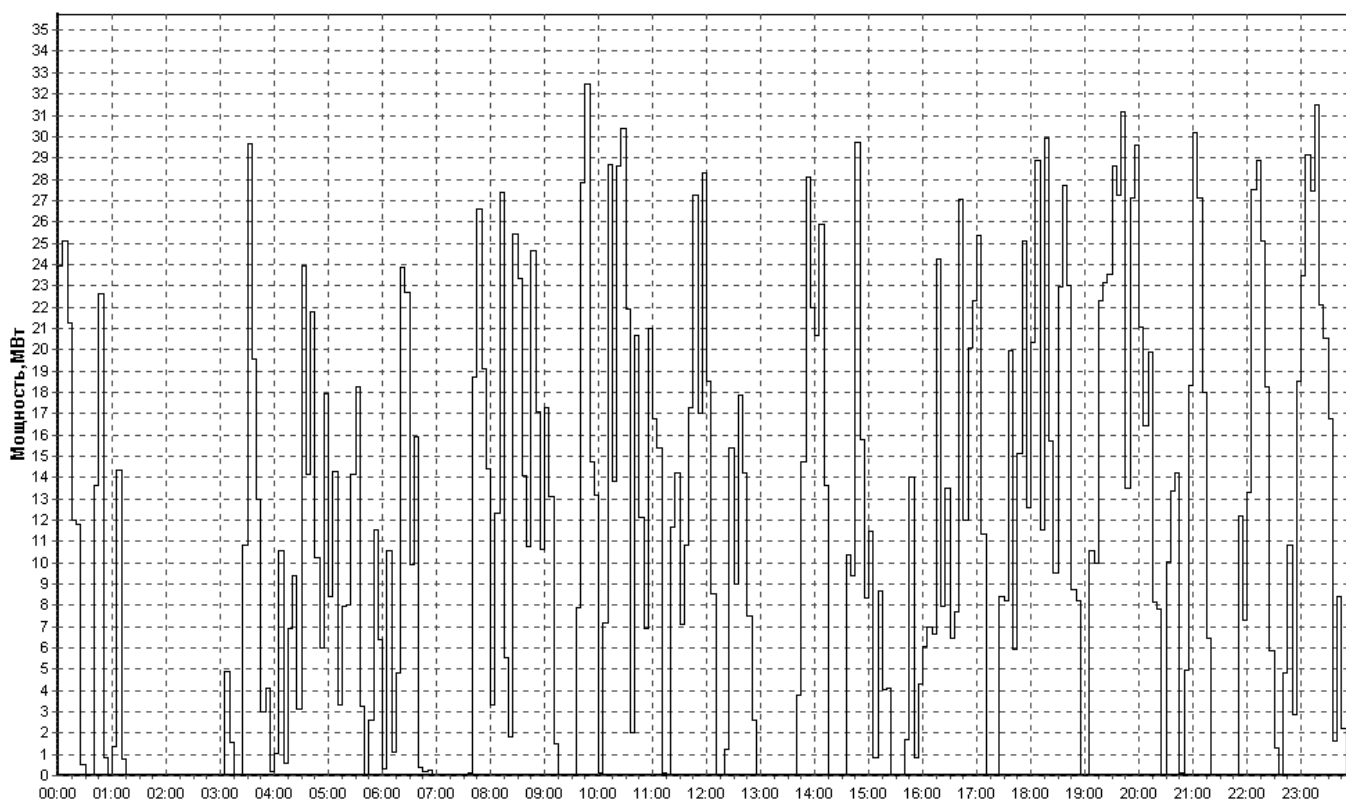
Информационная база, используемая сегодня для анализа электроснабжения и электропотребления комбината, качественно изменилась благодаря вводу в эксплуатацию в 1994 г. автоматизированной системы диспетчерского управления энергохозяйством (АСДУЭ). Наряду с интегральными отчетными данными о расходе энергии за месяц имеются подробные сведения об электрических нагрузках как отдельных электроприемников, так и промышленных комплексов. Они представлены временными рядами, которые состоят из числовых значений, полученных усреднением на интервалах от 5 мин и более.

Статистический материал о суточных графиках активной и реактивной нагрузки, накопленный в течение 2004–2006 гг. в среде этой системы, положен в основу предлагаемого метода определения потерь энергии в питающей сети агрегатов «ковш-печь». Для обработки данных использованы известные методики [1] и пакет вычислительных программ «Stadia» [2].

Зависимость электрических потерь в питающей сети АКП от интервала усреднения графика нагрузки

| Интервал усреднения графика нагрузки | Потери энергии за сутки в ЛЭП-110 кВ и печном трансформаторе, кВтч |
|--------------------------------------|--|
| 5 мин | 1169,3 |
| 10 мин | 1047,6 |
| 15 мин | 955,4 |
| 20 мин | 895,1 |
| 30 мин | 837,0 |
| 1 ч | 690,0 |
| 2 ч | 637,3 |
| 4 ч | 632,9 |
| 6 ч | 630,7 |
| 12 ч | 629,6 |
| 24 ч | 628,5 |

Типичная особенность суточных графиков нагрузки АКП, подготовленных с усреднением в 5 мин, состоит в цикличности приложения резкопеременной нагрузки к сети и в отсутствии потребления энергии холостого хода во время паузы (см. рисунок). Количество и длительность пауз между интервалами горения дуги не остаются постоянными, поскольку зависят от многих показателей производственной программы агрегата. Да-



— 33гр : Печь-ковш ККЦ (07.02.2006) |

Суточный график нагрузок агрегата «ковш-печь» ККЦ

же при высокой его производительности, достигаемой при трехсменной работе (коэффициент заполнения графика равен 0,40–0,45), длительность одной паузы составляет от 5 до 25 мин, а количество повторений – 10–15 раз за сутки. Длина паузы между рабочими циклами может быть и больше, а их ежесуточная сумма принимает значения от 1,25 ч до 6–8 ч.

Таким образом, индивидуальность, присутствующая в каждой суточной реализации графика нагрузки, затрудняет описание ее поведения за весь расчетный период. Поэтому статистические характеристики, полученные при обработке графиков на таких больших интервалах, как месяц, не обладают той относительной устойчивостью, которая характерна для других электроприемников [3]. Отсутствие постоянства в значениях коэффициента вариации нагрузки ставит под сомнение правомочность применения его средних величин, вычисленных по ретроспективным данным, в расчетах потерь по известной зависимости:

$$\Delta P_i = \frac{(P_{cp,мес}^2 + Q_{cp,мес}^2) \cdot (1 + k_v^2)}{U_{cp,мес}^2} \cdot r_i, \quad (1)$$

где $P_{cp,мес}$, $Q_{cp,мес}$ – средние за месяц значения активной и реактивной мощности; k_v – коэффициент вариации полной мощности, равный коэффициенту вариации активной мощности; r_i – сопротивление i элемента сети (линия электропередачи, печной трансформатор); $U_{cp,мес}$ – среднее за месяц напряжение.

Предложено решение, способствующее стабилизации коэффициента вариации. Оно заключается в предварительном и целенаправленном редактировании содержания выборки 5-минутных значений нагрузки на месячном интервале. Если из известной выборки удалить нулевые значения нагрузки, местоположение которых в графике совпадает с временными зонами пауз, то размеры суточного и месячного потребления электроэнергии агрегатом не изменятся. Однако объем выборки будет меньше, а статистические характеристики нагрузки, полученные на основе ее обработки, приобретут другие значения и свойства. Так, диапазон, в котором находятся новые значения коэффициента вариации, резко сокращается при одновременном уменьшении эмпирического среднего. Это положительное качество с неизменным постоянством отмечается на протяжении 1,5 лет исследований как для агрегата, размещенного в кислородно-конвертерном цехе (ККЦ), так и в электросталеплавильном цехе (ЭСЦ). Среднеквадратическое отклонение коэффициента вариации не превышает 2,1% для ККЦ и 2,8% для ЭСЦ. Для

сравнения отметим, что при обращении к полным временным рядам нагрузки аналогичные отклонения достигают 11,5 и 16,3% соответственно.

Полученные выборочные характеристики нельзя использовать в каких-либо вычислительных операциях вместе со значением календарной длительности месяца. Поскольку из графиков исключены нулевые значения мощности, изменилось время приложения средней нагрузки к сети. Теперь оно равно чистому времени работы АКП, которое меньше календарной длины месяца на сумму времени пауз, зарегистрированных за этот же расчетный период. Вычислить его значение не представляет труда по итогам прошедшего месяца, если воспользоваться данными АСДУЭ. Относительно этого рабочего времени определены и другие моменты эмпирического распределения нагрузки.

В таком случае потери энергии в элементах сети могут быть рассчитаны по приведенной ниже формуле с использованием среднего значения коэффициента вариации и чистого времени работы агрегата за месяц:

$$\Delta W_i = \frac{(W_{p,мес}^2 + W_{q,мес}^2) \cdot (1 + k_{v,cp}^2)}{U_{cp,мес}^2 \cdot T_{раб}} \cdot r_i, \quad (2)$$

где $W_{p,мес}$, $W_{q,мес}$ – объемы потребленной активной и реактивной энергии за месяц; $k_{v,cp}$ – среднее значение коэффициента вариации, рассчитанное по 19 выборкам пятиминутных значений нагрузки за месяц (август 2004 г. – февраль 2006 г.); $T_{раб}$ – чистое время работы агрегата за месяц.

Средние значения коэффициента вариации нагрузки агрегатов «ковш-печь» ККЦ и ЭСЦ приняты равными и $k_{v,cp} = 0,65$, т.к. их средние значения близки между собой (ККЦ: $k_{v,cp} = 0,68$ и ЭСЦ: $k_{v,cp} = 0,63$).

Время работы АКП может быть определено при помощи регрессионного парного уравнения вида $T_{раб} = F(W_{мес})$. Эта вычислительная операция тем более востребована при расчете плановых показателей потери энергии, поскольку единственно известным значением из исходных данных для соотношения $W_{p,мес} = P_{cp} \cdot T_{раб}$ является ожидаемый объем электропотребления агрегата.

Анализ линейной регрессионной зависимости указывает на присутствие тесной стохастической связи между функцией отклика ($T_{раб}$) и фактором ($W_{p,мес}$). Коэффициент парной корреляции не опускается ниже $r = 0,99$ для ККЦ и $r = 0,91$ для ЭСЦ. Адекватность уравнений подтверждена результатами проверки по критерию Фишера, а значимость коэффициентов регрессии – по t-критерию Стьюдента.

Для расчета зависимости между исследуемыми параметрами построены нелинейные регрессионные уравнения на основе метода наименьших квадратов. Среди них – многочлены второй – восьмой степеней, показательные, степенные и другие известные функции (18 форм).

Для практического применения в расчетах потерь энергии рекомендованы полиномы третьей степени:

а) агрегат «ковш-печь» ККЦ:

$$T_{\text{раб}} = 40,52 + 16,37 \cdot W_{\text{с.мес}} + 18,23 \cdot W_{\text{с.мес}}^2 - 1,591 \cdot W_{\text{с.мес}}^3, \quad (3)$$

б) агрегат «ковш-печь» ЭСПЦ:

$$T_{\text{раб}} = 1623 - 1368 \cdot W_{\text{с.мес}} + 431,5 \cdot W_{\text{с.мес}}^2 - 41,51 \cdot W_{\text{с.мес}}^3, \quad (4)$$

где $W_{\text{с.мес}}$ – полная энергия ($W_{\text{с.мес}} = W_{\text{р.мес}} / \cos \varphi$); $\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки агрегата.

Приведенные формулы соответствуют всем формальным критериям предсказания экспериментальных данных и обеспечивают наименьшую остаточную дисперсию и минимальную сумму остатков по сравнению с другими формами представления статистической зависимости.

Использование обобщенных статистических показателей графиков нагрузки и регрессионных моделей (3) и (4) определения рабочего времени в расчетах потерь энергии за месяц (2) обеспечивает приемлемые по точности результаты. Так, например, отклонения потерь, рассчитанных по параметрам суточных графиков нагрузки с 5-минутным усреднением формы, не выходят за пределы $-5,1\% \div +1,8\%$ для сети агрегата «ковш-печь» ККЦ и $-7,8\% \div +8,9\%$ для ЭСПЦ. Указанные интервалы имеют тенденцию к сокращению по мере увеличения чистого времени работы агрегатов, являю-

щегося следствием роста суточных объемов производства стали. Если до 2006 г. доля рабочего времени составляла 64% (ККЦ) и 47% (ЭСПЦ) от календарной продолжительности месяца, то в январе–феврале 2006 г. она увеличилась до 73% и 54%. При этом интервалы отклонения потерь сократились до размеров $-2,9\% \div +1,8\%$ (ККЦ) и $-0,5\% \div +2,3\%$ (ЭСПЦ).

Пример

Определить потери энергии в печном трансформаторе и линии электропередачи напряжением 110 кВ (общее активное сопротивление цепи 4,536 Ом) при суммарном потреблении электроэнергии АКП в количестве 3613 МВт·ч при условии, что $\cos \varphi = 0,81$.

Решение

Рабочее время агрегата равно 422,3 ч согласно (4) при известной полной энергии $W_{\text{с.мес}} = 3613/0,81$ МВА·ч.

Расчетные потери энергии в линии электропередачи и печном трансформаторе агрегата оцениваются в 23 МВт·ч согласно (2) при $k_v = 0,65$.

Отклонение этого значения от потерь, рассчитанных по данным суточных графиков с 5-минутным усреднением (22,5 МВт·ч), составляет +2,2%.

Выводы

1. Переход в расчетах от среднемесячных к 5-минутным значениям нагрузки способствует преодолению двух и более кратного занижения потерь энергии в линии электропередачи и печном трансформаторе агрегата «ковш-печь».
2. Расчет потерь энергии в сетевом оборудовании «ковш-печь» может быть выполнен с высокой точностью по методике, для которой исходными данными являются объем электропотребления и чистое (расчетное или фактическое) время работы агрегата.

Библиографический список

1. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул М.: Высш. шк., 1997.
2. Анализ данных на компьютере / Под ред. Фигурнова В.Э. М.: Финансы и статистика, 1995.
3. Планирование технических потерь электроэнергии в системе электроснабжения металлургического предприятия / Адамович А.Р., Коваленко А.Ю., Николаев Н.А., Славгородский В.Б. // Электрика. 2005. № 2.

С.И. Лукьянов, А.Е. Васильев, Д.В. Швидченко, Е.С. Суспицын,
И.Л. Погорелов, В.П. Лукьянов, В.Н. Данилов

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТЯНУЩЕ-ПРАВИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

Технология непрерывной разливки стали и конструкция машин постоянно совершенствуются в направлении повышения качества отливаемой заготовки и производительности каждой машины. Увеличение производительности машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) прямо связано с увеличением линейной скорости разливки.

По данным Международного института чугуна и стали основными причинами ограничения линейной скорости разливки являются: качество внутренней структуры заготовки и частота прорыва металла. Обусловлено это тем, что с увеличением скорости разливки возрастает интенсивность охлаждения заготовки и скорость её деформации, что неминуемо приводит к снижению качества внутренней структуры заготовки и увеличению вероятности прорыва корочки слитка. Поэтому в реальных промышленных условиях показатели средней скорости разливки стали значительно ниже проектных. Так, на МНЛЗ № 1–4 ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат” при номинальной проектной скорости разливки 1,5 м/мин среднегодовые показатели скорости за 10 лет эксплуатации МНЛЗ составили около 0,7 м/мин. О масштабах экономических потерь свидетельствует тот факт, что снижение скорости разливки на одном ручье только на 1% относительно проектного значения наносит ущерб около 1 млн руб. в год.

За последние десятилетия выполнен большой объем технологических и конструкторских работ по совершенствованию установок МНЛЗ, однако из всего многообразия факторов, определяющих качество литой заготовки, весьма недостаточно рассмотрены вопросы влияния электропривода тянуще-правильного устройства (ТПУ), формирующего один из основных технологических факторов – схему приложения тянущего усилия, на процесс кристаллизации слитка и образование дефектов макроструктуры литой заготовки. В литературных источниках указано, что тянущие ролики в процессе вытягивания заготовки формируют в последней дополнительные продольные усилия, которые являются одной из причин образования дефектов. Однако конкретная оценка значений этих продольных усилий, изменения их вдоль ЗВО

и влияния на качество непрерывнолитой заготовки отсутствует. Отсутствует и четкое обоснование одного из базовых требований к электроприводу ТПУ – равномерного деления нагрузки вытягивания заготовки между электродвигателями тянущих роликов для ограничения растягивающих усилий в оболочке кристаллизующегося слитка. Слабо отражено влияние электропривода на качество макроструктуры слитка. Нет ясности и в целеобразном распределении управляемых и неуправляемых электроприводов тянущих роликов вдоль технологического канала ЗВО с позиций снижения дефектов в литой заготовке и увеличения скорости разливки. Проблема обеспечения качественной работы электропривода тянущих роликов ЗВО с позиций роста производительности МНЛЗ при сохранении качества слитка потребовала и более глубокого исследования электропривода на действующих объектах.

В большинстве отечественных и зарубежных МНЛЗ применяется электропривод постоянного тока с силовым питанием всех электродвигателей от одного или двух тиристорных преобразователей. Системы управления строятся по принципу подчиненного регулирования с внутренним астатическим контуром регулирования тока и внешним статическим контуром регулирования скорости вращения одного или нескольких электродвигателей тянущих роликов или напряжения с выхода ТП. В существующих системах управления электроприводом ТПУ отсутствует возможность плавного регулирования распределения нагрузок по электродвигателям тянущих роликов. Выравнивание нагрузок между электродвигателями осуществляется смягчением их механических характеристик за счет включения в цепь якоря каждого электродвигателя добавочных сопротивлений [1].

Задача разработки автоматизированного электропривода тянуще-правильного устройства МНЛЗ, обеспечивающего увеличение производительности машины посредством увеличения скорости литья заготовки за счет улучшения качества внутренней структуры и уменьшения вероятности прорыва корочки непрерывнолитого слитка, потребовала решения следующих вопросов:

- создания методики оценки влияния электропривода ТПУ на качество макроструктуры непрерывнолитого слитка;
- создания методики определения требуемого по технологии распределения моментов нагрузки по тянущим роликам ТПУ и методики оценки продольных усилий, создаваемых в слитке электроприводом ТПУ;
- определения показателей настройки электропривода ТПУ, позволяющих выполнить его оптимизацию по критерию качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок;
- создания динамической модели электропривода ТПУ с учетом реальных параметров упругой связи электродвигатель – тянущий ролик, фрикционной связи тянущий ролик – слиток и условий контакта тянущие ролики – слиток;
- обоснования технологических требований к электроприводу ТПУ с позиций снижения неравномерности распределения нагрузок по электродвигателям тянущих роликов, максимальных значений статических и динамических продольных усилий в отливаемой заготовке и обеспечения стабильности протекания процесса литья заготовки в условиях автоколебаний скорости разливки;
- создания технических средств и алгоритмов управления автоматизированным электроприводом ТПУ, обеспечивающих ограничение статических и динамических продольных усилий в слитке и уменьшение неравномерности распределения нагрузок по тянущим роликам;
- промышленной апробации и внедрения полученных результатов, оценки их технической и экономической эффективности.

В результате теоретических и экспериментальных исследований электропривода ТПУ на типовых МНЛЗ криволинейного типа ОАО "ММК" установлено [2]:

– при неизменном задании скорости разливки в электроприводе ТПУ наблюдаются два режима его работы, отражающие различные физические явления в роликовой проводке ЗВО.

В первом режиме работы электропривода ТПУ при неизменных скорости литья и общем токе электропривода на ряде электродвигателей тянущих роликов происходят устойчивые, неизменные по числовым характеристикам колебания двух форм токов. Одна форма изменения тока обусловлена наличием остаточного прогиба бочки тянущего ролика, а вторая – периодическими буксовками тянущих роликов по слитку.

Во втором режиме работы электропривода вытягивание слитка сопровождается устойчивыми колебаниями токов всех электродвигателей тянущих роликов, общего тока электропривода ТПУ и скорости разливки. Адекватным отображением этого режима работы электропривода ТПУ являются колебания общего тока и скорости разливки. При наличии автоколебаний в электроприводе ТПУ изменение скорости разливки достигает 13% от заданного значения, что противоречит одному из основных требований к электроприводу ТПУ – поддержания скорости разливки с точностью $\pm 2\%$;

– существующая схема электропривода ТПУ не обеспечивает равномерного деления общего тока нагрузки между электродвигателями тянущих роликов. На различных ручьях МНЛЗ № 1–4 вид неравномерности распределения рабочих токов и токов холостого хода вдоль ЗВО различный, и установить какие-либо общие аналитические закономерности распределения токов не представлялось возможным. Доля значений токов холостого хода в общем рабочем токе электропривода ТПУ существенна и достигает 60%, поэтому оценку реального усилия, развиваемого конкретным электродвигателем на контакте его тянущего ролика со слитком, необходимо выполнять за вычетом тока холостого хода. При изменении скорости разливки и по истечении времени с момента проведения капитальных работ происходит существенное перераспределение тока электропривода ТПУ между электродвигателями тянущих роликов. В качестве оценки неравномерности распределения токов нагрузки применен коэффициент вариации:

$$v_I = S_I / I, \quad (1)$$

где S_I – среднее квадратическое отклонение значений токов электродвигателей от математического ожидания I тока нагрузки группы электродвигателей;

– в реальных условиях литья заготовки тянущие ролики радиального, криволинейного, и первой группы горизонтального участков всегда загружены менее требуемых значений. Напротив, ролики второй группы горизонтального участка существенно (33,3...45,1% вместо требуемых 3,0...6,0%) в реальных условиях загружены более требуемых по технологии значений. Следовательно, тянущие ролики второй группы горизонтального участка создают в слитке статические продольные усилия (натяжение) и посредством этого разгружают тянущие ролики остальных групп ТПУ. На основании несоответствия распределения моментов вытягивания заготовки в существующем

электроприводе ТПУ, требуемому по технологии, разработана математическая модель распределения статических продольных усилий, создаваемых в слитке электроприводом ТПУ [3]:

$$\begin{aligned} F_{n-1,n} &= F_{Pn} - F_{Mn}; \\ F_{n-2,n-1} &= F_{n-1,n} + (F_{Pn-1} - F_{Mn-1}); \\ &\dots \\ F_{i-1,i} &= \sum_{j=n,-1}^{i+1} F_{j-1,j} + (F_{Pi} - F_{Mi}); \\ &\dots \\ F_{1,2} &= \sum_{j=n,-1}^3 F_{j-1,j} + (F_{P2} - F_{M2}). \end{aligned} \quad (2)$$

где $F_{i-1,i}$ – статическое продольное усилие, создаваемое в слитке электроприводом ТПУ, в пространстве между $i-1$ и i -м приводными роликами; F_{Pi} – реальное усилие вытягивания слитка, развиваемое i -м тянущим роликом; F_{Mi} – требуемое по технологии усилие вытягивания слитка, рассчитанное на модели распределения моментов по приводным роликам ЗВО, необходимое и достаточное для транспортировки слитка в соответствующем $((i-1)-i)$ -м межроликовом промежутке.

Усилие F_{Mi} сопротивления вытягиванию заготовки в одном межроликовом пространстве ЗВО для МНЛЗ криволинейного типа определяется из выражения:

$$\begin{aligned} F_{Mi} &= F_{KP} + f_i (P_{\Phi i} + G_{Qi} + G_{Pi} + \\ &+ P_{Ppi} + P_{Tpi}) + F_{Bvpi} - G_{Ti}, \end{aligned} \quad (3)$$

где F_{KP} – усилие вытягивания слитка из кристаллизатора; f_i – эквивалентный коэффициент трения, обусловленный трением качения ролика по слитку и трением в подшипниках опор роликов; $P_{\Phi i}$ – усилие ферростатического давления на ролики; G_{Qi} – нормальная составляющая силы тяжести части слитка в межроликовом пространстве; G_{Ti} – тангенциальная или продольная составляющая силы тяжести слитка; G_{Pi} – сила тяжести i -го ролика; P_{Ppi} – усилие давления на ролик, обусловленное правкой слитка на криволинейном участке ЗВО; P_{Tpi} – усилие давления на ролики от температурных поволодок непрерывнолитой заготовки; F_{Bvpi} – усилие сопротивления вытягиванию выпученной корки заготовки из i -й пары роликов;

– анализ распределения статических продольных усилий в слитке вдоль ЗВО для различных ручьев МНЛЗ № 1–4 ОАО “ММК” показал, что на различных ручьях, находящихся в иден-

тичных технологических условиях, распределение продольных усилий в слитке по абсолютной величине и характеру изменения вдоль ЗВО значительно отличаются друг от друга. На горизонтальном участке в зоне закрытия жидкой фазы обнаружены значительные изменения максимальных значений натяжения в слитке от 186 до 622 кН. Кроме этого, на радиальном и криволинейном участках возможно образование подпора в слитке;

– между показателями неравномерности распределения токов нагрузки электродвигателей тянущих роликов первой группы горизонтального участка (коэффициента вариации v_{GOP}) и показателями качества осевой зоны слитка имеет место тесная корреляционная связь. При этом чем выше показатели неравномерности v_{GOP} , тем выше относительная частота снижения сортности литой заготовки по осевым трещинам и осевой рыхлости (коэффициенты парной корреляции R составили соответственно 0,93 и 0,75).

Кроме этого существует тесная корреляционная связь на радиальном, криволинейном и горизонтальном участках ЗВО между показателями статических продольных усилий в слитке на участках и частотой возникновения перпендикулярных и гнездообразных трещин. Причем, чем выше показатели величины продольных усилий в слитке, тем выше частота возникновения трещин (коэффициенты парной корреляции соответственно составили 0,88, 0,92 и 0,77);

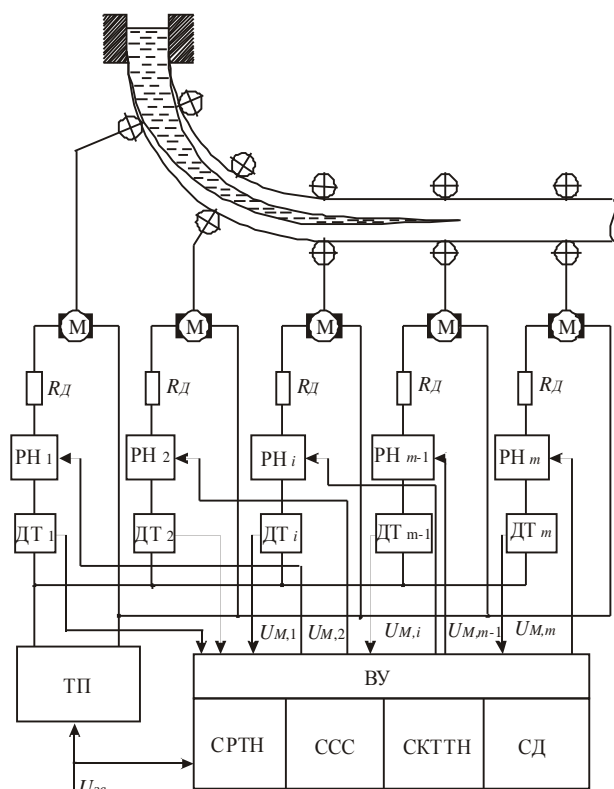
– колебательное изменение скорости литья заготовки приводит к ухудшению качества макроструктуры литой заготовки по всем шести видам дефектов, учет которых ведется на МНЛЗ ОАО «ММК»;

– исследование на разработанной динамической модели электропривода ТПУ с учетом реальных параметров упругой связи тянущие ролики – электродвигатель и фрикционной связи тянущие ролики – слиток показали, что причиной колебаний общего тока нагрузки электропривода ТПУ и скорости литья заготовки является случайное появление гармонической составляющей в моменте сопротивления вытягиванию слитка. Прогиб бочки тянущих роликов и их периодические и случайные буксовки приводят к образованию в заготовке значительных дополнительных динамических продольных усилий. Износ тянущих роликов в применяемой системе электропривода ТПУ без возможности индивидуального регулирования электроприводов роликов вызывает заметное изменение усилия вытягивания относительно первоначально заданного значения и увеличение статических продольных усилий в слитке.

Приведенные исследования позволили определить конкретные технологические требования к электроприводу ТПУ и его системе управления по участкам ЗВО с позиций улучшения качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок за счет снижения неравномерности распределения нагрузок по электродвигателям тянущих роликов, снижения максимальных значений статических и динамических продольных усилий в слитке и стабилизации скорости разлива при появлении гармонической составляющей в моменте сопротивления вытягиванию заготовки.

В соответствии с разработанными технологическими требованиями обоснован выбор и предложены три варианта реализации силовой части электропривода ТПУ с целью снижения максимальных значений статических продольных усилий в отливаемой заготовке и равномерного распределения нагрузок по электродвигателям тянущих роликов на участках ЗВО:

- 1) индивидуальный электропривод тянущих роликов;
- 2) групповой электропривод всех тянущих роликов с активными регуляторами нагрузки в якорных цепях каждого электродвигателя тянущего ролика (см. рисунок). Регуляторы нагрузки предложено выполнить по принципу широтнымпульсной модуляции;



Структурная схема электропривода ТПУ

3) групповой электропривод тянущих роликов радиального, криволинейного и двух групп горизонтальных участков ЗВО от четырех тиристорных преобразователей с включением в якорные цепи электродвигателей радиального, криволинейного и первой группы горизонтальных участков ЗВО активных регуляторов нагрузки.

Разработка предлагаемых технических решений электропривода ТПУ выполнена в рамках программы реконструкции действующих МНЛЗ № 2–3 ОАО «ММК» с целью повышения качества макроструктуры литых заготовок и повышения производительности МНЛЗ.

Техническое решение (см. рисунок) принято к внедрению на МНЛЗ ОАО «ММК».

Разработан общий алгоритм управления электроприводом ТПУ для технологических условий литья заготовки на МНЛЗ ОАО «ММК» (СРТН). В алгоритме предусмотрена возможность компенсации гармонической составляющей общего момента вытягивания слитка при появлении автоколебаний скорости литья заготовки, превышающих требуемую точность её стабилизации (СК). Также учтена необходимость коррекции требуемых значений токов (моментов) нагрузки с учетом текущего состояния тянущих роликов и коррекции их числа в соответствии с точностью выставки тянущих роликов по технологической оси ЗВО и исправностью электрического и механического оборудования линий привода тянущих роликов (СКТН). В состав системы управления электроприводом ТПУ включена система диагностики текущего состояния и настройки оборудования роликовой проводки (СД).

СРТН обеспечивает расчет и поддержание требуемого по технологии относительного распределения общего момента вытягивания слитка по группам электродвигателей радиального, криволинейного и двух групп горизонтальных участков ЗВО с целью снижения максимальных значений статических продольных усилий в слитке, расчет и поддержание относительного распределения момента нагрузки группы электродвигателей по электродвигателям тянущих роликов с целью снижения неравномерности распределения токов нагрузки.

Алгоритм СКТН обеспечивает стабилизацию усилия вытягивания слитка на контакте ролик – слиток при наличии прогиба и износа тянущего ролика и ограничение динамических продольных усилий в слитке при появлении периодических и случайных бросков приводов тянущих роликов.

Алгоритм СД обеспечивает стабилизацию скорости литья заготовки при появлении колебательной составляющей в общем моменте сопротивления вытягиванию слитка.

Разработан общий алгоритм и алгоритмы отдельных функций системы диагностики (СД) текущего состояния тянущих роликов, контроля точности их выставки вдоль технологической линии ЗВО и исправности электрического и механического оборудования линий привода тянущих роликов. Предложенная система диагностики отличается от известной увеличением выполняемых функций диагностики с 5 до 10.

Система управления электроприводом ТПУ (см. рисунок) внедрена на МНЛЗ № 3 ОАО

«ММК». Внедрение системы обеспечило за счет снижения максимальных значений статических продольных усилий в слитке в 4 раза, снижения неравномерности распределения токов нагрузки на 50% и стабилизации скорости литья заготовки в пределах $\pm 2\%$ от заданного значения увеличить скорость разлива на 5% при улучшении качества макроструктуры заготовок в среднем на 10%.

Фактический годовой эффект от внедрения составил 22 млн руб.

Библиографический список

1. Лукьянов С. И. Электропривод тянуще-правильного устройства МНЛЗ: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 100 с.
2. Лукьянов С. И., Белый А.В., Швидченко Д.В. Стабилизация технологических параметров вытягивания непрерывнолитого слитка электроприводом тянущих роликов: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 141 с.
3. Лукьянов С. И., Васильев А.Е., Лукьянов Д. С. Автоматизированный электропривод тянуще-правильного устройства МНЛЗ: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 179 с.

УДК 621.74.06.62-83

Ю.А. Кирпичников, А.А. Николаев

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ВЫХОДНОЙ ЗОНЫ АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ ОАО «ММК»

По завершении технологического процесса цинкования полоса сматывается моталкой в рулон для последующего складирования и отгрузки. Переход полосы с одной моталки на другую связан с рядом операций при пониженной (заправочной) скорости ее передвижения. Минимальное время цикла смены моталки включает в себя затраты на следующие операции: замедление полосы от технологической скорости до заправочной; подвод необходимого участка полосы к ножницам; порез полосы выходными гильотинными ножницами с вырезкой участка сварки и образцов, а также возможного брака на концах полосы; протяжка переднего конца на заправочной скорости до свободной моталки и его заправка на барабан; разгон полосы до максимальной скорости выходной секции с целью снижения запаса в выходном накопителе до минимального; переход на технологическую скорость передвижения оцинкованной полосы в выходной зоне.

Перечисленные выше операции выполняются в автоматическом режиме, но при необходимости возможно ручное управление заправкой конца полосы в моталку. При этом все операции, в зависимости от сортамента, укладываются в минимальное время 100–200 с при минимальном

времени работы выходной зоны на пониженной скорости до 90 с.

Цикл смены моталок обеспечивается соответствующей и согласованной работой выходного накопителя полосы, назначением которого является строгое сохранение неизменным заданного натяжения и скорости полосы в технологической зоне.

Выходной накопитель представляет собой вертикальную петлевую систему, основной частью которой является передвижная платформа с роликами (рис. 1). При перемещении платформы вверх или вниз изменяется объем накопленной полосы согласованно с заданными натяжением и скоростью полосы в технологической зоне. До начала смены моталок выходной накопитель имеет минимальное заполнение от 30 до 70% к максимальной емкости в зависимости от сортамента.

При подаче команды на смену моталок начинается замедление полосы в выходной зоне от технологической скорости до заправочной за счет передвижения платформы накопителя вверх со скоростью, соответств

ующей разности скоростей полосы до и после накопителя. Начинается процесс накопления полосы в выходном накопителе.

За время t_n накопления полосы платформа пройдет путь h и в накопитель будет набрана полоса длиной

$$l_n = \Delta l_{вт} \cdot 2n, \tag{1}$$

где $\Delta l_{вт}$ – приращение длины одной ветви полосы в накопителе; $2n$ – число ветвей полосы в накопителе; n – число роликов на платформе.

Принимая $\Delta l_{вт} \approx h$, перепишем выражение (1)

$$l_n = h \cdot 2n. \tag{2}$$

К определению длины накопленной полосы и пути, пройденного платформой, можно подойти иначе, если рассмотреть диаграммы скоростей за один цикл смены моталок. Установим зависимость скорости передвижения платформы от скорости движения полосы на всех участках цикла, принимая при этом ускорение и замедление во всех случаях постоянным в течение переходного процесса (рис. 2).

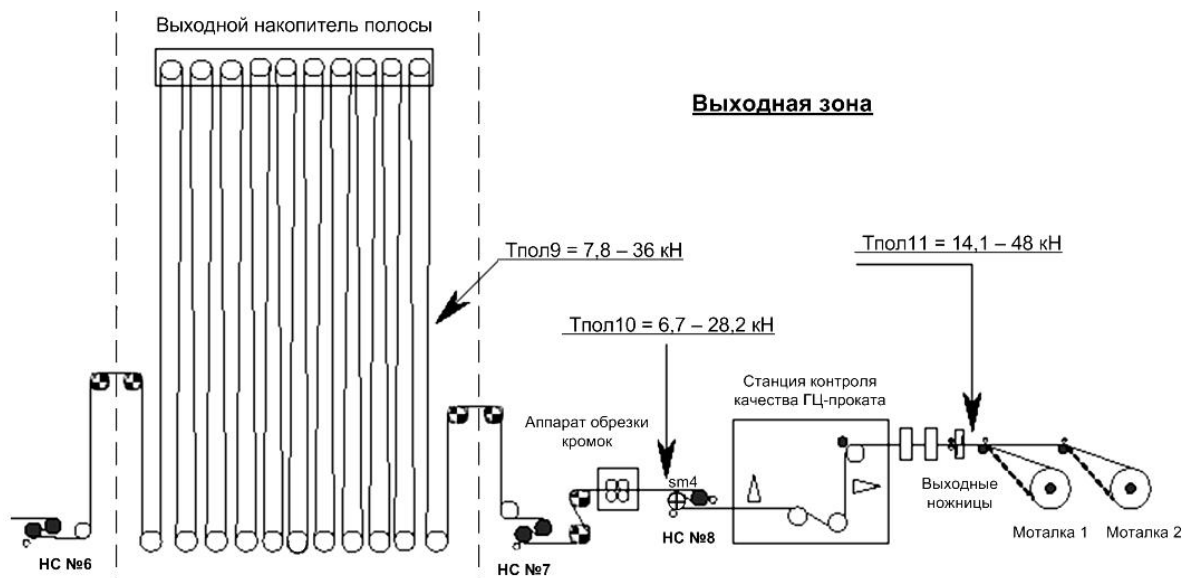


Рис. 1. Схема выходного накопителя и выходной зоны смены моталок

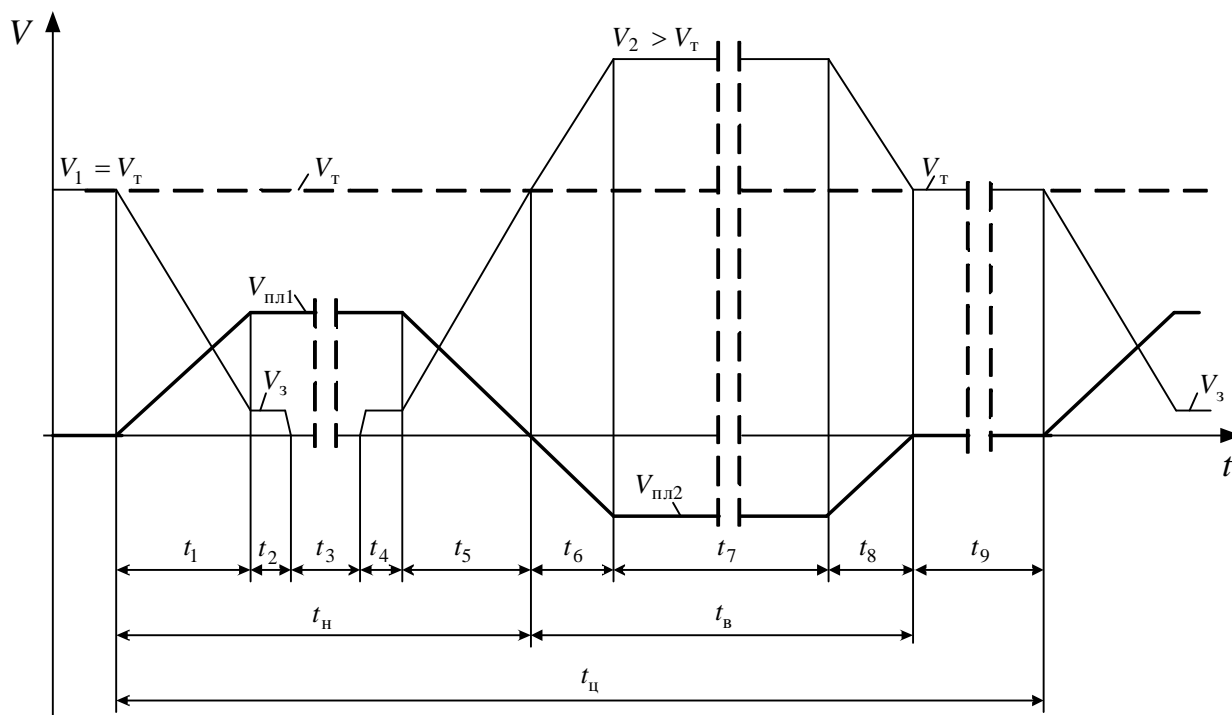


Рис. 2. Диаграммы скоростей движения полосы и платформы за один цикл смены моталки

За время замедления полосы t_1 из накопителя будет выбрана длина

$$l_1' = \frac{1}{2}(V_T - V_3) \cdot t_1. \quad (3)$$

За то же время t_1 платформа накопителя разгонится до установившейся скорости $V_{\text{пн1}}$ и в накопитель поступит полоса из технологической зоны со скоростью V_T и длиной

$$l_1'' = V_T \cdot t_1. \quad (4)$$

В результате за время t_1 накопитель получит приращение в длине полосы, равное разности длин:

$$\Delta l_1 = l_1'' - l_1' = \frac{1}{2}(V_T + V_3) \cdot t_1. \quad (5)$$

В момент времени t_1 полоса на выходе из накопителя будет двигаться на заправочной скорости V_3 , а платформа выйдет на установившуюся скорость $V_{\text{пн1}}$ (см. рис. 2). За время позиционирования полосы t_2 на заправочной скорости из накопителя будет выбрана полоса длиной

$$l_2' = V_3 \cdot t_2, \quad (6)$$

а в накопитель поступит полоса длиной

$$l_2'' = V_T \cdot t_2. \quad (7)$$

Приращение полосы в накопителе за время t_2

$$\Delta l_2 = l_2'' - l_2' = \frac{1}{2}(V_T - V_3) \cdot t_2. \quad (8)$$

В течение промежутка времени t_3 полоса остановлена для реза на ножницах и, следовательно, в накопитель поступит полоса длиной

$$\Delta l_3 = V_T \cdot t_3. \quad (9)$$

После ряда резов полоса на заправочной скорости V_3 заправляется в моталку в течение времени t_4 и при этом будет выбрана длина

$$l_4' = V_3 \cdot t_4, \quad (10)$$

а в накопитель поступит приращение полосы

$$\Delta l_4 = l_4'' - l_4' = \frac{1}{2}(V_T - V_3) \cdot t_4. \quad (11)$$

Заметим здесь, что время переходных процессов позиционирования на заправочной скорости ввиду его незначительной величины не учитывается.

По окончании заправки в течение времени t_4 моталка разгоняется и полоса ускоряется от заправочной скорости V_3 до технологической ско-

рости V_T в течение времени t_5 , а платформа за это же время замедляется при движении вверх до нуля (см. рис. 2).

Для сохранения натяжения и скорости полосы в накопителе неизменными и равными заданным необходимо обеспечить согласование ускорения полосы и замедления платформы так, чтобы по окончании времени t_5 скорость платформы была равна нулю, а скорость полосы в накопителе равна технологической V_T . При этом из технологической зоны за время t_5 в накопитель поступит полоса длиной

$$l_5' = V_T \cdot t_5, \quad (12)$$

а из накопителя будет выбрана полоса длиной

$$l_5'' = \frac{1}{2}(V_T - V_3) \cdot t_5. \quad (13)$$

Приращение полосы в накопителе за время t_5

$$\Delta l_5 = l_5' - l_5'' = \frac{1}{2}(V_T + V_3) \cdot t_5. \quad (14)$$

Таким образом, за время смены моталки t_n , равное

$$t_n = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \quad (15)$$

в накопитель поступит полоса длиной

$$\begin{aligned} l_n &= \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \Delta l_4 + \Delta l_5 \\ &= V_T \cdot \left(\frac{1}{2}t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \frac{1}{2}t_5 \right) + \\ &+ V_3 \cdot \left(\frac{1}{2}t_1 - t_2 - t_4 - \frac{1}{2}t_5 \right). \end{aligned} \quad (16)$$

По определению правые части (2) и (16) должны быть равны

$$h \cdot 2n = l_n. \quad (17)$$

Из (17) находится путь, пройденный платформой за время ее движения вверх при смене моталки:

$$h = \frac{l_n}{2n}. \quad (18)$$

По окончании времени t_5 полоса поступает в накопитель из технологической зоны со скоростью V_T и выходит из накопителя с той же скоростью на моталку. Для возвращения платформы в исходное нижнее положение и соответственно выбора полосы из накопителя на моталку необходимо придать полосе на выходе из накопителя некоторое превышение скорости по отношению к технологической V_T , т.е. $V_2 > V_T$ (см. рис. 2). В этом случае

платформа начнет равноускоренное движение вниз и через время t_6 достигнет установившейся скорости $V_{пл2}$.

За время t_6 согласованного движения полосы и платформы из накопителя будет выбрана полоса длиной

$$l_6 = \frac{1}{2}(V_2 - V_T) \cdot t_6. \quad (19)$$

При движении полосы и платформы с постоянной скоростью в течение времени t_7 будет выбрана полоса длиной

$$l_7 = V_2 \cdot t_7. \quad (20)$$

По истечении времени t_7 платформа подойдет к исходному нижнему положению и начнется ее замедление в течение времени t_8 . Полоса, замедляясь согласованно с платформой от скорости V_2 до скорости V_T , пройдет путь за время t_8

$$l_8 = \frac{1}{2}(V_2 - V_T) \cdot t_8. \quad (21)$$

Суммарная длина выбранной полосы из накопителя за время движения платформы вниз

$$l_B = l_6 + l_7 + l_8 =$$

$$= V_2 \cdot \left(\frac{1}{2}t_6 + t_7 + \frac{1}{2}t_8 \right) - V_T \left(\frac{1}{2}t_6 + \frac{1}{2}t_8 \right). \quad (22)$$

Очевидно, что длина выбранной полосы должна быть равна, в общем случае, длине накопленной полосы за время смены моталки, т.е.

$$l_H = l_B$$

и путь, пройденный платформой вверх, равен пути, пройденному вниз:

$$h = \frac{l_H}{2n} = \frac{l_B}{2n}. \quad (23)$$

В дальнейшем, по окончании времени t_8 , скорость полосы на выходе из накопителя равна технологической V_T в течение времени t_9 заполнения моталки, когда заканчивается цикл работы выходного накопителя.

Подводя итог рассмотрению диаграмм скоростей движения полосы и платформы, обратим внимание на скоростной режим работы моталки. Вполне очевидно, что электропривод последней должен работать согласованно с вышеназванными электроприводами так, чтобы на всех участках диаграмм сохранялись заданные натяжения и скорость полосы.

УДК 621.311.1:658.26

О.В. Буланова

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, ИМЕЮЩИХ В СВОЕМ СОСТАВЕ СОБСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В настоящее время одна из основных тенденций развития крупных промышленных предприятий – создание собственных источников электроэнергии, что является выгодным с точки зрения уменьшения себестоимости затрат на электроэнергию и повышает надежность работы всего энергоузла, поскольку вырабатываемая энергия может обеспечить потребности предприятия даже при раздельной работе с энергосистемой.

Однако выход промышленного узла с собственными электростанциями на раздельную с энергосистемой работу приводит к необходимости решения сложных режимных вопросов. Так, при нормальном неаварийном режиме неизбежны

незначительные колебания активной и реактивной мощности, связанные с нормальным изменением режимов работы генераторов и двигателей. Чтобы при этом не возникли качания, приводящие к нарушению работы всего узла, необходимо обеспечить запас статической устойчивости в нормальном режиме работы.

Статическая устойчивость характеризуется, прежде всего, запасами устойчивости по мощности и по напряжению, обеспечивающим надежную работу сети [1, 2]. Система считается статически устойчивой, если коэффициент запаса устойчивости по мощности электропередачи составляет 20% в нормальном режиме и 8% в кратковременном послеаварийном, а запас по напря-

жению – не менее 15% в нормальном режиме и 10% в послеаварийном [1].

Для генераторов коэффициент запаса статической устойчивости определяется по известной предельной передаваемой мощности. Предел передаваемой через сечение мощности находится при известных э.д.с. генератора E , напряжении на его выводах и угле ротора относительно напряжения U сети δ :

$$P = \frac{EU}{x_d} \sin \delta .$$

Если мощность приемной энергосистемы соизмерима с мощностью электропередачи, то напряжение на шинах нагрузки не остается постоянным, что имеет место в реальных линиях электропередач. При этом возникает необходимость

определения действительного предела передаваемой мощности, который существенно ниже идеального. При этом необходимо учитывать характер нагрузки на шинах генератора.

Предельная передаваемая через сечение мощность во многом определяется величиной углов роторов синхронных машин в установившемся режиме относительно друг друга и относительно системы при работе в параллель с последней. Этот показатель также позволяет оценить устойчивость энергосистемы в нормальном и послеаварийном установившихся режимах работы. Критическим в общем случае принимается угол 90° между роторами двух генераторов или генератором и системы при работе генераторов с автоматическим регулированием возбуждения пропорционального действия.

Влияние нагрузки на напряжение определяется регулирующим эффектом нагрузки. В таких расчетах нагрузку необходимо вводить своими статическими характеристиками.

С другой стороны, при снижении напряжения может нарушиться устойчивость самой нагрузки. В этом случае при расчете статической устойчивости установившегося режима целесообразно вычислить предельное напряжение на шинах синхронных и асинхронных двигателей. Устойчивость режимов нагрузки характеризуется коэффициентом запаса статической устойчивости по напряжению.

С целью оценки запаса статической устойчивости на кафедре ЭПП МГТУ разработана программа, позволяющая определять идеальный предел передаваемой генератором мощности, действительный предел мощности, определять критические значения напряжения в различных точках системы электроснабжения и, следовательно, находить значение коэффициентов запаса, соответствующие этим режимам.

В самой программе расчет ведется методом последовательного эквивалентирования, позволяющим на каждом шаге производить корректировку значений генерирующих и потребляемых мощностей в зависимости от величин напряжения и частоты, полученных на предыдущем этапе вычислений.

Расчеты показателей статической устойчивости проводились на примере

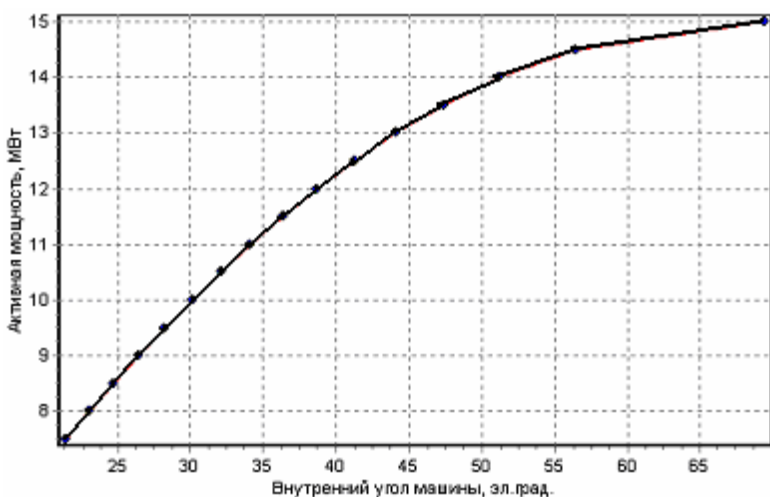


Рис. 1. Электромагнитная мощность при изменении внутреннего угла

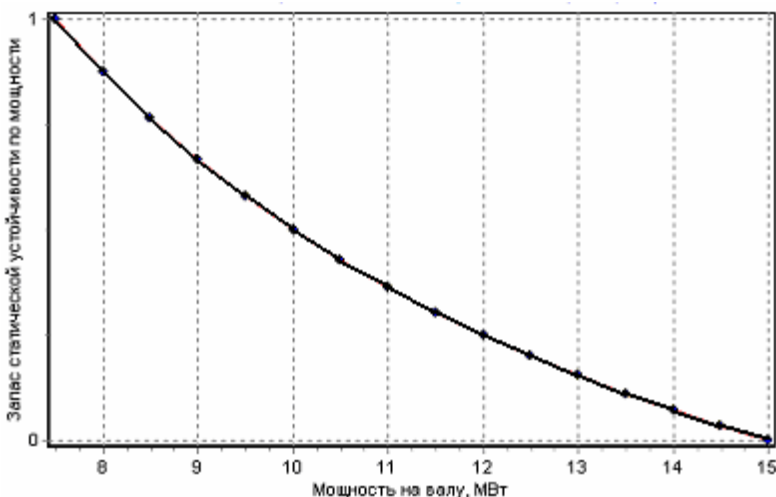


Рис. 2. Зависимость запаса устойчивости от мощности на валу генератора

центрального распределительного устройства (ЦРУ) ЦЭС ОАО «ММК».

Идеальный предел передаваемой мощности определяется по вышеприведенной формуле при неизменном напряжении на шинах электростанции. Для оценки статической устойчивости системы конечной мощности величина такого предела практического значения не имеет.

Действительный предел передаваемой мощности определялся при увеличении загрузки генератора по активной мощности. При этом изменением реактивной мощности поддерживалось постоянство полной и, следовательно, постоянство тока. Для генератора ЦРУ ЦЭС мощностью 12 МВт такой предел составляет 16,191 МВт. При работе с номинальной активной мощностью коэффициент запаса по передаваемой мощности равен 24,5%, что соответствует нормативным показателям.

На рис. 1 представлена характеристика действительного предела передаваемой электромагнитной мощности, снятая для турбогенератора ЦЭС ОАО «ММК» мощностью 12 МВт.

Как видно из графика, даже при работе генератора с коэффициентом мощности, равным единице, электромагнитная мощность не достигает максимального значения, однако коэффициент запаса статической устойчивости при этом значительно падает (рис. 2).

Полученные результаты позволяют определить предельные режимы работы генераторов, а также выяснить сочетания коэффициента мощности, коэффициента загрузки и других параметров, работа с которыми сохранит необходимый запас статической устойчивости генератора.

Как известно, отдельная от энергосистемы работа сети сопровождается как изменением частоты, так и напряжения. В связи с этим возникает необходимость введении генераторов и нагрузки при выполнении расчетов своими статическими характеристиками [3, 4].

Основную долю нагрузки ЦЭС составляют асинхронные и синхронные двигатели без автоматического регулирования возбуждения.

Статические характеристики по частоте и напряжению асинхронного двигателя, приводящего сетевой насос, приведены на рис. 3–5.

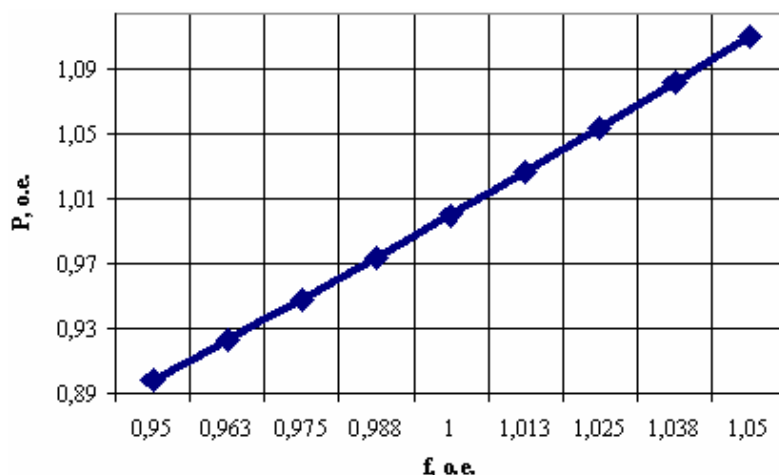


Рис. 3. Зависимость активной мощности от изменения частоты

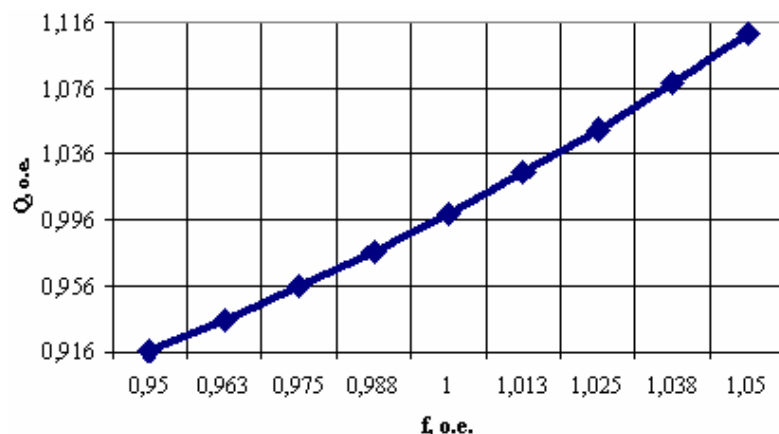


Рис. 4. Зависимость реактивной мощности от изменения частоты

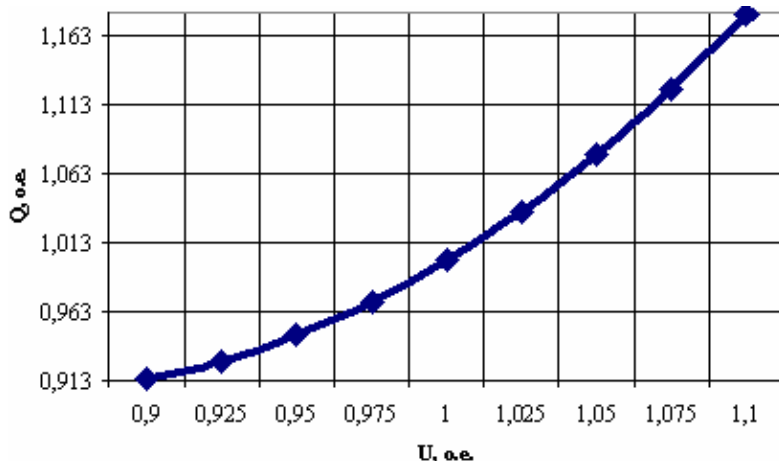


Рис. 5. Зависимость реактивной мощности от изменения напряжения

Аналогичные характеристики получены для синхронных двигателей. Их характер зависит от ряда факторов, в том числе от характера момента приводимого механизма, коэффициента загрузки, паспортных данных, для синхронных двигателей – способа регулирования возбуждения. Для расчетов целесообразно пользоваться комплексными характеристиками узла, которые могут быть получены при известном составе потребителей и их характеристик.

Генераторы также могут быть введены в расчет своими статическими характеристиками,

характер которых определяется системой автоматического регулирования по частоте и напряжению.

Таким образом, разработанная программа позволяет производить точный расчет установившегося режима с учетом изменения напряжения и частоты, строить статические характеристики отдельных электроприемников и комплексной нагрузки, определять запас статической устойчивости. Это позволит прогнозировать режимы работы сети и определять мероприятия, повышающие ее надежность.

Библиографический список

1. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 283 с.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / Под ред. Л.А.Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с., ил.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с., ил.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1970. 472 с., ил.

УДК 62-83: 621-31

З.Ш. Ишматов

КОЭФФИЦИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РОБАСТНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

1. Понятие робастной системы

Любая система автоматического управления функционирует в условиях меняющихся с течением времени параметров. Источником нестабильности объекта может быть старение элементов, их износ, температурные изменения параметров, изменение взаимного расположения отдельных элементов системы, конфигурации рабочего органа, изменения параметров технологического процесса и т.д. Кроме того, на этапе проектирования параметры объекта, как правило, точно не известны. Поэтому, хотя проектирование системы осуществляется для номинального объекта (с номинальными, или расчетными, значениями параметров), спроектированная система должна быть работоспособна и при оговоренных пределах изменения тех или иных параметров. Систему, сохраняющую свои свойства при заданном ограниченном диапазоне изменения параметров, называют *робастной*. Так, система, сохраняющая устойчивость при заданном диапазоне изменения параметров, называется *робастно устойчивой*. Робастно устойчивые системы, гарантирующие те или иные показатели процесса (например, степень устойчивости, степень колебательности и т.п.), называют *робастно модальными* системами.

Радикальное решение проблемы построения робастных систем может дать использование принципов адаптации. Однако высокая сложность адаптивных алгоритмов управления, трудности реализации и плохие динамические свойства контура адаптации часто становятся непреодолимыми препятствиями на этом пути.

Вместе с тем удовлетворительной работы системы управления в условиях изменения ее параметров часто можно добиться без использования адаптации. Для этого синтезируют систему с постоянными параметрами регулятора таким образом, чтобы даже при действии указанных возмущающих факторов качество ее работы не опускалось ниже допустимого уровня. Такие системы в общем случае не могут соперничать с адаптивными системами, которые могут оптимально перестраиваться вслед за изменением параметров объекта. Однако в тех случаях, когда не требуется предельно высокое качество регулирования, существенное преимущество таких систем, состоящее в простоте реализации, очевидно.

Синтез робастных систем с постоянными параметрами регулятора может быть выполнен на основе различных идей и методов. Это и методы, полученные в теории чувствительности и теории инвариант-

ности, минимаксный метод, использующий $\|H\|_2$ -норму или $\|H\|_\infty$ -норму, μ -анализ, частотные методы и т.д. Как правило, это достаточно сложные методы, требующие большого объема вычислений.

Вместе с тем сравнительно простой метод оценки робастной устойчивости и робастной модальности можно получить на основе анализа характеристического полинома замкнутой системы. Рассмотрим этот подход. Для этого сначала остановимся на коэффициентных методах оценки устойчивости и качества [1] систем управления.

2. Коэффициентные методы исследования устойчивости

Пусть характеристический полином замкнутой системы имеет вид:

$$A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0, \quad a_i > 0. \tag{1}$$

Для систем первого и второго порядка положительность всех коэффициентов характеристического полинома является необходимым и достаточным условием устойчивости, а при $n \geq 3$ – только необходимым, но не достаточным.

Для систем выше второго порядка введем вспомогательные параметры λ_i , образуемые четверками рядом стоящих коэффициентов полинома $A(p)$:

$$\lambda_i = \frac{a_i a_{i+1}}{a_{i-1} a_{i+2}}, \quad i = 1, 2, \dots, n-2. \tag{2}$$

Так, $\lambda_1 = \frac{a_1 a_2}{a_0 a_3}$, $\lambda_2 = \frac{a_2 a_3}{a_1 a_4}$ и т.д. Параметры λ_i называют показателями устойчивости. Для них сформулированы следующие необходимые и достаточные условия устойчивости [1].

Чтобы система с характеристическим полиномом (1) была устойчива, необходимо выполнение условий:

$$\lambda_i > 1, \quad i = 1, 2, \dots, n-2. \tag{3}$$

Приведенные необходимые условия позволяют отбросить заведомо неустойчивые системы и задают область, содержащую точную область устойчивости, найденную по необходимым и достаточным условиям устойчивости, например критериям Гурвица или Рауса.

Чтобы система с характеристическим полиномом (1) была устойчива, достаточно выполнения условий:

$$\lambda_i > 2,148, \quad i = 1, 2, \dots, n-2. \tag{4}$$

Область устойчивости, построенная по этим неравенствам, будет находиться внутри точной области устойчивости. Как правило, при использовании этих условий сужение области устойчивости незначительно и происходит это за счет отбрасывания систем с малыми запасами устойчивости.

3. Робастная устойчивость

Рассмотрим характеристический полином замкнутой системы (1), коэффициенты которого могут принимать значения в интервале $a_i \in [\underline{a}_i, \overline{a}_i]$, $0 < \underline{a}_i \leq \overline{a}_i$. Такой полином называют интервальным. В соответствии с известной теоремой Харитонова [2] **необходимым и достаточным условием робастной устойчивости полинома (1) является устойчивость лишь четырех полиномов с коэффициентами:**

$$\begin{aligned} 1) & \quad \overline{a_0} \quad \overline{a_1} \quad \overline{a_2} \quad \overline{a_3} \quad \overline{a_4} \quad \overline{a_5} \quad \overline{a_6} \quad \dots \\ 2) & \quad \underline{a_0} \quad \underline{a_1} \quad \underline{a_2} \quad \underline{a_3} \quad \underline{a_4} \quad \underline{a_5} \quad \underline{a_6} \quad \dots \\ 3) & \quad \overline{a_0} \quad \underline{a_1} \quad \overline{a_2} \quad \underline{a_3} \quad \overline{a_4} \quad \underline{a_5} \quad \overline{a_6} \quad \dots \\ 4) & \quad \underline{a_0} \quad \overline{a_1} \quad \underline{a_2} \quad \overline{a_3} \quad \underline{a_4} \quad \overline{a_5} \quad \underline{a_6} \quad \dots \end{aligned} \tag{5}$$

В [2] показано, что на основе достаточного условия устойчивости (4) и теоремы Харитонова можно доказать следующую теорему.

Для робастной устойчивости интервального характеристического полинома (1) (т.е. устойчивости для всех значений $a_i \in [\underline{a}_i, \overline{a}_i]$, $0 < \underline{a}_i \leq \overline{a}_i$) **достаточно**, чтобы удовлетворялись следующие $n-2$ условия:

$$\lambda_i^p \geq 2,148, \quad i = 1, 2, \dots, n-2, \quad (6)$$

где $\lambda_i^p = \frac{\underline{a}_i \overline{a}_{i+1}}{a_{i-1} a_{i+2}}$. Доказательство теоремы легко получить, выписав значения показателей устойчивости λ_i для всех четырех полиномов (5) и выбрав среди каждой четверки λ_i с одинаковыми индексами наименьший показатель устойчивости, который и будет равен λ_i^p .

Аналогично на основе необходимого условия устойчивости (3) и теоремы Харитонова можно показать, что **необходимым** условием робастной устойчивости являются $n-2$ неравенства:

$$\lambda_i^p \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n-2. \quad (7)$$

Понятно, что применение теоремы о необходимых условиях робастной устойчивости ограничивается теми случаями, когда требуется показать, что исследуемая система не обеспечивает робастной устойчивости.

Таким образом, если известен диапазон изменения физических параметров системы управления, то для оценки ее робастной устойчивости необходимо по ним вычислить верхние \overline{a}_i и нижние \underline{a}_i значения коэффициентов характеристического полинома замкнутой системы. Далее вычисляются показатели устойчивости λ_i^p и проверяются достаточные условия робастной устойчивости (6). Если они выполняются, то при любых изменениях параметров в рассматриваемом диапазоне система остается устойчивой. Если хотя бы одно из условий (6) не выполняется, проверяются необходимые условия (7). Если хотя бы одно из необходимых условий не выполняется, то система не является робастно устойчивой. В противном случае необходимы дополнительные исследования на основе теоремы Харитонова и необходимых и достаточных критериев устойчивости, например Гурвица или Рауса. Такой подход позволяет сократить объем расчетов по сравнению с непосредственным применением теоремы Харитонова.

Очевидно, что приведенные условия робастной устойчивости могут быть использованы и для решения обратной задачи, т.е. определения допустимого диапазона изменения коэффициентов характеристического полинома и физических параметров системы, а также для сопоставления различных систем по величине области робастной устойчивости и последующего выбора системы с максимальной областью.

4. Коэффициентные методы исследования качества

В теории автоматического управления качество и точность систем управления оценивают по различным показателям:

- 1) временным, определяемым по форме переходного процесса (время переходного процесса и другие характерные времена, перерегулирование, установившаяся ошибка и т.д.);
- 2) частотным, определяемым формой различных частотных характеристик (частота среза и другие характерные частоты, запасы устойчивости по амплитуде и фазе, добротность и т.д.);
- 3) корневым, определяемым расположением нулей и полюсов передаточной функции замкнутой системы (модули корней характеристического полинома, степени устойчивости и колебательности, а также аналогичные показатели нулей передаточной функции);
- 4) коэффициентным, определяемым набором коэффициентов передаточной функции.

Отметим, что коэффициенты передаточной функции наиболее просто и непосредственно связаны с физическими параметрами системы. Задача анализа качества и точности с использованием всех перечисленных показателей всегда разрешима и решение однозначно. Для решения задачи синтеза необходимо иметь обратные зависимости, позволяющие перейти от требуемых показателей качества и точности к искомым параметрам системы. Поэтому вполне очевиден интерес к созданию методики, позво-

ляющей формулировать требования к качеству и точности системы, ее робастности непосредственно в коэффициентной области. Для этого нужно иметь простые аналитические зависимости между теми или иными показателями устойчивости и качества системы и коэффициентами ее передаточной функции. Однако такие зависимости обычно легко могут быть найдены только для систем первого и второго порядка, для систем более высокого порядка они могут быть получены лишь приближенно.

Выше были рассмотрены коэффициентные методы исследования устойчивости (в том числе робастной) для линейных непрерывных систем. Рассмотрим теперь аналогичные методы применительно к качественным показателям работы системы.

Для этого введем ряд параметров, характеризующих форму процессов в системе и ее быстродействие (по аналогии с показателями устойчивости λ_i). Как показано в [1], форму процессов в системе с характеристическим полиномом (1) (без нулей в числителе передаточной функции) однозначно можно охарактеризовать $n-1$ показателем вида:

$$\delta_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1}a_{i+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \tag{8}$$

а показателем быстродействия может служить величина

$$\omega_0 = a_1/a_0. \tag{9}$$

Заметим, что $\lambda_i = \delta_i \delta_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots, n-2$.

Достаточно часто при решении задачи синтеза выдвигается требование аperiodичности процессов в замкнутой системе, что равносильно требованию отрицательности и вещественности всех корней характеристического полинома. Принципиально это задача решается с помощью известной теоремы Штурма, дающей необходимые и достаточные условия аperiodичности процессов, но такой путь слишком сложен для решения практических задач и может быть использован только для анализа систем. Наиболее просто эта задача в коэффициентной области решается с использованием следующего **достаточного** условия аperiodичности, сформулированного в [1].

Если для устойчивого характеристического полинома (1) при $n \geq 2$ выполняются неравенства

$$\delta_i \geq 4, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \tag{10}$$

то все его корни вещественные и отрицательные, что соответствует аperiodическому характеру процессов в замкнутой системе (разумеется, при отсутствии нулей в ее передаточной функции). Условие робастной аperiodичности интервального полинома приведено в [3] на основе теоремы, аналогичной теореме Харитонову: **аperiodичность первых двух полиномов (5) необходима и достаточна для робастной аperiodичности полинома (1) в интервале $a_i \in [\underline{a}_i, \overline{a}_i]$, $0 < \underline{a}_i \leq \overline{a}_i$.**

Если требование аperiodичности отсутствует, то часть корней характеристического уравнения могут быть комплексными, при этом процессы в системе могут носить колебательный характер. Колебательность процессов можно оценить по максимальной степени колебательности всех пар комплексно сопряженных корней. Напомним, что степенью колебательности μ пары комплексно сопряженных корней называют модуль отношения мнимой части корня к его вещественной части.

Если задана требуемая степень колебательности μ устойчивой системы, то все корни характеристического уравнения должны располагаться в секторе, ограниченном лучами, которые составляют с отрицательным направлением вещественной оси угол $\varphi = \arctg \mu$, $|\varphi| \leq \pi/2$.

Для того, чтобы все корни характеристического полинома (1) располагались в секторе $\pm\varphi$, необходимо выполнение неравенств (при $n \geq 2$) [1]:

$$\delta_i \geq \frac{(n-i+1)(i+1)}{(n-i)i} \cos^2 \varphi, \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \tag{11}$$

То есть, если для данного полинома приведенные неравенства нарушаются при каком-либо значении φ , то хотя бы одна пара комплексных корней этого полинома лежит за пределами заданного сектора $\pm\varphi$.

Таблица 1

Зависимость δ_d от порядка системы n и размера сектора $\pm\varphi$ (степени колебательности μ)

| n | $\delta_d(n, \varphi)$ при φ , град. | | | | |
|-----------|--|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | 0 ($\mu=0$) | 30 ($\mu=0,577$) | 45 ($\mu=1,0$) | 60 ($\mu=1,732$) | 90 ($\mu=\infty$) |
| 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| 3 | | | 1 | | |
| 4 | | | $1 + \sqrt{2} \approx 2,41$ | 2 | $\sqrt{2} \approx 1,41$ |
| 5 и более | | | | | 1,465 |

Для того, чтобы все корни характеристического полинома (1) располагались в секторе $\pm\varphi$, достаточно выполнения неравенств [1]:

$$\delta_i \geq \delta_d(n, \varphi), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (12)$$

где $\delta_d(n, \varphi)$ определяется из табл. 1.

Степень устойчивости η линейной непрерывной системы определяется как расстояние от мнимой оси до ближайшего к этой оси корня характеристического полинома и определяет скорость протекания самых «медленных» составляющих переходного процесса. То есть степень устойчивости может служить мерой быстродействия системы.

Достаточные условия заданной степени устойчивости можно получить, осуществив в характеристическом полиноме (1) замену p на новую переменную q подстановкой $p=q-\eta$ и используя достаточное условие устойчивости (4). Их можно сформулировать следующим образом [1]. Чтобы все корни характеристического полинома (1) лежали левее вертикальной прямой, проходящей через точку $(-\eta, j0)$, $0 \leq \eta < \infty$, достаточно выполнения условий:

$$\Delta_i - a_i - a_{i-1}(n-i-1)\eta \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n-1;$$

$$\frac{\Delta_k \Delta_{k+1}}{a_{k-1} a_{k+2}} > 2,148, \quad k = 1, 2, \dots, n-2; \quad (13)$$

$$a_0 - a_1 \eta + 2a_2 \eta^2 / 3 \geq 0.$$

Использование приведенных показателей формы δ_i и показателя быстродействия ω_0 позволяет выполнить как анализ качества разработанной системы и сравнение различных вариантов ее построения, так и синтез замкнутой системы по заданным показателям качества (быстродействие, апериодичность, степень устойчивости, степень колебательности). Кроме того, используя приведенные выше выражения, можно исследовать влияние переменных параметров системы на ее качество или установить область изменения этих параметров, при которых качество регулирования не выходит за определенные пределы.

5. Исследование чувствительности коэффициентными методами

Степень влияния отдельных параметров замкнутой системы на ее устойчивость и качество можно оценивать также и по чувствительности. При исследовании системы управления применяют различные оценки чувствительности. Это и прямые оценки, определяемые как частные производные координат системы или показателей качества и точности по варьируемым параметрам, и косвенные логарифмические или полулогарифмические оценки, и функции чувствительности передаточных функций или частотных характеристик и т.д. Однако их применение связано с определенными трудностями. Поэтому более удобными оказываются оценки чувствительности введенных выше косвенных показателей качества и точности: показателей устойчивости λ_i , показателей формы процессов δ_i и показателя быстродействия ω_0 . Введем следующие нормированные функции (коэффициенты) чувствительности к параметру σ :

чувствительность показателя устойчивости

$$S_{\sigma}^{\lambda_i} = \frac{\sigma_0}{\lambda_{i0}} \frac{\partial \lambda_i}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\sigma_0} = \frac{\sigma_0}{\lambda_{i0}} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{a_i a_{i+1}}{a_{i-1} a_{i+2}} \right) \Big|_{\sigma=\sigma_0}, \quad i = 1, 2, \dots, n-2; \quad (14)$$

чувствительность показателя формы

$$S_{\sigma}^{\delta_i} = \frac{\sigma_0}{\delta_{i0}} \frac{\partial \delta_i}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\sigma_0} = \frac{\sigma_0}{\delta_{i0}} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}} \right) \Big|_{\sigma=\sigma_0}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1; \quad (15)$$

чувствительность показателя быстродействия

$$S_{\sigma}^{\omega_0} = \frac{\sigma_0}{\omega_{00}} \frac{\partial \omega_0}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\sigma_0} = \frac{\sigma_0}{\omega_{00}} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{a_1}{a_0} \right) \Big|_{\sigma=\sigma_0}, \tag{16}$$

где σ_0 – исходное (расчетное) значение параметра σ ; λ_{i0} , δ_{i0} , ω_{00} – значения показателей устойчивости, качества и точности при расчетном значении параметра σ_0 . Если известен характер вхождения параметра σ в коэффициенты характеристического полинома (или полиномов передаточной функции регулятора и объекта), то не составляет труда получить аналитические зависимости оценок чувствительности от параметра σ во всем диапазоне его изменения.

На практике можно широко пользоваться приведенными выше функциями чувствительности. Изменяемыми параметрами могут быть как один из конструктивных параметров регулятора, возможный разброс которого может приводить к изменению качественных показателей системы, так и переменные параметры объекта управления, изменяющиеся в процессе работы системы в некоторых известных пределах.

В качестве примера использования коэффициентных оценок качества и их чувствительности рассмотрим контур регулирования тока якоря с полученными в [4] регуляторами. Расчетные (или номинальные, исходные) значения параметров объекта

$$W_o(p) = \frac{k_{тп} / R_{я}}{T_{я} p + 1} \tag{17}$$

примем равными $k_{тп0}=50$, $R_{я0}=0,1$ Ом, $L_{я0}=0,01$ Гн и $T_{я0}=L_{я0}/R_{я0}=0,1$ с. Будем считать, что в процессе работы возможно изменение коэффициента усиления преобразователя $k_{тп}$ и сопротивления якорной цепи $R_{я}$, что, в свою очередь, приводит к изменению постоянной времени $T_{я}$.

Тогда передаточная функция замкнутого контура тока с компенсационным (компенсирующим полюс объекта) регулятором

$$W_p(p) = \frac{R_{я0}(T_{я0}p + 1)}{k_{тп0}T_{я}p}, \tag{18}$$

где $T_{э}=0,02$ с, примет вид:

$$G(p) = \frac{R_{я0}k_{тп}T_{я0}}{R_{я}k_{тп0}T_{э}T_{я}} \frac{p + 1/T_{я0}}{p^2 + \frac{R_{я}k_{тп0}T_{э} + R_{я0}k_{тп}T_{я0}}{R_{я}k_{тп0}T_{э}T_{я}} p + \frac{R_{я0}k_{тп}}{R_{я}k_{тп0}T_{э}T_{я}}} = \frac{10k_{тп}(0,1p + 1)}{p^2 + (100R_{я} + k_{тп})p + 10k_{тп}}.$$

При расчетных значениях параметров объекта нуль $p=10$ сокращается с соответствующим полюсом и

$$G(p) = \frac{k_{тп}}{p + k_{тп} + 100R_{я} - 10} = \frac{50}{p + 50}.$$

С другим вариантом компенсационного регулятора

$$W_p(p) = \frac{R_{я0}(T_{я0}p + 1)}{2k_{тп0}T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}, \tag{19}$$

где $T_{\mu}=0,01$ с, передаточная функция замкнутого контура имеет вид:

$$G(p) = \frac{R_{я0}k_{тп}T_{я0}}{2R_{я}k_{тп0}T_{\mu}^2T_{я}} \frac{p + 1/T_{я0}}{p^3 + \frac{T_{я} + T_{\mu}}{T_{я}T_{\mu}} p^2 + \frac{2R_{я}k_{тп0}T_{\mu} + R_{я0}k_{тп}T_{я0}}{2R_{я}k_{тп0}T_{\mu}^2T_{я}} p + \frac{R_{я0}k_{тп}}{2R_{я}k_{тп0}T_{\mu}^2T_{я}}} = \frac{1000k_{тп}(0,1p + 1)}{p^3 + 100(1 + R_{я})p^2 + 100(100R_{я} + k_{тп})p + 1000k_{тп}}.$$

Таблица 2

Коэффициентные оценки устойчивости и качества

| Показатель | Система с компенсационным регулятором | | Система с некомпенсационным регулятором | |
|---------------------------------------|--|---|--|--|
| | (18) | (19) | (20) | (21) |
| $\lambda_1 = \frac{a_1 a_2}{a_0 a_3}$ | - | $\frac{10(100R_{я} + k_{тп})(1 + R_{я})}{k_{тп}}$ | - | $\frac{(190R_{я} + 3,62k_{тп})(1,9 + R_{я})}{2k_{тп}}$ |
| $\delta_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2}$ | $\frac{(100R_{я} + k_{тп})^2}{10k_{тп}}$ | $\frac{(100R_{я} + k_{тп})^2}{10k_{тп}(1 + R_{я})}$ | $\frac{(100R_{я} + 1,8k_{тп})^2}{100k_{тп}}$ | $\frac{(190R_{я} + 3,62k_{тп})^2}{200k_{тп}(1,9 + R_{я})}$ |
| $\delta_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3}$ | - | $\frac{100(1 + R_{я})^2}{100R_{я} + k_{тп}}$ | - | $\frac{100(1,9 + R_{я})^2}{190R_{я} + 3,62k_{тп}}$ |
| $\omega_0 = \frac{a_1}{a_0}$ | $\frac{100R_{я} + k_{тп}}{10k_{тп}}$ | $\frac{100R_{я} + k_{тп}}{10k_{тп}}$ | $\frac{100R_{я} + 1,8k_{тп}}{100k_{тп}}$ | $\frac{190R_{я} + 3,62k_{тп}}{200k_{тп}}$ |

При расчетных значениях параметров нуль числителя и один из нулей знаменателя сокращаются и

$$G(p) = \frac{100k_{тп}}{p^2 + (100R_{я} + 90)p + 100k_{тп} + 9000R_{я} - 900} = \frac{5000}{p^2 + 100p + 5000}.$$

Отсюда видно, что отклонение параметров объекта от расчетных в системе с компенсационным регулятором приводит к повышению порядка характеристического полинома на единицу относительно расчетного.

Передаточная функция замкнутого контура тока с некомпенсационным (не компенсирующим полюсы объекта) регулятором

$$W_p(p) = \frac{R_{я0}(m_1 p + 1)}{k_{тп0} n_0 p}, \quad (20)$$

где $n_0 = 2T_{\mu}^2 / \mathcal{E}_{я0}$; $m_1 = 2T_{\mu} - n_0$; $m_0 = 1$; $T_{\mu} = 0,01$ с, с учетом фильтра $W_{\phi}(p) = 1/(m_1 p + 1)$ на входе примет вид:

$$G(p) = \frac{R_{я0} k_{тп} T_{я0}}{2R_{я} k_{тп0} T_{\mu}^2 T_{я}} \frac{1}{p^2 + \frac{R_{я} k_{тп0} T_{\mu} + R_{я0} k_{тп} (T_{я0} - T_{\mu})}{R_{я} k_{тп0} T_{\mu} T_{я}} p + \frac{R_{я0} k_{тп} T_{я0}}{2R_{я} k_{тп0} T_{\mu}^2 T_{я}}} =$$

$$= \frac{100k_{тп}}{p^2 + (100R_{я} + 1,8k_{тп})p + 100k_{тп}}.$$

При расчетных значениях параметров

$$G(p) = \frac{5000}{p^2 + 100p + 5000}.$$

Использование другого варианта некомпенсационного регулятора

$$W_p(p) = \frac{R_{я0}(m_1 p + m_0)}{k_{тп0}(n_1 p + n_0)p}, \quad (21)$$

где $n_1 = 8T_{\mu}^3 / \mathcal{E}_{я0}$; $n_0 = (8T_{\mu}^2 - n_1) / T_{я0}$; $m_1 = 4T_{\mu} - n_0$; $m_0 = 1$; $T_{\mu} = 0,005$ с, дает:

$$G(p) = \frac{a_0}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{20000k_{тп}}{p^3 + (100R_{я} + 190)p^2 + (19000R_{я} + 362k_{тп})p + 20000k_{тп}},$$

где: $a_2 = \frac{1}{T_{\text{я}}} + \frac{T_{\text{я0}} - T_{\mu}}{T_{\text{я0}}T_{\mu}}$; $a_1 = \frac{T_{\text{я0}} - T_{\mu}}{T_{\text{я}}T_{\text{я0}}T_{\mu}} + \frac{R_{\text{я0}}k_{\text{тп}}(T_{\text{я0}}^2 - 2T_{\mu}T_{\text{я0}} + 2T_{\mu}^2)}{2R_{\text{я}}k_{\text{тп0}}T_{\mu}^2T_{\text{я}}T_{\text{я0}}}$; $a_0 = \frac{R_{\text{я0}}k_{\text{тп}}T_{\text{я0}}}{8R_{\text{я}}k_{\text{тп0}}T_{\mu}^3T_{\text{я}}}$.

При расчетных значениях параметров

$$G(p) = \frac{10^6}{p^3 + 200p^2 + 2 \cdot 10^4 p + 10^6}.$$

Порядок характеристического уравнения замкнутой системы с некомпенсационным регулятором при изменении параметров не меняется и остается равным расчетному.

Найдем сначала выражения для коэффициентных оценок устойчивости λ_i и качества (показателей формы δ_i и показателя быстродействия ω_0) этих систем и их значения при номинальных значениях параметров объекта. Результаты расчетов приведены в табл. 2, 3.

Из табл. 3 видно, что коэффициентные показатели устойчивости и качества для систем с компенсационными регуляторами существенно отличаются от аналогичных показателей для систем с некомпенсационными регуляторами, хотя переходные функции всех этих систем достаточно близки. Связано это с наличием нулей в передаточных функциях замкнутых систем с компенсационным и регуляторами, которые оказывают существенное влияние на качество процессов. Поэтому сравнение качества двух систем по коэффициентным показателям можно производить только в том случае, когда числители их передаточных функций одинаковы, а также совпадают порядки характеристических уравнений.

Тем не менее, коэффициентные оценки устойчивости и качества можно использовать для оценки чувствительности этих систем к изменению параметров объекта. Для этого можно использовать два подхода: во-первых, найти зависимость коэффициентных оценок от параметров объекта при их изменении в заданных пределах (результаты расчетов приведены на рис. 1, 2), во-вторых, вычислить коэффициенты чувствительности оценок устойчивости и качества по варьируемому параметрам в расчетной точке (результаты приведены в табл. 4).

При этом для удобства сравнения целесообразно использовать относительные значения как показателей качества и точности, так и варьируемых параметров. Разумеется, корректным будет сравнение между собой систем одинакового порядка, т.е. система с регулятором (18) должна сравниваться с системой с регулятором (20), а (19) – с (21).

Таблица 3

Численные значения коэффициентных оценок устойчивости и качества при номинальных значениях параметров объекта

| Показатель | Система с компенсационным регулятором | | Система с некомпенсационным регулятором | |
|----------------|---------------------------------------|-------|---|------|
| | (18) | (19) | (20) | (21) |
| λ_{10} | - | 13,2 | - | 4 |
| δ_{10} | 7,2 | 6,545 | 2 | 2 |
| δ_{20} | - | 2,017 | - | 2 |
| ω_{00} | 0,12 | 0,12 | 0,02 | 0,02 |

Таблица 4

Нормированные чувствительности коэффициентных оценок устойчивости и качества при номинальных значениях параметров

| Функция чувствительности | Система с компенсационным регулятором | | Система с некомпенсационным регулятором | |
|--|---------------------------------------|--------|---|--------|
| | (18) | (19) | (20) | (21) |
| $S_{R_{\text{я}}}^{\lambda_1} = \frac{R_{\text{я0}}}{\lambda_{10}} \frac{\partial \lambda_1}{\partial R_{\text{я}}} \Big _{R_{\text{я}}=R_{\text{я0}}}$ | - | 0,258 | - | 0,145 |
| $S_{k_{\text{тп}}}^{\lambda_1} = \frac{k_{\text{тп0}}}{\lambda_{10}} \frac{\partial \lambda_1}{\partial k_{\text{тп}}} \Big _{k_{\text{тп}}=k_{\text{тп0}}}$ | - | -0,167 | - | -0,095 |
| $S_{R_{\text{я}}}^{\delta_1} = \frac{R_{\text{я0}}}{\delta_{10}} \frac{\partial \delta_1}{\partial R_{\text{я}}} \Big _{R_{\text{я}}=R_{\text{я0}}}$ | 0,333 | 0,242 | 0,2 | 0,14 |
| $S_{k_{\text{тп}}}^{\delta_1} = \frac{k_{\text{тп0}}}{\delta_{10}} \frac{\partial \delta_1}{\partial k_{\text{тп}}} \Big _{k_{\text{тп}}=k_{\text{тп0}}}$ | 0,667 | 0,667 | 0,8 | 0,81 |
| $S_{R_{\text{я}}}^{\delta_2} = \frac{R_{\text{я0}}}{\delta_{20}} \frac{\partial \delta_2}{\partial R_{\text{я}}} \Big _{R_{\text{я}}=R_{\text{я0}}}$ | - | 0,015 | - | 0,005 |
| $S_{k_{\text{тп}}}^{\delta_2} = \frac{k_{\text{тп0}}}{\delta_{20}} \frac{\partial \delta_2}{\partial k_{\text{тп}}} \Big _{k_{\text{тп}}=k_{\text{тп0}}}$ | - | -0,833 | - | -0,905 |
| $S_{R_{\text{я}}}^{\omega_0} = \frac{R_{\text{я0}}}{\omega_{00}} \frac{\partial \omega_0}{\partial R_{\text{я}}} \Big _{R_{\text{я}}=R_{\text{я0}}}$ | 0,167 | 0,167 | 0,1 | 0,095 |
| $S_{k_{\text{тп}}}^{\omega_0} = \frac{k_{\text{тп0}}}{\omega_{00}} \frac{\partial \omega_0}{\partial k_{\text{тп}}} \Big _{k_{\text{тп}}=k_{\text{тп0}}}$ | -0,167 | -0,167 | 0,1 | -0,095 |

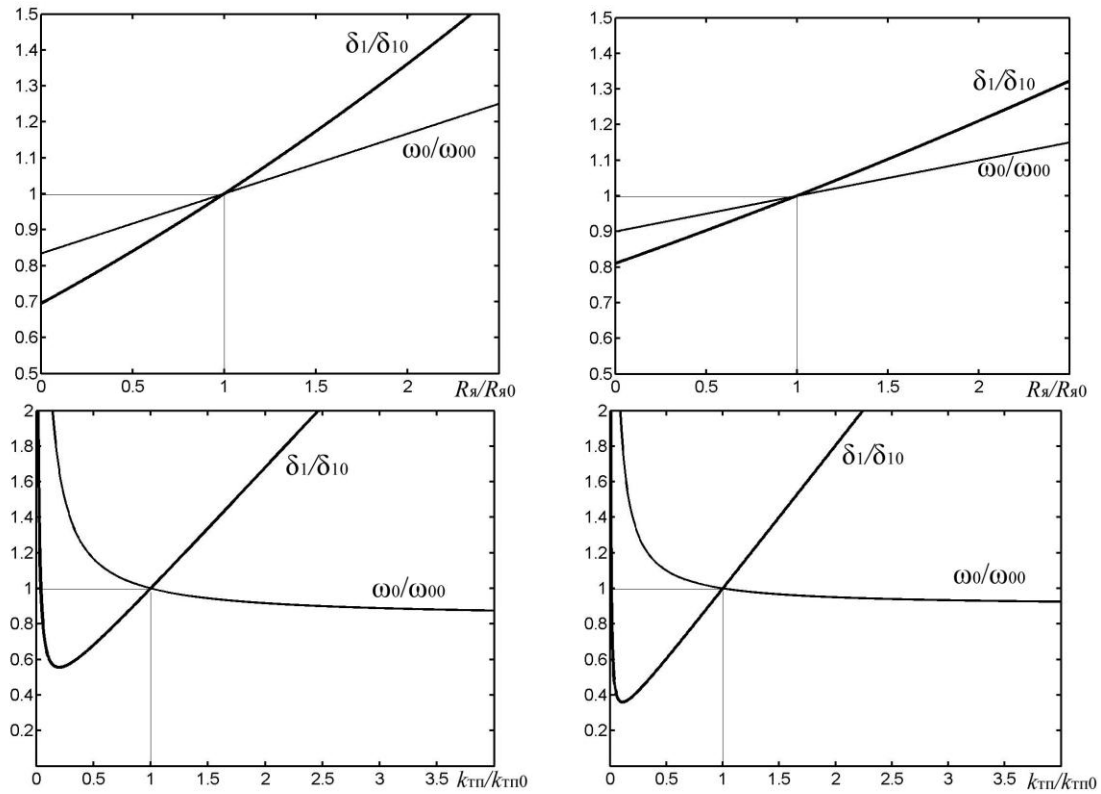


Рис. 1. Относительные значения показателя формы δ_1 и показателя быстродействия ω_0 в контуре тока с регуляторами (18) (слева) и (20) (справа) при изменении сопротивления якорной цепи $R_я$ и коэффициента усиления преобразователя $k_{тп}$

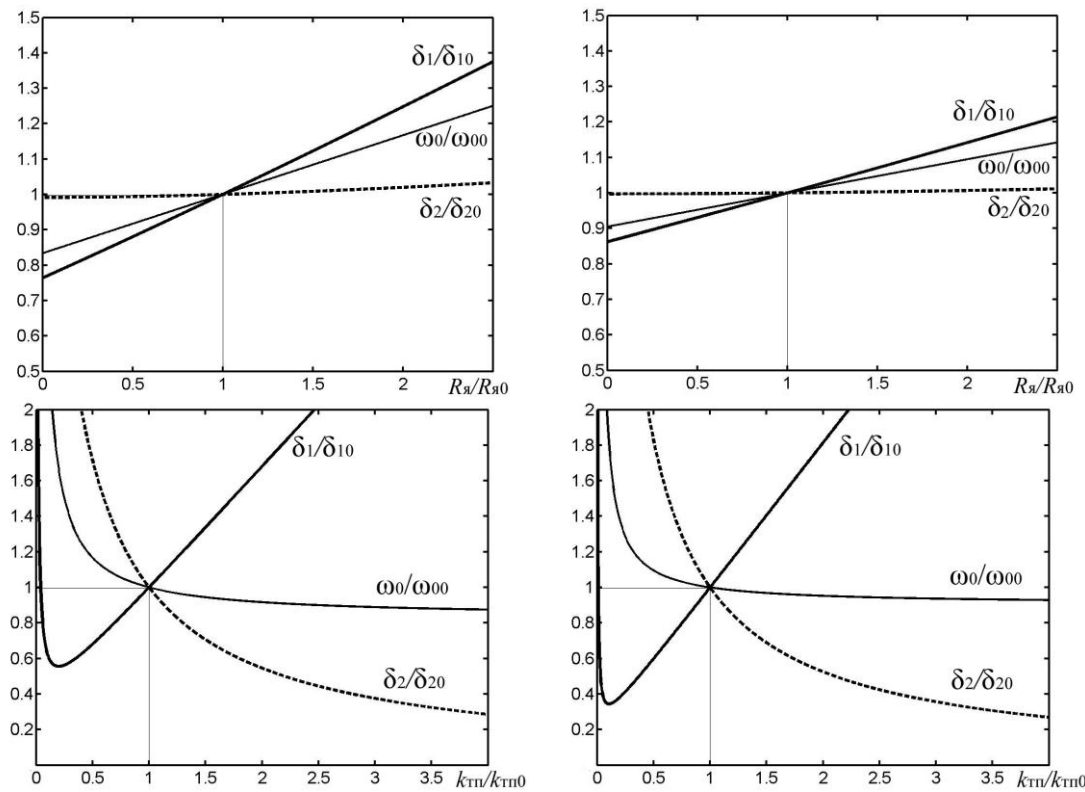


Рис. 2. Относительные значения показателей формы δ_1 и δ_2 и показателя быстродействия ω_0 в контуре тока с регуляторами (19) (слева) и (21) (справа) при изменении сопротивления якорной цепи $R_я$ и коэффициента усиления преобразователя $k_{тп}$

За базовое значение показателей качества δ_0 , ω_0 на рис. 1 и 2 и в табл. 4 приняты их значения, найденные при номинальных параметрах объекта (см. табл. 3).

Анализ рисунков и таблицы показывает, что чувствительность систем с компенсационными регуляторами оказывается в целом выше, чем систем с некомпенсационными регуляторами. Так, чувствительность к изменению сопротивления якорной цепи $R_{я}$ или, что то же самое, электромагнитной постоянной времени $T_{я}$, показателей устойчивости и качества в 1,7–1,8 раза выше у систем с компенсационными регуляторами. Это объясняется тем, что увеличение порядка характеристического уравнения происходит только при изменении $R_{я}$, при изменении $k_{тп}$ порядок характеристического уравнения остается расчетным. Исключение составляют лишь чувствительности показателей качества δ_1 и δ_2 к изменению $k_{тп}$, которые на 10–20% выше у систем с некомпенсационными регуляторами.

Справедливость сделанных выводов подтверждают и переходные процессы в рассматриваемых системах при изменении параметров объекта в 2 раза в сторону уменьшения или увеличения, приведенные на рис. 3. Из рисунка также видно, что системы с некомпенсационными регуляторами менее чувствительны и к возмущающим воздействиям.

Таким образом, коэффициентные оценки устойчивости и качества, а также их чувствительности, позволяют выполнить исследование свойств системы при заданном ограниченном изменении параметров. На основе полученных аналитических выражений этих оценок может быть решена и обратная задача – оценен допустимый разброс параметров, при котором сохраняются требуемые свойства системы. Кроме того, они могут быть полезны при сравнении альтернативных проектных решений.

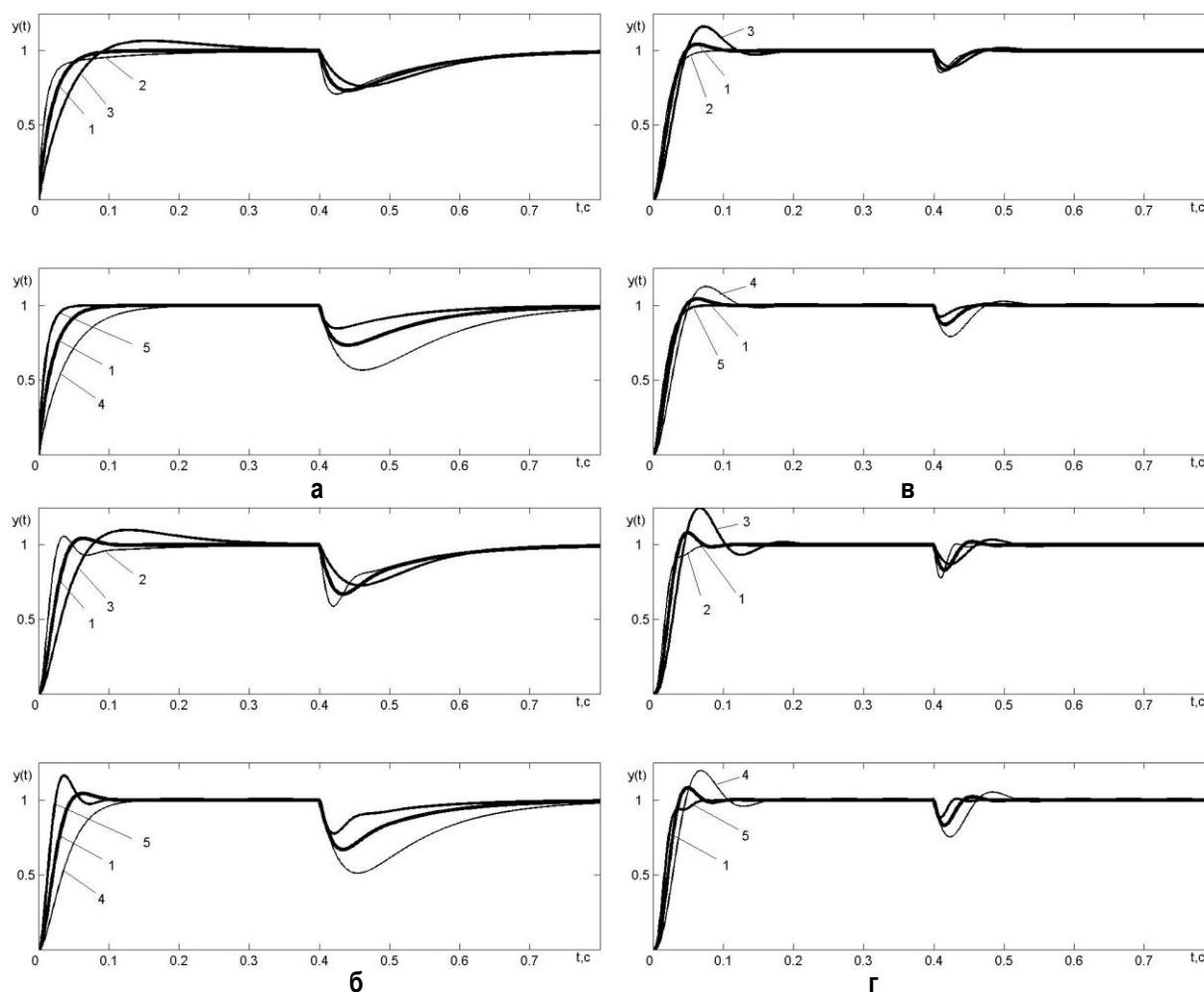


Рис. 3. Реакция на ступенчатые задающее и возмущающее воздействия в контуре тока с компенсационными (18) – (а), (19) – (б) и некомпенсационными (20) – (в), (г) – (21) регуляторами при: 1 – номинальных значениях параметров; 2 – уменьшению $R_{я}$ в 2 раза; 3 – увеличению $R_{я}$ в 2 раза; 4 – уменьшению $k_{тп}$ в 2 раза; 5 – увеличению $k_{тп}$ в 2 раза

Библиографический список

1. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами: Инженерные методы анализа и синтеза / Б.Н.Петров, Н.И.Соколов, А.В.Липатов и др. М.: Машиностроение, 1986. 256 с.
2. Джури Э.И. Робастность дискретных систем. Обзор // Автоматика и телемеханика. 1990. № 5. С. 3–28.
3. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Робастная устойчивость линейных дискретных систем // Доклады АН СССР. 1991, Т. 316. № 4. С. 842–846.
4. Ишматов З.Ш., Волков М.А., Плотников Ю.В. Метод полиномиальных уравнений для синтеза непрерывных регуляторов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. трудов. Вып.11. Магнитогорск: МГТУ, 2006.

УДК 621.313.333:001.891.57

А.С. Сарваров, С.А. Демин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАШИНЫ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ ВАЛКОВ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ АВК

Анализ состояния электроприводов центробежных машин горизонтального типа для отливки листопрокатных валков как отечественных, так и зарубежных производителей показывает, что основная часть подобных систем реализована на базе электропривода переменного тока. Ввиду того, что исполнительные механизмы таких установок обладают весьма большим моментом инерции и характеризуются высоким электропотреблением, актуальным остается вопрос снижения общего потребления электроэнергии и возможности ее рекуперации в сеть.

На кафедре электроники и микроэлектроники Магнитогорского государственного техническо-

го университета разработан проект реконструкции машины центробежного литья валков, действующей в цехе изложниц ЗАО «МРК» ОАО «ММК». В настоящее время вращение приводных роликов центробежной машины осуществляется двумя гидравлическими двигателями, которые питаются от одной гидросистемы. Давление в ней создается гидронасосом, электропривод которого реализован на базе асинхронного двигателя мощностью 200 кВт (номинальное напряжение 0,4 кВ, ток статора 350 А). Основным недостатком такой системы является отсутствие возможности рекуперации запасенной механической энергии вращения в электрическую сеть при торможении, что становится возможным только при переходе к электроприводу переменного тока [1].

Предполагается реализация привода установки по системе АВК (асинхронный вентильный каскад) [1] на базе двух асинхронных двигателей с фазным ротором. Разработана оригинальная силовая схема 2-двигательного АВК с возможностью работы в режиме торможения противовключением (рис. 1).

Особенностью построения данной схемы является соединение между собой статорных и роторных цепей двух двигателей. В двигательном режиме их статоры подключаются к сети через общее коммутирующее устройство, что обеспечивает одновременную подачу питающего напряжения. В режиме противовключения предложено реализовать последовательное соединение статорных обмоток двигателей, что позволяет в два раза снизить напряжение на каждом из них. При этом, что очень важно, величина начальной ЭДС скольжения ротора в режиме противовключения будет такой же, как и в момент пуска двигателей при питании их полным напряжением.

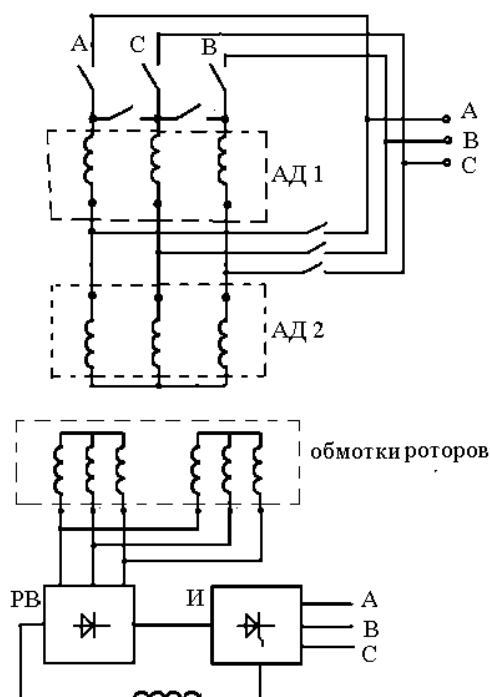


Рис. 1. Силовая схема электропривода установки

Соединение между собой обмоток ротора позволяет синхронизировать вращение приводных роликов и обеспечить выравнивание нагрузок между ними. Следует отметить, что при реализации противовключения в предложенной схеме нет необходимости завышать вдвое параметры элементов роторного выпрямителя (РВ) и напряжение инвертора (И). Кроме того, в этом режиме можно формировать тормозной момент заданной величины во всем диапазоне частоты вращения. В данном режиме асинхронный двигатель работает как генератор, преобразующий механическую энергию в электрическую, и как трансформатор, передающий энергию из сети в цепь ротора.

Поскольку процессы электромеханических преобразований на данной установке являются довольно сложными, то для проектирования силовой схемы, а также системы управления двигателями была разработана математическая модель электропривода центробежной машины (рис.2), в основу которой заложены исходные данные, полученные в результате расчета инерционных и мощностных параметров системы [2]. Моделирование осуществлялось в среде MatLab версии 6.5.

На рис.2 представлены функциональные блоки, используемые при моделировании системы, основные из которых:

- AD1, AD2 – асинхронные двигатели приводных роликов установки;
- DB – неуправляемый роторный выпрямитель;
- TT – инвертор, ведомый сетью;

- Ld – сглаживающий дроссель;
- R – токоограничивающий реактор;
- SIFU – блок системы управления;
- POWER – питающая сеть.

Кроме того, в модели предусмотрены необходимые цифровые контрольно-измерительные приборы (амперметры, вольтметры, датчики скорости и т.д.), сигналы с которых отображаются на многоканальных осциллографах, что позволяет с высокой степенью точности анализировать переходные процессы, а также статические режимы работы центробежной машины.

Функциональный блок SIFU представляет собой набор системной логики для реализации алгоритмов управления инвертором. Угол управления тиристорами с общим катодом β_1 принимается равным 30 эл. градусов, а угол управления тиристорами с общим анодом β_2 варьируется в диапазоне от 0 до 150 эл. градусов в зависимости от необходимой частоты вращения двигателей. Расчетные осциллограммы противоЭДС инвертора при различных углах регулирования в случае использования алгоритмов несимметричного управления [2] представлены на рис. 3.

На рис. 4 приведены расчетные механические характеристики АВК при различных углах управления β , где M_c – момент сопротивлений, а M_d – момент, развиваемый двигателем при разгоне роликов до рабочей частоты вращения с постоянным угловым ускорением, равным $\xi = 0,67 \text{ c}^{-2}$, за время $t = 190 \text{ с}$. Момент сопротивлений M_c является ве-

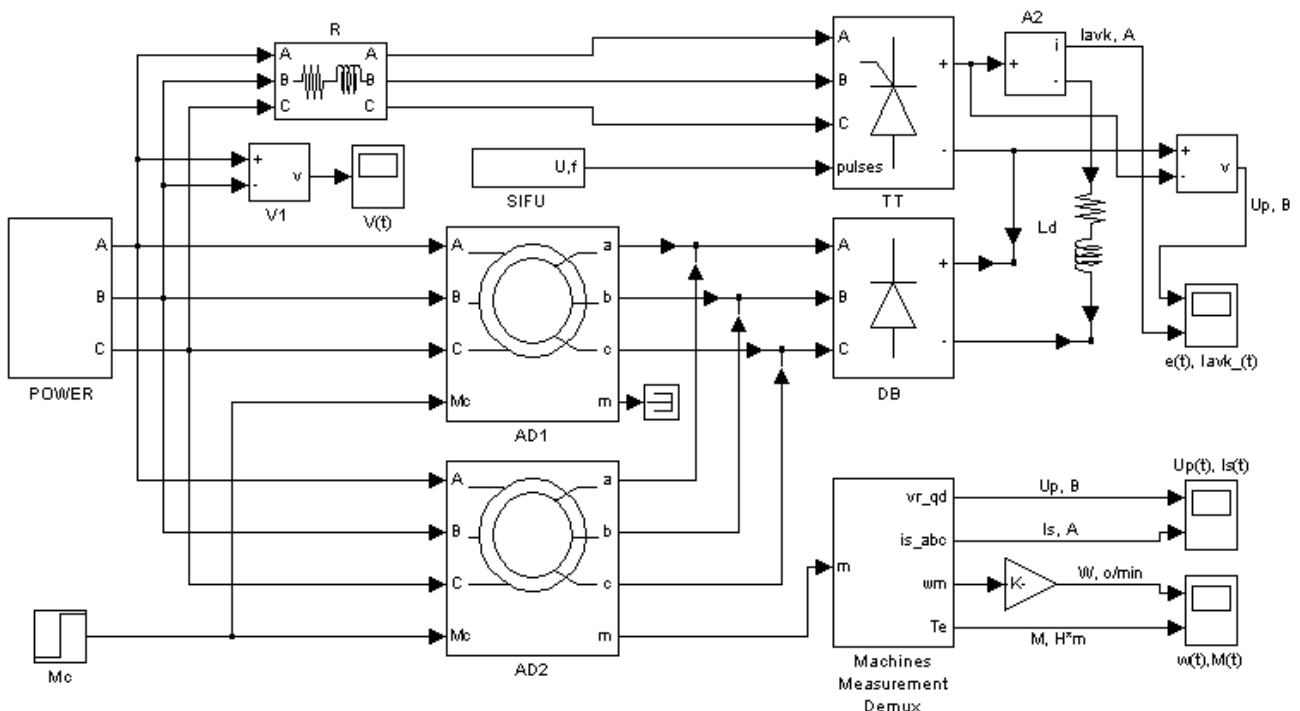


Рис. 2. Математическая модель электропривода центробежной машины в среде MatLab

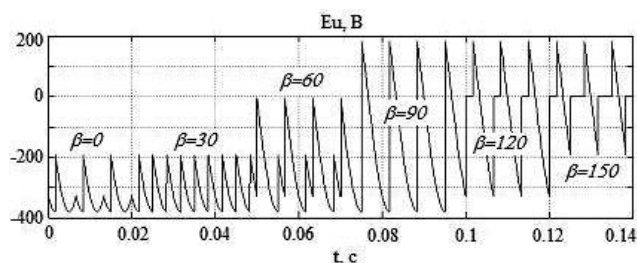


Рис. 3. Расчетные осциллограммы противоЭДС инвертора при различных углах управления β



Рис. 4. Расчетные механические характеристики АВК

личиною постоянной, так как определяется только фрикционной связью между роликами и кокилем и не зависит от скорости вращения изложницы.

Поскольку время, необходимое для разгона или торможения электродвигателей, согласно технологии лежит в пределах от 2 до 4 мин, то при моделировании динамических режимов выполнялись операции по масштабированию расчетных осциллограмм, а именно уменьшению времени моделирования с сохранением энергетических параметров системы, в частности динамического момента, а, следовательно, и токов. Исходя из того, что при равноускоренном движении для поддержания постоянства динамического момента, отношение момента инерции на валу двигателя ко времени разгона (торможения) машины необходимо поддерживать величиной постоянной, можно сделать вывод о том, что при уменьшении времени разгона (торможения) пропорционально должно уменьшаться значение момента инерции. Аналитически это можно выразить из основного уравнения движения электропривода:

$$M - M_c = J \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t}; \tag{1}$$

$$\frac{J}{\Delta t} = \text{const}, \tag{2}$$

где M – момент на валу двигателя; M_c – момент сопротивлений; J – момент инерции, $\Delta\omega$ – изменение угловой скорости за время Δt .

Суммарный момент инерции, приложенный к валу двигателя, согласно расчетам [3] составляет $J = 1280 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, а минимальное время разгона роликов $\Delta t = 190 \text{ с}$. Уменьшая значение времени до $\Delta t = 4 \text{ с}$, получаем момент инерции $J = 13,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ при неизменном динамическом моменте.

На рис.5 представлены расчетные осциллограммы для скорости ω , момента M , токов статора I_s и выпрямленного тока ротора I_d при разгоне роликов литейного агрегата до рабочей частоты вращения с учетом операций масштабирования по времени. Постоянство ускорения обеспечивается плавным изменением угла управления β в диапазоне от 120 до 145 эл. градусов (см. рис. 4). Как видно из осциллограмм, разработанная система электропривода позволяет обеспечить требуемый динамический момент, а следовательно, и заданный темп разгона (торможения) приводных роликов под нагрузкой. Выбор целесообразного темпа разгона кокиля зависит от многих факторов, среди них определяющими являются технологические и технико-экономические. Основным технологиче-

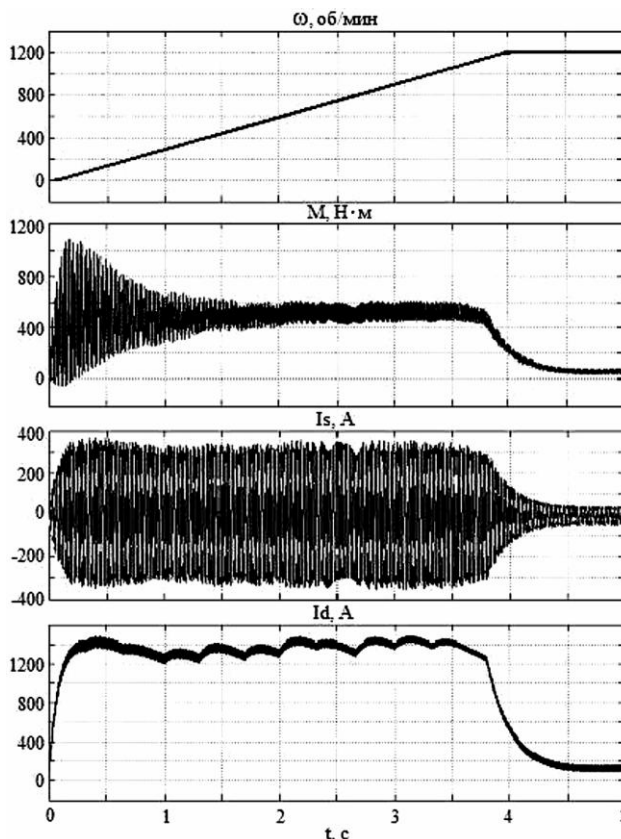


Рис. 5. Расчетные осциллограммы $\omega=f(t)$, $M=f(t)$, $I_s=f(t)$, $I_d=f(t)$ в режиме разгона электродвигателей приводных роликов установки

ским фактором является обеспечение при разгоне привода сцепления между приводными роликами и самим кокилом. Завышенный темп может привести к пробуксовкам. В то же время с учетом возможности уменьшения времени разгона на 20% без снижения нагрузки, а также коррекции темпа разгона с целью выбора благоприятного по нагреву режима работы АД рекомендуется выбор 2-х электродвигателей мощностью 55 кВт каждый. При моделировании системы использовались паспортные данные электродвигателя промышленного назначения АК2-82-4.

Ожидаемые результаты от реконструкции машины центробежного литья валков на основании моделирования заключаются в следующем:

1. Снижение стоимости установки при условии использования системы электропривода отечественных производителей до 70%, а срока окупаемости оборудования – практически вдвое.
2. Снижение общего энергопотребления центробежной машины до 40% при увеличении загрузки в 1,5 раза.
3. Уменьшение массогабаритных показателей установки в целом.
4. Снижение эксплуатационных расходов за счет перехода от гидравлической системы к электрическому приводу.
5. Повышение энергетической эффективности центробежной машины ввиду возможности торможения с рекуперацией механической энергии в сеть.
6. Система АВК с предложенной схемой соединения статорных и роторных обмоток позволит реализовать все требования, предъявляемые к приводу установки с точки зрения рационального потребления электроэнергии и экономии дорогостоящих материалов.

Библиографический список

1. Онищенко Г.Б. Асинхронный вентильный каскад. М.: Энергия, 1972.
2. Хватов С.В., Титов В.Г. Проектирование и расчет асинхронного вентильного каскада: Учеб. пособие. Горький: ГГУ им. Н.И. Лобачевского, 1977.
3. Сарваров А.С., Демин С.А. Оптимизация процесса центробежного литья валков // Электротехнические комплексы и системы: Межвуз. сб. науч. трудов. Вып. 11. Магнитогорск, МГТУ. 2006.

УДК 662.942.2:621.783.245

В.В. Копцев

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОВЫХ ОДНОСТОПНЫХ КОЛПАКОВЫХ ПЕЧЕЙ

Высокая энергоемкость металлургического производства при относительно высокой стоимости энергоресурсов обуславливает исключительную важность энергосбережения на всех переделах. Средние удельные затраты на производство 1 т стали в развитых странах в последние два десятилетия были снижены на 25–30%. В то же время показатели энерго- и материалоемкости производства металлопродукции в РФ существенно уступают зарубежным аналогам [1].

На предприятиях черной металлургии России одним из крупнейших потребителей природного газа являются колпаковые печи, в которых проходит термообработку значительная часть листового проката. Существующие горелочные устройства таких печей обладают повышенным расходом топлива по сравнению с аналогами западных стран, что увеличивает энергозатраты при производстве металлопродукции.

Для отопления широко используемых газовых одностопных колпаковых печей конструкции

СТАЛЬПРОЕКТ применяются инжекционные горелки. Эти горелочные устройства имеют ряд недостатков [2], такие как зависимость производительности и устойчивости работы от давления, малые пределы регулирования. Кроме того, они обладают короткими, сосредоточенными факелами, приводящими к ухудшению эксплуатационных характеристик и выходу из строя муфелей.

Для разработки более совершенного энергосберегающего сожигательного устройства для колпаковых печей необходимо проанализировать условия сжигания топлива в пространстве «колпак – муфель» колпаковой печи и создаваемые при этом условия теплообмена.

В нагревательных колпаках печей, установленных в термическом отделении ЛПЦ-5 ОАО «ММК», 16 инжекционных горелок расположены тангенциально по окружности в два яруса в шахматном порядке в нижней части колпака. Теплообмен в системе «муфель – продукты сгорания – внутренняя поверхность колпака» необходимо

организовать так, чтобы температура на поверхности отжигаемого рулона стали не превышала 720°C . При этом не должен происходить местный чрезмерный перегрев поверхности муфеля в точках соприкосновения факела и муфеля, поскольку это ведет к деформации муфеля, появлению «языковых» раздутий и выходу муфеля из строя.

Площадь контакта муфеля и факела определяется размерами сечения факела и углом, под которым он направлен по отношению к цилиндрической поверхности муфеля. При тангенциальном расположении горелок пространство возможных тангенциальных и близких к ним направлений оси горелки ограничено (рис. 1). Это ограниченное пространство «колпак – муфель» не позволяет равномерно и активно использовать факел горелочного устройства, что приводит к неэффективной организации теплообмена.

В свою очередь, площадь контакта определяет, в основном, количество теплоты, переданной в подмуфельное пространство, причем, чем выше температура такого контакта, тем выше интенсивность теплопереноса. Поэтому для интенсификации теплообмена необходимо стремиться к увеличению поверхности контакта между факелом и муфелем в системе теплообмена «муфель – продукты сгорания – внутренняя поверхность колпака». Это можно обеспечить за счет изменения ориентации горелки. Предлагается применить вместо тангенциального расположения наклонно-тангенциальное расположение горелки, при котором ее ось направлена тангенциально к поверхности муфеля и наклонена вниз на некоторый угол.

Увеличить поверхность контакта можно также за счет увеличения длины факела. Однако, как отмечалось выше, одним из недостатков ин-

жекционных горелок является малая длина факела. Кроме того, коэффициент расхода воздуха инжекционных горелок напрямую зависит от расхода газа через горелку и зачастую принимает нежелательные значения. При этом необходимо учесть, что коэффициент расхода воздуха определяется в первую очередь степенью смешения топлива и окислителя, которая, в свою очередь, зависит от схемы смешения и кинетической энергии истекающих потоков.

На основании вышесказанного сформулируем требования к горелочному устройству для колпаковых печей, обеспечивающему рациональный теплообмен в системе «муфель – продукты сгорания – внутренняя поверхность колпака».

1. Высокая скорость истечения природного газа через сопло горелочного устройства для создания высокоэнергетического потока в целях обеспечения требуемой длины факела – не менее 60 калибров (относительных расстояний x/d_0 , x – расстояние по оси от горелочного сопла диаметром d_0) [3].
2. Возможность точного регулирования величины коэффициента расхода воздуха.
3. Обеспечение высокой степени эжекции спутного потока воздуха для лучшего смешения его с топливом.
4. Создание рациональной конфигурации зоны горения, обеспечивающей наибольшее «прилегание» поверхности факела к внутренней поверхности футеровки печи и поверхности муфеля.
5. Равномерное горение по всей длине факела при требуемой температуре для обеспечения необходимых условий теплообмена.

Для максимального смешения природного газа с потоком воздуха необходимо обеспечить максимально возможную энергию газового потока. Энергия газового потока в данном случае является функцией скорости. Наиболее существенное увеличение энергии обеспечивается за счет достижения сверхкритических скоростей газового потока. Основным средством получения сверхкритических скоростей являются сопла Лавалю. Для подобной же цели служат сопла с центральным телом, они значительно короче обычных сопел Лавалю, проще в изготовлении и в отличие от последних дают очень небольшое снижение относительного импульса при давлениях значительно ниже расчетного, поскольку из-за отсутствия стенок в сверхзвуковой части не происходит перерасширения газа.

Автором разработана высокоскоростная горелка с центральным телом ГЦТ. Конструкция сопла этого горелочного устройства (рис. 2) по-

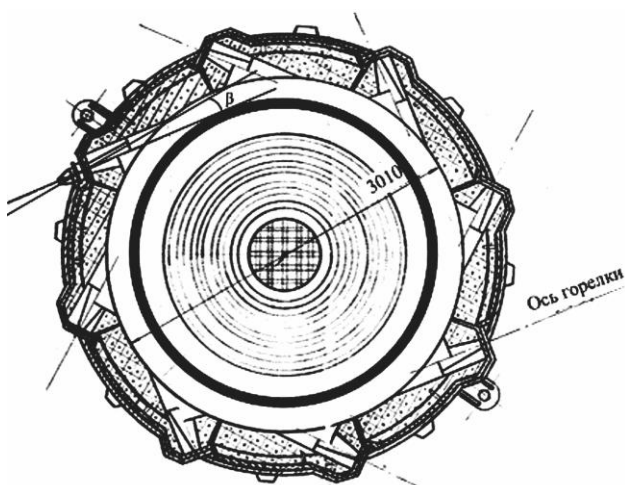


Рис. 1. Схема возможных тангенциальных и близких к ним направлений (угол β) расположения оси горелки

добна соплу с центральным телом турбореактивного двигателя (ТРД) [4].

В таком сопле газ истекает из кольцевого канала (между центральным телом и обечайкой). Размер критического сечения «кр – кр» может регулироваться продольным перемещением центрального тела 1.

На основании результатов расчетов был изготовлен опытный образец горелки с центральным телом ГЦТ-К для колпаковой печи, схема которого приведена на рис. 3. В целях получения сверхкритических скоростей истечения газового потока используется сопло с центральным телом, в котором выходное сечение образовано выходным коническим соплом 9 и соответствующим ему наибольшим сечением обратно-двухконусного центрального тела специфической формы 1, обеспечивающим наиболее полное смешение истекающего через сопло газового потока с эжектируемым воздухом.

Горелочное устройство работает следующим образом. Газ, проходя через входной патрубок, попадает в газовой тракт рассчитанной длины и через выходное коническое сопло 9 истекает со сверхзвуковой скоростью. Попадая на поверхность выходного конуса центрального тела 1, он эжектирует воздух, подаваемый через воздушную трубу 2. Установочный винт 6 служит для точного позиционирования центрального тела с помощью штока 7 для создания сверхкритической скорости истечения газового потока из сопла. Для центрирования положения газового канала служат четыре лопасти 8.

Исследования работы горелочного устройства было решено проводить в термическом отделении ЛПЦ-5 ОАО «ММК», используя топливо и воздух непосредственно с работающей колпаковой печи. Это позволяло использовать возможности изменения расходов топлива и воздуха в соответствии с

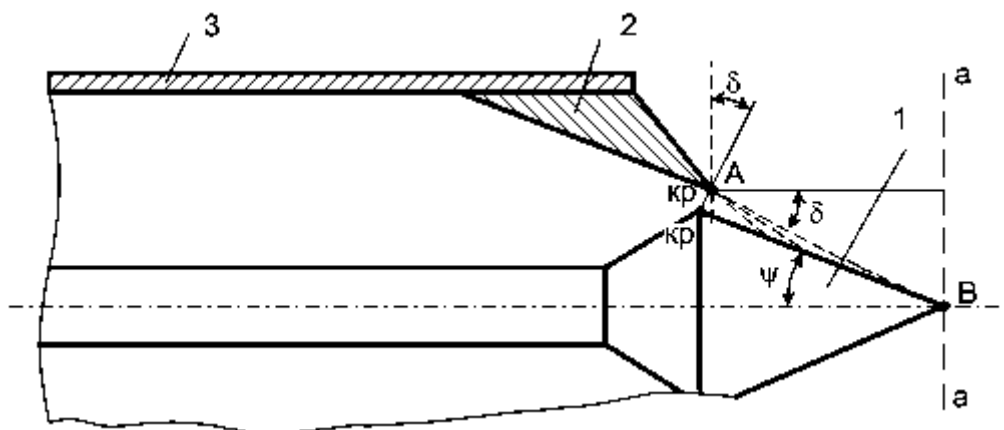


Рис. 2. Схема горелки с центральным телом: 1 – центральное тело; 2 – обечайка; 3 – корпус

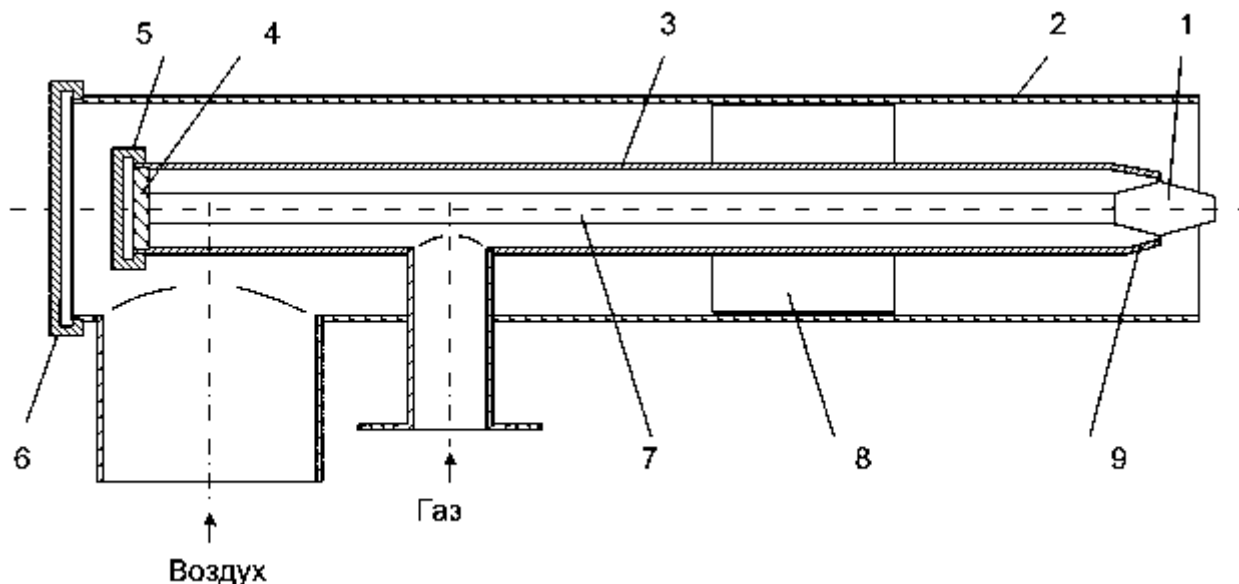


Рис. 3. Схема горелочного устройства с центральным телом для колпаковой печи ГЦТ-К

существующими режимами отжига. Программа испытаний предусматривала исследование работы горелки ГЦТ-К при использовании различного рода насадок, имитирующих противодействие в печи, а также при использовании имитатора горелочного канала колпаковой печи.

В случае создания небольшого противодействия при расходе топлива, меньше номинального, удалось получить устойчивое горение топлива при достаточной длине факела (рис. 4). Она соответствовала расчетной длине, полученной на основе моделирования аэродинамики газового тракта, и составляла около 500–600 мм.

Увеличение расхода топлива до номинального при одновременном увеличении расхода воздуха не приводит к нарушению устойчивости процесса горения. При этом формируется более рациональная форма факела, причем срыва пламени при этом не происходит. Голубой цвет пламени факела свидетельствует, что горение топлива происходит с коэффициентом расхода воздуха, близком к единице. Температура факела приблизительно 1300–1400°C. Угол раскрытия полученного факела составляет 15–18°, что хорошо согласуется с результатами моделирования аэродина-



Рис. 4. Устойчивое горение при номинальных расходах топлива и воздуха

мики газового тракта. Небольшой угол раскрытия факела позволяет располагать его в ограниченном пространстве «колпак – муфель» без прямого контакта с поверхностью муфеля. Это дает возможность повысить температуру факела по сравнению с инжекционными горелками и улучшить условия теплообмена в системе «муфель – продукты сгорания – внутренняя поверхность колпака», не опасаясь недопустимого перегрева муфеля.

Библиографический список

1. Афонин С.З., Мурунец С.В. О необходимости усиления государственного регулирования цен (тарифов) на продукцию и услуги топливно-энергетического комплекса России // *Черная металлургия*. 1999. № 1–2. С. 8–10.
2. *Металлургическая теплотехника: В 2 т. Т. 2. Конструкция и работа печей: Учебник для вузов / Кривандин В.А., Неведомская И.Н., Кобахидзе В.В. и др. М.: Металлургия, 1986. 592 с.*
3. Совершенствование теплового и температурного режимов работы одностопной газовой колпаковой печи ЛПЦ-5: Отчет по НИР / Магнитогорск. гос. техн. ун-т; Руководитель работы В.В.Копцев; № ГР 01200510640. Магнитогорск, 2005. 59 с.
4. Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика: В 2 ч.: Учеб. руководство для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 304 с.*

УДК 662.942.2.001.57

В.В. Копцев

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ СОПЛА ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

Работа горелочного устройства, основанного на теории сопла с центральным телом [1, 2], в основном зависит от характера истечения газового потока из сопла, так как газовый поток истекает с гораздо большей скоростью, чем воздушный. Ха-

рактер истечения определяет условия перемешивания газового и воздушного потоков и, в свою очередь, условия сгорания. Поэтому наибольший интерес представляет исследование на физической модели аэродинамики газового тракта.

Схема моделирования газового тракта горелки с центральным телом (ГЦТ) приведена на рис. 1.

Схема установки моделирования приведена на рис. 2, а общий вид установки, которая представляет собой универсальный стенд, – на рис. 3. Воздух, имитирующий топливо (природный газ), поступает по воздуховоду 1 через сопло 2 модели. Измерение скоростного давления производится трубкой Прандтля 3, присоединенной к микроманометру 4. Перемещение трубки Прандтля вдоль и поперек оси струи осуществляется с помощью координатника 5. Около горизонтальных направляющих координатника укреплена линейка со шкалой 6 для измерения длины струи. Изменение расхода воздуха через модель производится с помощью поворотной заслонки 7. Измерение пьезометрического давления воздуха перед соплом производится водяным U-образным манометром 8.

При моделировании использовались следующие данные:

- 1) параметры природного газа:
 температура 20°C ,
 вязкость $\nu_z = 13,21 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$,
 расход $G_z = 13,7 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- 2) параметры воздуха, имитирующего природный газ:
 температура 20°C ,
 вязкость $\nu_g = 15,03 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$,
 расход $G_g = 60 \text{ л/мин}$.

Газодинамические потоки при выполнении условия автомодельности считаются подобными, если в сходственных сечениях геометрически подобных модели и образца критерии Рейнольдса Re равны между собой [3]. Для воспроизведения на модели полей давления необходимо соблюсти определенное соотношение количества движения секундных расходов натуральной и моделирующей сред:

$$\frac{Re_m}{Re_0} = M \cdot \frac{G_z \cdot \nu_0}{G_g \cdot \nu_m} \tag{1}$$

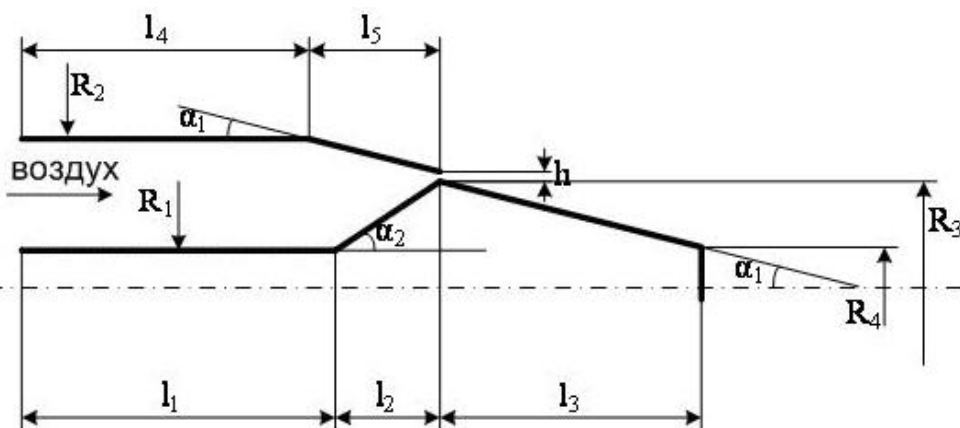


Рис. 1. Схема моделирования газового тракта горелочного устройства (ГЦТ)

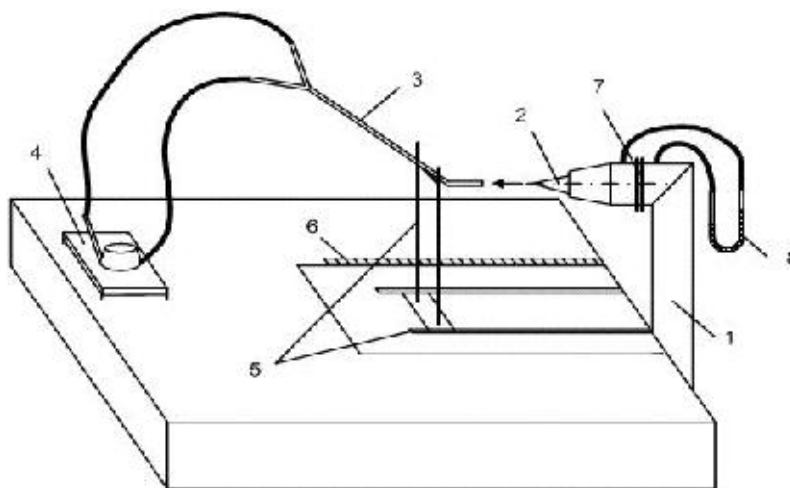


Рис. 2. Схема установки моделирования



Рис. 3. Установка моделирования

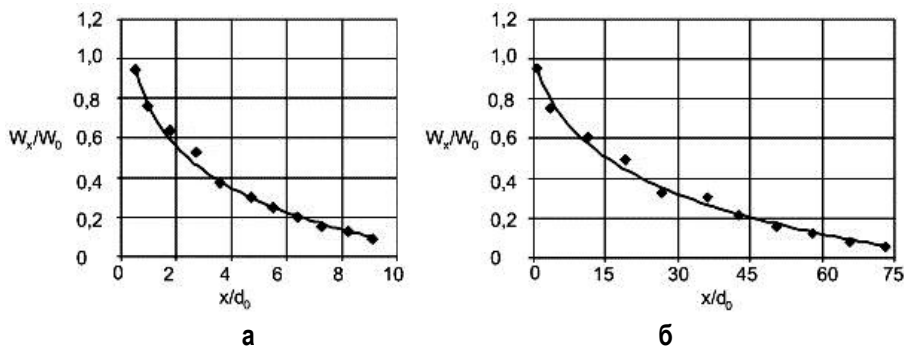


Рис. 4. Длина струи, истекающей из сопла с завихрителем (а) и истекающей из сопла без крутки потока (б)

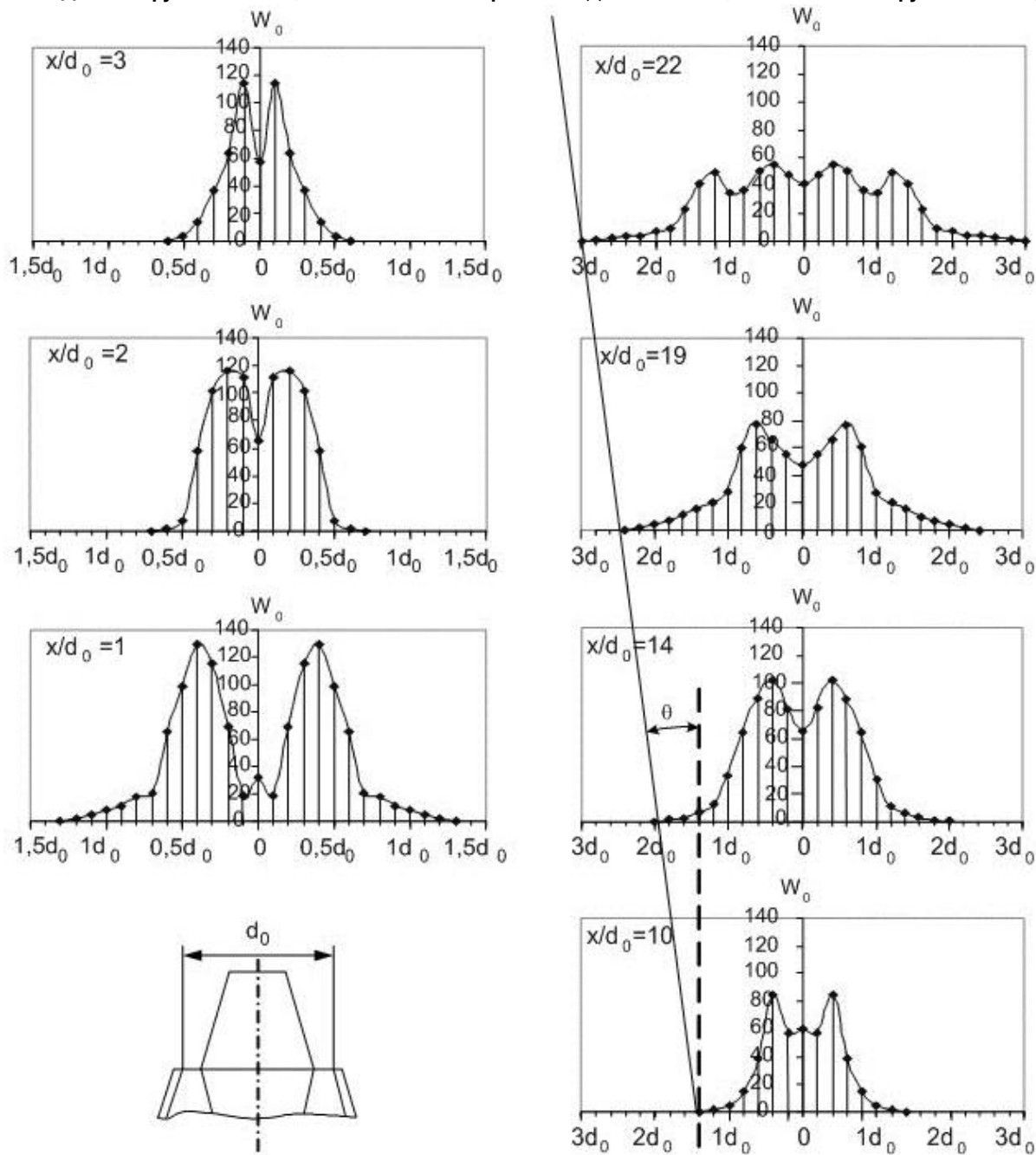


Рис. 5. Эпюры скоростей истечения газового потока для разных относительных расстояний x/d_0 ($\theta = 8^\circ - 1/2$ угла раскрытия струи)

Необходимо выбрать такой масштаб модели M , чтобы выражение (1) было равно единице. Найденное значение масштаба $M = 4,33$.

Результаты моделирования представлены в виде кривых, приведенных на **рис. 4**. На этих рисунках по оси ординат отложена относительная осевая скорость W_x / W_0 , где W_0 – скорость газового потока в выходном сечении сопла, W_x – скорость газового потока в осевом направлении на расстоянии x от выходного сечения сопла. По оси абсцисс отложено относительное расстояние (так называемый калибр) x / d_0 , где d_0 – диаметр выходного сопла горелочного устройства.

Исследования на модели позволили установить, что длина факела при использовании газового потока, закрученного с помощью завихрителя особой конструкции [1], составляет всего около десяти относительных расстояний (калибров), что иллюстрирует **рис. 4, а**.

Для увеличения длины струи было решено исключить из модели и соответственно из самого горелочного устройства завихритель газового потока. Газовая струя при этом удлинилась примерно в 6 раз (**рис. 4, б**).

На **рис. 5** приведены распределения скоростей газового потока на различных расстояниях от среза сопла горелочного устройства. Эпюры построены для различных относительных расстояний (калибров) x / d_0 , равных 1,0; 2,0; 3,0; 10,0; 14,0; 19,0 и 22,0. Наименьшим из них было выбрано $x / d_0 = 1,0$, т.к. из-за выступающей части центрального тела

входное отверстие трубки Прандтля расположить по оси горелки ближе к срезу сопла нельзя. Анализ эпюр скоростей показывает, что при выявленном характере распределения скоростей газового потока на расстоянии от среза сопла горелки, составляющем примерно до 30 калибров, струя имеет внешний слой. Он представляет собой тонкостенный тороид, а внутри него существует зона турбулентной рециркуляции [4]. За счет этого осуществляется эффективное перемешивание истекающего потока и окружающей среды. На расстоянии 22 калибров и более характер истечения меняется, тороидальный внешний слой потока исчезает. Однако необходимо отметить, что зона турбулентной рециркуляции с возрастанием длины струи увеличивается и при $x / d_0 = 22$ полностью заполняет внутреннюю полость струи.

Выводы

Изготовлена модель газового тракта горелки с центральным телом ГЦТ и на холодной модели исследована аэродинамика истечения газового потока. Результаты исследования на модели показали, что при использовании разработанного горелочного устройства ГЦТ длина струи на модели достигает 60 и более относительных расстояний (калибров). Это позволяет сделать вывод, что при диаметре сопла горелки 8 мм на объекте может быть достигнута длина факела 480 мм и более.

Библиографический список

1. Копцев В.В. Совершенствование горелочных устройств вращающихся печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 2003. № 1. С. 52–54.
2. Копцев В.В. Горелочное устройство вращающихся печей // Металлург. 2004. № 12 С. 37–38.
3. Металлургическая теплотехника. В 2-х томах. Т. 1. Теоретические основы: Учеб. для вузов / Кривандин В.А. и др. М.: Металлургия, 1986. 424 с.
4. Совершенствование теплового и температурного режимов работы одностопной газовой колпаковой печи ЛПЦ-5: Отчет по НИР / Магнитогорск. гос. техн. ун-т; Руководитель работы В.В.Копцев; № ГР 01200510640. Магнитогорск, 2005. 59 с.

УДК: 62-83.001.76:621.778.6.06

Е.Я. Омельченко, А.В. Фадеев, С.В. Чесноков

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЧЕТЫРЕХКЛЕТЬЕВОГО ПЛЮЩИЛЬНОГО СТАНА

Четырехклетьевого плющильный стан производит стальную полосу толщиной от 0,5 до 1,5 мм из проволоки диаметром от 2 до 6 мм и состоит из frictionного разматывателя, трех плющильных клеток с групповым редукторным электроприводом, ведущей клетки, 4 пассивных петледержателей и намоточного устройства. В разматыватель уста-

навливается катушка 250 кг с полезным весом проволоки 1000 кг. Скоростной режим стана задает ведущая клетка, которая работает всегда в режиме стабилизации скорости, имеет жесткую механическую характеристику и при нулевых обжатиях задает линейную скорость полосы до 2 м/с. Суммарное обжатие по клетям доходит до 4,2, а

сечение на выходе уменьшается только в 2–2,5 раза из-за значительного уширения полосы.

Намоточное устройство и клетки приводятся во вращение от индивидуальных электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения ПН-290 (18,5 кВт, 1300 об/мин, 530 кг, $J_D=1,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$), питающихся от системы «тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП-Д). Нереверсивные тиристорные преобразователи стана имеют трехфазную нулевую схему выпрямления с групповым питанием от одного сетевого трансформатора и управлением от аналоговой системы регулирования на базе интегральных операционных усилителей.

Электромагнитный момент двигателя намоточного устройства задается от петледержателя, расположенного между задающей клетью и намоткой. Моменты электродвигателей рабочих клеток задаются от петледержателей, расположенных по ходу прокатки. Петледержатель за счет подвижной роликовой системы, тросов и тянущего груза, сельсина, тахогенератора и фильтров поддерживает постоянное межклетьевое натяжение.

Процесс прокатки на стане включает в себя заправку полосы и непосредственно прокатку. При заправке полосы в клетки, петледержатели и намотку все электроприводы переключаются в режим стабилизации скорости с заданием скорости до 10% от номинальной. После заправки полосы в барабан намоточного устройства стан останавливается, электроприводы рабочих клеток и намотки переключаются в режим стабилизации момента (тока) двигателей с заданием от петледержателей. Намоточное устройство выбирает зазор в полосе на барабане, электроприводы клеток создают заданные натяжения в межклетьевых промежутках. При линейном пуске задающей клетки петледержатели приходят в движение, увеличиваются уставки моментов двигателей, намотка и клетки начинают

совместный разгон, при этом переходные процессы в электромеханической системе стана существенно колебательные. В установившемся скоростном режиме петледержатели занимают положения, соответствующие заданиям момента двигателя для прокатки и натяжения.

Стан проработал более 30 лет. Физический износ основного оборудования превышает 80%, поэтому необходима коренная модернизация механического и электрического оборудования. Для повышения производительности стана возникла необходимость в установке дополнительной рабочей клетки. При этом суммарное обжатие дойдет до 6. Для повышения надежности работы электрооборудования и улучшения энергетических характеристик принято решение по замене существующей системы электроприводов на систему «транзисторный преобразователь частоты – асинхронный короткозамкнутый двигатель» (ПЧ-АД).

Эффективность применения новой системы электропривода по отношению к существующей надо оценивать на стадии проектирования. Но так как плющильный стан представляет сложную взаимосвязанную электромеханическую систему, проверку необходимо выполнять на достоверной математической модели, достаточно точно описывающей основные электрические и механические процессы, происходящие при управлении прокаткой на стане.

Математическая модель должна включать в себя необходимое количество объектов, характерных для данного стана. Достаточной для описания основных процессов является схема стана (рис. 1), включающая в себя пассивный разматыватель, две рабочие клетки, задающую клетю, намоточное устройство (индексы от 0 до 4) и три пассивных петледержателя. Математическое моделирование переходных процессов выполнено в среде прикладного программирования MATLAB 6,5 [1].

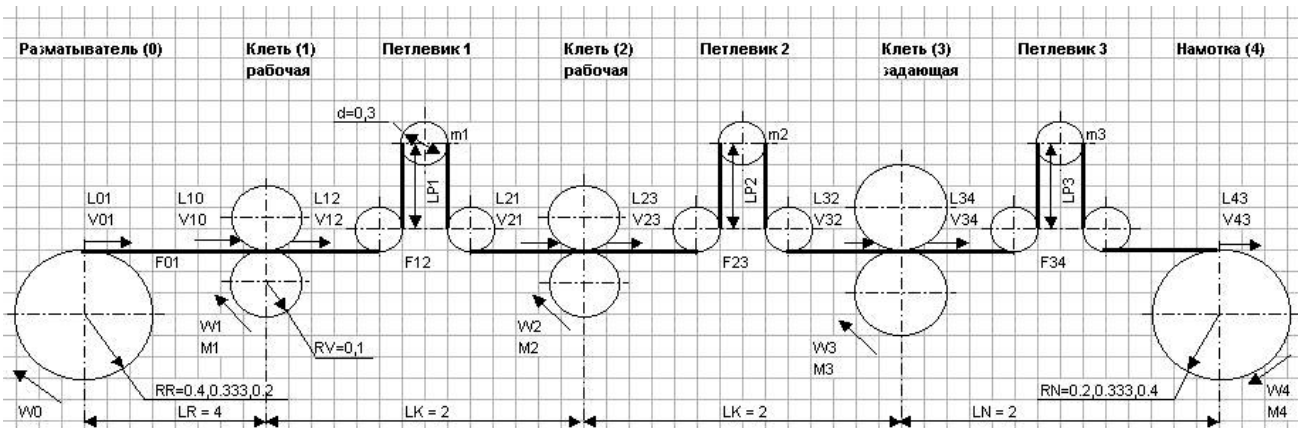


Рис.1. Кинематическая схема модели плющильного стана

Дифференциальные уравнения, описывающие поведение угловой скорости вращения барабана размотывателя ω_R , имеют вид:

$$J_{\Sigma R} \frac{d\omega_R}{dt} = F_{01} R_R(t) - M_{TR} \text{sign}(\omega_R); \quad (1)$$

$$\frac{dL_{01}}{dt} = R_R(t) \omega_R, \quad (2)$$

где $J_{\Sigma R} = J_{BR} + J_M(t)$ – суммарный момент инерции размотывателя, состоящий из моментов инерции барабана и проволоки на барабане, кг·м²; F_{01} – натяжение проволоки между размотывателем и 1 клетью, Н; M_{TR} – момент трения размотывателя, Н·м; L_{01} – длина размотанной проволоки, м.

В процессе размотки радиус рулона и его момент инерции изменяются от максимального до нуля, но размотка с барабана идет послойно и продолжительность этого процесса значительно больше времени электромеханических переходных процессов стана, поэтому при моделировании эти параметры для размотки и намотки принимаются постоянными для режимов начала прокатки, середины и конца. Так, $J_{\Sigma R}$ принимает значения 110, 45 и 10 кг·м² при радиусах смотки $R_R = 0.4, 0.333$ и 0.2 м соответственно.

Натяжение проволоки рассчитывается по закону Гука

$$F_{01} = (L_{10} - L_{01}) E \cdot S / L_R, \quad (3)$$

где L_{10} – длина проволоки, прокатанная 1 клетью, м; $E = 22000$ кг/мм² – модуль упругости Гука для стали; $S = 7-28$ мм² – сечение проволоки.

Структурная схема, описывающая поведение размотывателя, приведена на **рис. 2**, в которой с помощью звеньев с 1 по 5 реализовано уравнение (1), звеньями 6, 7 реализовано уравнение (2), а звеньями с 8 по 10 – уравнение (3). Звено 10 учитывает передачу натяжения только по направлению прокатки.

Уравнения, описывающие поведение скорости намоточного устройства ω_N :

$$J_{\Sigma N} \frac{d\omega_N}{dt} = M_4 - F_{34} R_N - M_{TN} \text{sign}(\omega_N); \quad (4)$$

$$\frac{dL_{43}}{dt} = R_N \omega_N, \quad (5)$$

где $J_{\Sigma N} = J_{BN} + J_{MN} + J_D i_N^2$ – суммарный момент инерции намоточного устройства, состоящий из моментов инерции барабана, рулона на барабане и электродвигателя намотки, приведенного к валу барабана, кг·м²; F_{34} – усилие натяжения между 3 клетью и намоткой, Н; M_4 – электромагнитный момент двигателя намотки, приведенный к валу барабана; M_{TN} – момент трения намоточного устройства, Н·м; i_N – передаточное число редуктора намотки.

В структурной схеме намоточного устройства (**рис. 3**) уравнение (4) реализовано с помощью

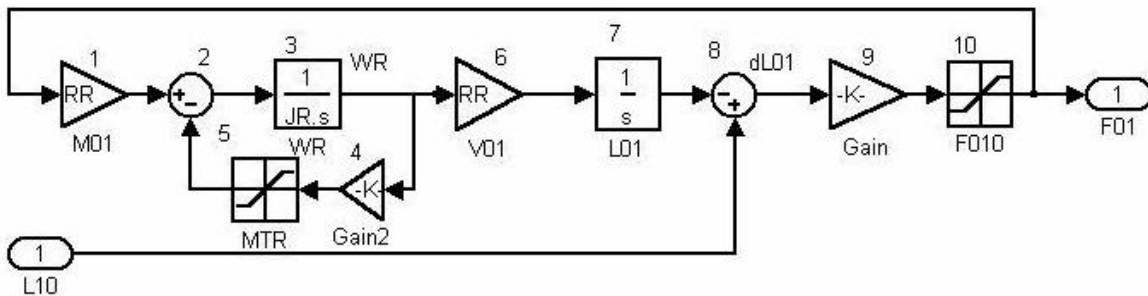


Рис. 2. Структурная схема модели размотывателя EMCR

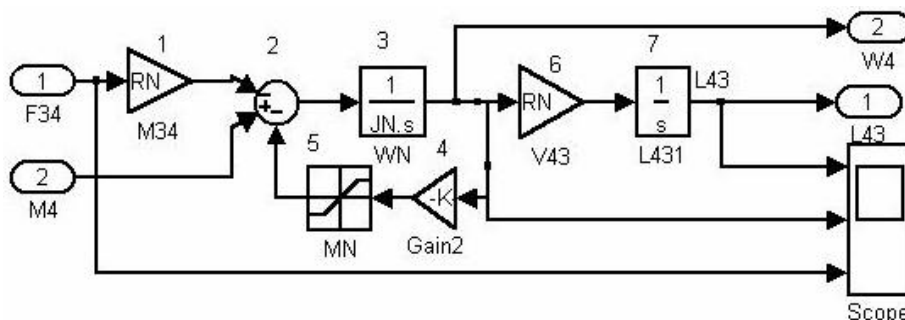


Рис. 3. Структурная схема намоточного устройства EMCN

звеньев с 1 по 5, а уравнение (5) – звеньями 6 и 7. Суммарный момент инерции принимает значения 355, 390 и 455 кг·м² при радиусах намотки $R_N=0.2, 0.333$ и 0.4 м соответственно.

Для клеток уравнения движения принимают вид:

$$J_{\Sigma V} \frac{d\omega_{Vi}}{dt} = M_{Vi} + (F_+ - F_-)R_V - M_{TV} \text{sign}(\omega_V); \quad (6)$$

$$\frac{dL_{Vi}}{dt} = R_V \omega_{Vi}; \quad (7)$$

$$L_{-i} = L_{Vi} / (1 + e_1); \quad (8)$$

$$L_{+i} = L_{Vi} (1 + e_2); \quad (9)$$

$$F_+ = (L_{-(i+1)} + 2L_{Pi} - L_{+i})E \cdot S_i : (L_K + 2L_{Pi} + d(\pi - 2)), \quad (10)$$

где ω_{Vi} – угловая скорость вращения валков i -клет-

ти, $1/c$; $J_{\Sigma V}=J_V+J_Di_{Vi}^2$ – суммарный момент инерции валковой системы, состоящий из моментов инерции валков с редуктором и электродвигателя, приведенного к валкам, кг·м²; F_+, F_- – переднее и заднее натяжение клетки, Н; L_{-i}, L_{+i}, L_{Vi} – длина полосы на входе, выходе клетки и длина, накрученная валками, м; e_1, e_2 – относительное отставание и опережение металла от линейной скорости валков; L_{Pi} – подъем петледержателя от оси прокатки, м ($L_{PM}=0.8$ м).

На структурной схеме клетки (рис. 4) уравнение (6) реализовано на звеньях с 1 по 6, уравнение (7) – на звеньях 7 и 8, а уравнение (10) – на звеньях 13 по 17. Для рабочих клеток при обжати 30% $e_1=0.1$ и $e_2=0.05$. Для задающей клетки при нулевом обжати $e_1=e_2=0$. В математической модели не учтено влияние переднего и заднего натяжения на опережение и отставание металла, потому что изменение длины петледержателя в межклетьевом промежутке сказывается значительно сильнее на натяжение по сравнению с e_1 и e_2 .

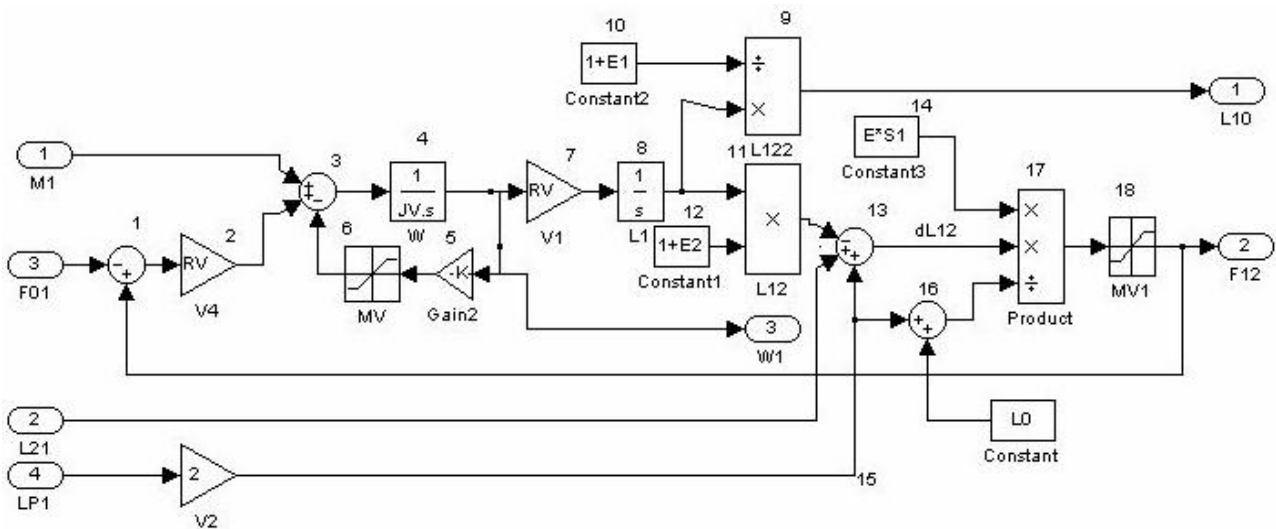


Рис. 4. Структурная схема модели рабочей клетки EMC1

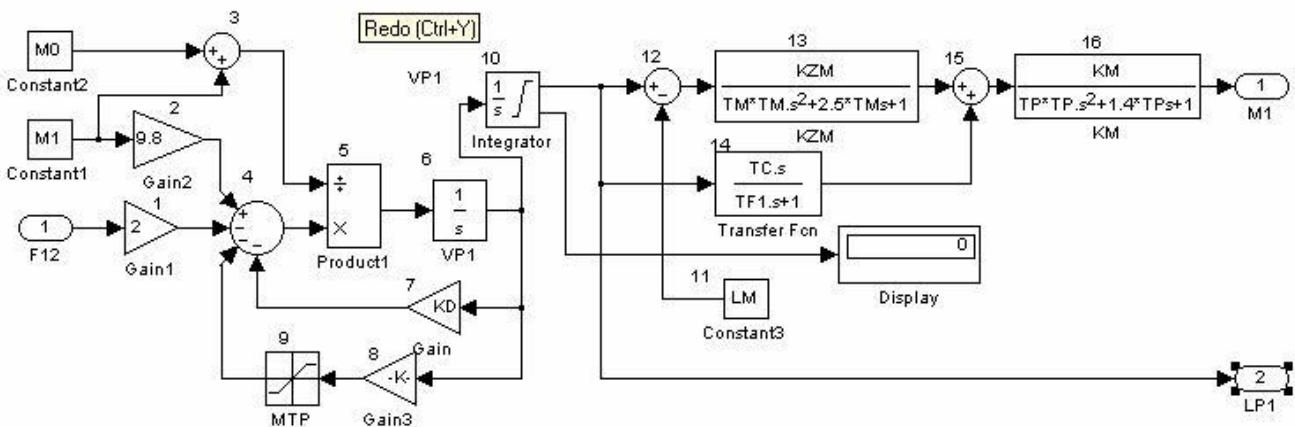


Рис. 5. Структурная схема модели петледержателя с системой регулирования CAR1

Движение петледержателя зависит от величины тянущего груза m_i , натяжения полосы, скоростного режима клетей, тормозного и демпфирующего действия роликовой подвижной опоры и описывается дифференциальными уравнениями:

$$m_{\Sigma i} \frac{dV_{Pi}}{dt} = m_i g - 2F_i - F_{TPi} \text{sign}(V_{Pi}) - K_d V_{Pi}; \tag{11}$$

$$\frac{dL_{Pi}}{dt} = V_{Pi}, \tag{12}$$

где $m_{\Sigma i} = m_i + m_0$ – суммарная движущаяся масса элементов петледержателя, состоящая из масс тянущего груза и роликовой опоры, кг; F_{TPi} – усилие трения в роликовой опоре, Н; K_d – коэффициент демпфирования опоры, кг/с.

Перемещение петледержателя с помощью сельсина, тахогенератора и фильтров преобразуется в электрические сигналы U_{ZM1} и U_{ZM2} , которые, в свою очередь, подаются в замкнутый контур регулирования момента (якорного тока) и преобразуются в электромагнитный момент двигателя в операторном виде по формулам:

$$\left. \begin{aligned} U_{ZM1}(P) &= L_p(P)K_{ZM} : \\ &: (T_M^2 P^2 + 2.5T_M P + 1); \\ U_{ZM2}(P) &= L_p(P)T_C P / (T_F P + 1); \\ M_D(P) &= (U_{ZM1}(P) + U_{ZM2}(P))K_M : \\ &: (T_P^2 P^2 + 1.4 * T_P P + 1), \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

где T_M, K_{ZM} – постоянная времени фильтра и коэффициент передачи звена «сельсин-фильтр 1»; T_C, T_F – постоянные времени дифференцирования и фильтра звена «тахогенератор-фильтр 2»; T_P, K_M – постоянная времени и коэффициент передачи замкнутого контура регулирования момента.

Структурная схема модели петледержателя с системой регулирования момента приведена на **рис. 5**, в которой с помощью звеньев с 1 по 10 реализованы уравнения (11) и (12), а система уравнений (13) решается с помощью звеньев с 11 по 16. Структурные схемы моделей петледержателей, управляющие двигателями рабочих клетей и намоткой, идентичны. Система регулирования двигателем задающей клетки CAR3 представляет собой стандартную двухконтурную систему подчиненного регулирования координат с внутренним ПИ-регулятором момента (тока) и внешним ПИ-регулятором скорости (СПРК), задание на которую поступает через задатчик интенсивности с поста управления станом.

Общая структурная схема модели плющильного стана представлена на **рис. 6**. Она состоит из электромеханических систем разматывателя EMCR, намоточного устройства EMCN и трех клетей EMC1-EMC3, а также систем регулирования моментов двигателей клетей CAR1-CAR3 и намотки CAR4.

Расчет переходных процессов на модели стана выполнен для режима линейного пуска задающей клетки при полной катушке на разматывателе. За время с 0 до 5 с стан стоит, устанавливается натяжение между клетями в соответствии

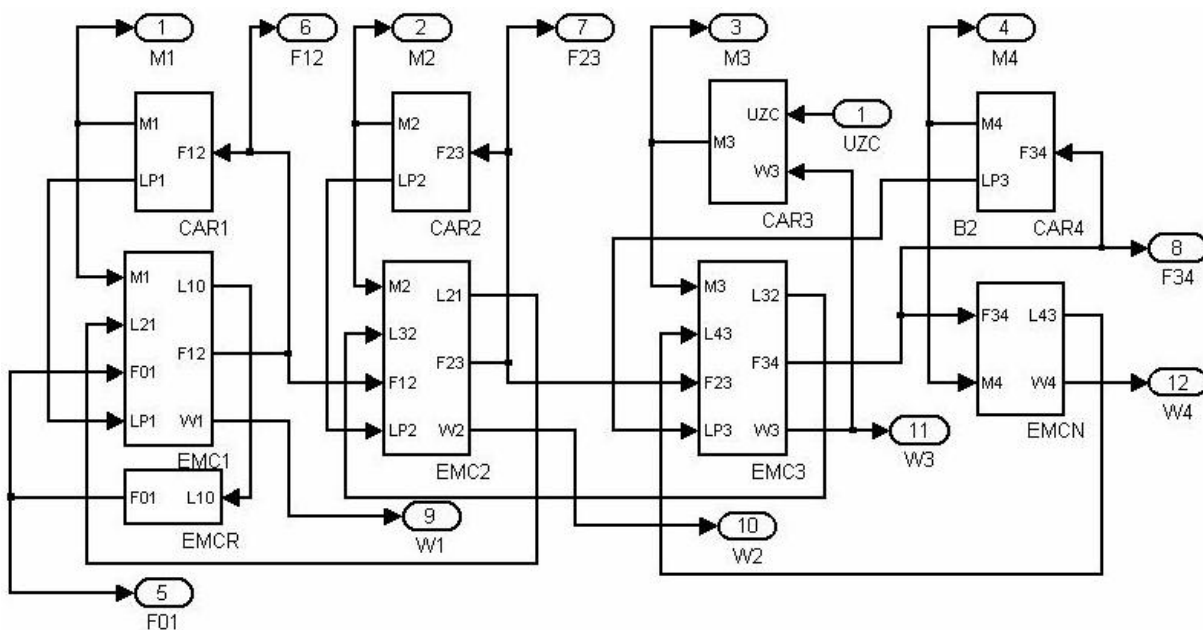


Рис. 6. Общая структурная схема модели плющильного стана

Таблица 1

Таблица 2

Расчет моментов инерции

| № п/п | Механизм Режим прокатки | Разматыватель | | | Клеть | | | Намотка | | |
|-------|---|---------------|-------|------|-------|------|------|---------|-------|------|
| | | Нач. | Сред. | Кон. | 1 | 2 | 3 | Нач. | Сред. | Кон. |
| 1 | J _{мех} | 110 | 45 | 10 | 3,8 | 3,8 | 2 | 10 | 45 | 110 |
| 2 | J _{д сущ. прив.} | 0 | 0 | 0 | 126,6 | 95,5 | 345 | 345 | 345 | 345 |
| 3 | J _{д нов. прив.} | 0 | 0 | 0 | 6,5 | 5 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| 4 | J _{Σ сущ.} | 110 | 45 | 10 | 164,6 | 99,3 | 347 | 355 | 390 | 455 |
| 5 | J _{Σ нов.} | 110 | 45 | 10 | 10,3 | 8,8 | 18 | 26 | 61 | 126 |
| 6 | J _{Σ сущ./ J_{Σ нов.}} | 1 | 1 | 1 | 16 | 11,3 | 19,3 | 13,7 | 6,4 | 3,6 |

Постоянные времени системы регулирования

| Электропривод | Система | T _м | T _р | T _f | T _с | T _д | T _i |
|---------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Существующий | ТП - Д | 0,022 | 0,015 | 0,01 | 2,0 | 0,12 | 0,02 |
| Новый | ПЧ - АД | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,5 | 0,04 | 0,005 |

с грузами петледержателей и быстродействием систем регулирования. За время с 5 до 30 с задающая клеть линейно разгоняется до скорости 10 1/с. Значения моментов инерции механизмов и постоянные времени систем регулирования приведены в табл. 1 и 2.

На рис. 7 представлены переходные процессы скоростей и моментов существующих электроприводов плющильного стана (скорости и моменты приведены к линейным скоростям полосы). Переходные процессы задающей клетки соответствуют астатической СПРК. Переходные процессы остальных электроприводов колеба-

тельные с перерегулированием до 100%, периодом колебаний 7 с, но разным фазовым сдвигом.

Существующая система управления станом, включающая в себя электроприводы механизмов и петледержатели, критична к режимам работы и настройкам. В конце прокатки, когда рулон находится на намотке, колебательность несколько снижается. Уменьшение времени задатчика интенсивности и постоянной T_с приводит к образованию петель с дерганьем или порывом полосы. Натяжение полосы поддерживается с точностью ±8%.

Модернизация стана предусматривает замену двигателей постоянного тока на асинхронные, сельсинов и тахогенераторов на импульсные энкодеры. В модели заложены параметры кранового электродвигателя АМТК-Ф 160 [2] (18,5 кВт, 1500 об/мин, 142 кг, J_д=0,065 кг*м²), питающе-

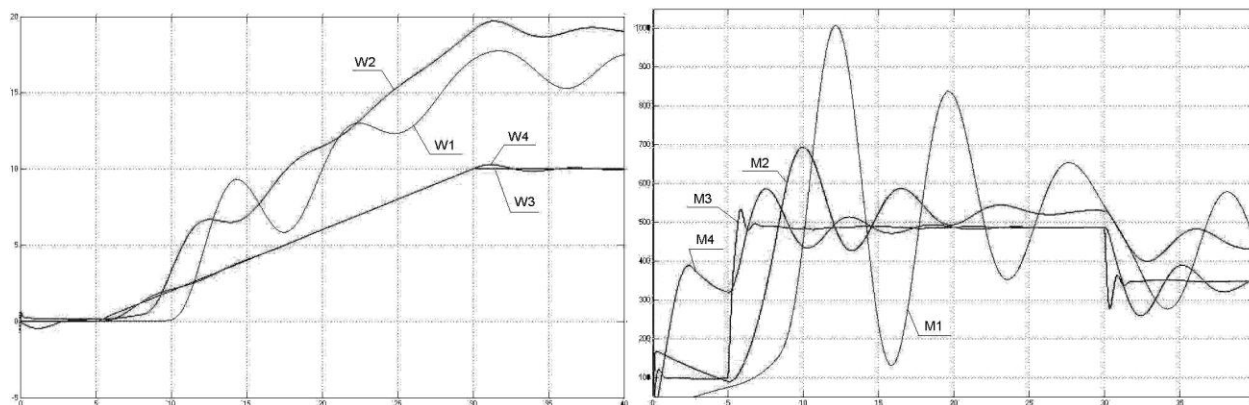


Рис. 7. Переходные процессы пуска стана с существующей системой электроприводов

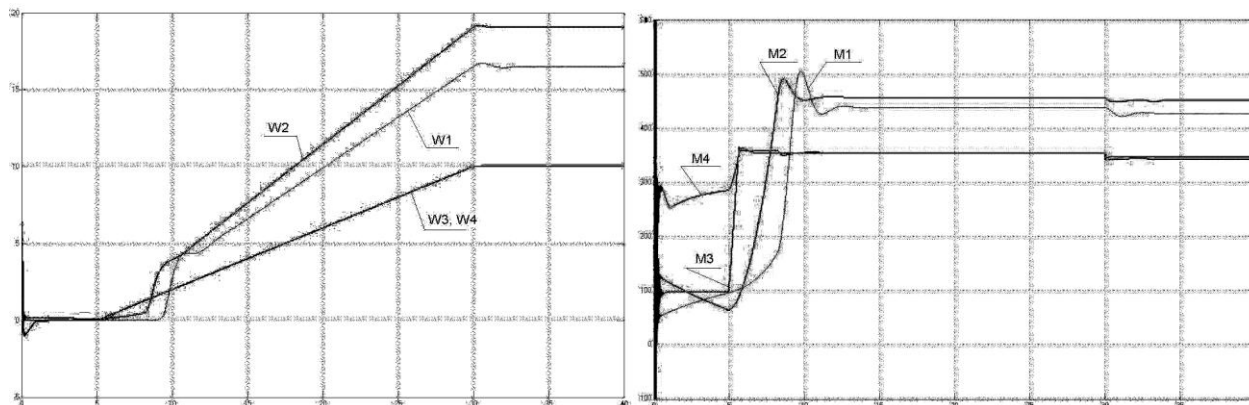


Рис. 8. Переходные процессы в новой системе управления станом

гося от преобразователя частоты ACS 800 (АББ) с системой прямого управления моментом. Значения моментов инерции и постоянные времени системы регулирования для новой системы управления станом приведены в табл.1 и 2. На рис. 8 представлены кривые переходных процессов скоростей и моментов новой системы электроприводов стана.

Работа системы управления станом стала более устойчивой, колебательность переходных процессов существенно снизилась, что позволит уменьшить время разгона и повысить запас

мощности по двигателям. Точность поддержания натяжения доходит до $\pm 3\%$, что должно сказаться на снижении разнотолщинности полосы.

Выводы

Замена систем ТП-Д на системы ПЧ-АД электроприводов плющильного стана позволит:

- уменьшить время разгона стана;
- увеличить обжатия по клетям;
- повысить точность прокатки и снизить разнотолщинность;
- повысить общую производительность стана.

Библиографический список

1. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.
2. Крановые электродвигатели для применения с преобразователями частоты. Серия АМТК-Ф. Технический каталог // Кранрос. Крановые и рольганговые системы. 2006, март. Вып. 2.

УДК 621.746.27: 047

И.М. Ячиков, Т.П. Ларина, К.Н. Вдовин

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ С ОХЛАЖДАЮЩИМИ КАНАЛАМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Кристаллизатор является наиболее ответственным элементом машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), определяющим размеры формирующейся корочки слитка, а также ее технико-экономические показатели. От эксплуатационной стойкости кристаллизатора зависит длительность межремонтных периодов и производительность машины.

Наиболее частыми причинами выхода из строя кристаллизатора являются износ рабочих стенок и их коробление, а также раскрытие стыка между широкими и узкими стенками сборных кристаллизаторов. Все эти факторы во многом определяются тепловой работой кристаллизатора, поэтому знание температурного поля в кристаллизаторе является важной научно-технической задачей.

На металлургических предприятиях намечается переход от кристаллизаторов МНЛЗ со сверленными каналами к сборным кристаллизаторам. Связано это с тем, что производство и техническое обслуживание их значительно проще при экономии медьсодержащих материалов. Отсюда актуальной проблемой становится определение теплового состояния сборных кристаллизаторов с каналами различной формы. Важной задачей является выявление, насколько эффективно данный тип кристаллизатора охлаждает рабочую

поверхность по сравнению с кристаллизаторами со сверленными каналами и какая форма каналов с точки зрения теплопередачи от рабочей стенки к охлаждающей воде будет оптимальной.

Целью данной работы являлось создание математической модели и программного продукта по определению нестационарного температурного поля в кристаллизаторе с каналами различной формы. Сравнить тепловую работу кристаллизатора при использовании охлаждающих каналов различной формы.

В стенке кристаллизатора наблюдается практически периодическое расположение вертикальных каналов охлаждения. Можно выделить два семейства плоскостей симметрии – плоскости, проходящие по центру и между щелей [1]. Эти плоскости симметрии могут рассматриваться как теплонепроницаемые границы.

Тепловое состояние описываем уравнением нестационарной теплопроводности Фурье для элемента объема стенки кристаллизатора со сверленными или фрезерованными каналами, имеющим и различную форму (рис. 1).

$$a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial t}{\partial \tau}. \quad (1)$$

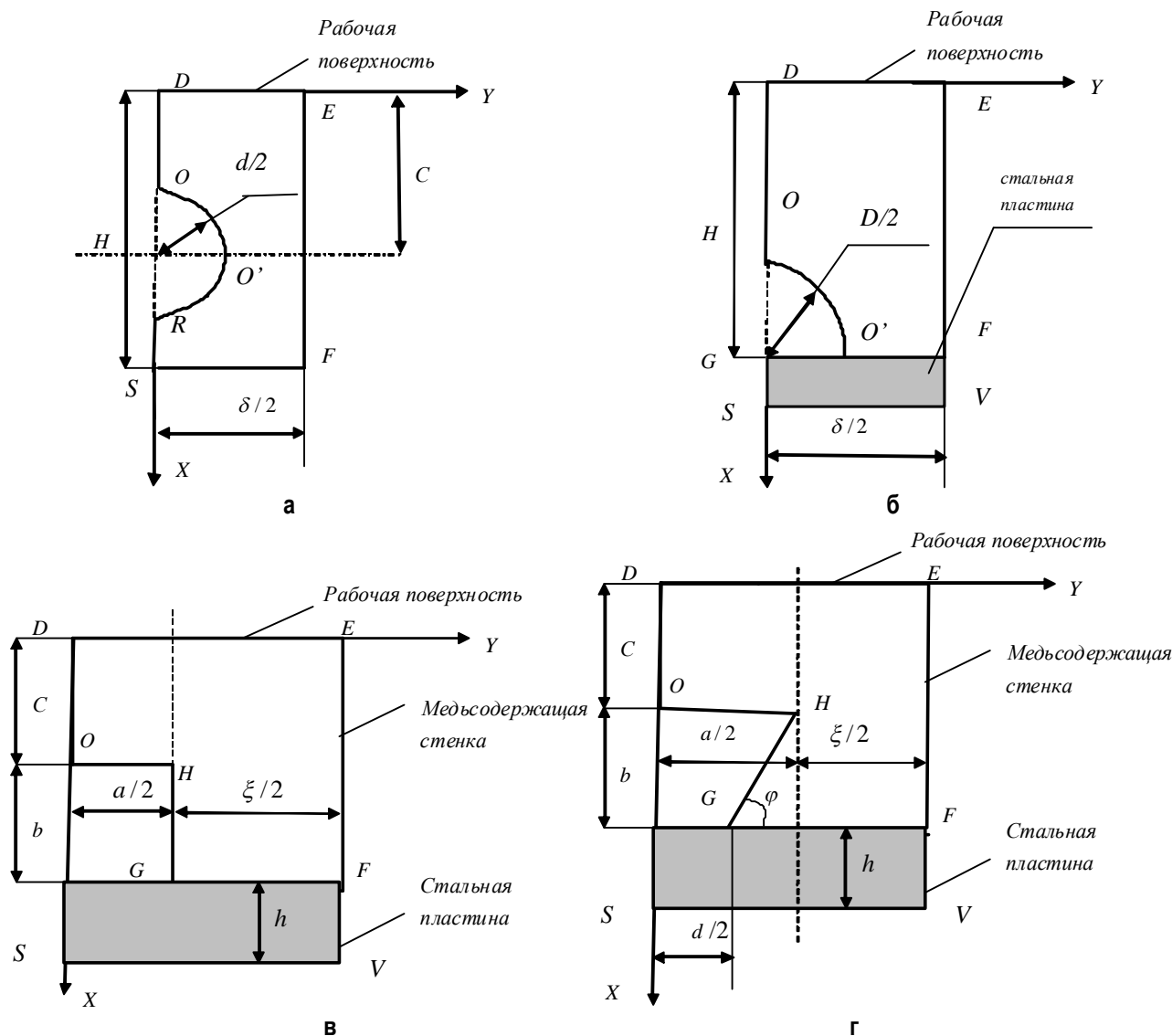


Рис. 1. Элемент стенки кристаллизатора со сверленными каналами (а), полукруглыми (б), прямоугольными (в) и трапецидальными щелевыми каналами (г)

Считаем, что теплофизические свойства материала стенки постоянны ($a=const$), кроме того, температура по оси z меняется несущественно в пределах элемента объема стенки по сравнению с другими направлениями, поэтому можно принять $\frac{\partial t}{\partial z} = 0$. Для решения уравнения (1) его необходимо дополнить краевыми условиями.

Для начального момента времени $\tau=0$ принимаем $t(x,y)=t_0$. На рабочей поверхности (DE) имеем граничные условия второго рода:

$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{DE}$, где q – тепловой поток от горячего металла к рабочей поверхности; λ – коэффициент теплопроводности стенки.

Тепловой поток ($Вт/м^2$) зависит от ряда параметров разливки и главным образом от расположения элемента стенки по высоте кристаллизатора и от скорости разливки. Согласно полученным данным в работе [2], предлагается эмпирическая зависимость:

$$q = v^{0,46668} \exp \{ 14,689 + h[-4,3376 + h(5,5939 - 3,1608h^2)] + 0,007815/h/v - 5,7084 \cdot 10^{-8} h^{-5} \}, \quad (2)$$

где h – расстояние от данной точки рабочей поверхности до мениска, м; v – скорость разливки, м/мин.

На границах (DO), (EF) и (RS) реализуется условие симметрии при выборе элементарного объема $\frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{\substack{DO \\ EF \\ RS}} = 0$. На поверхности контакта

стальной и медной пластины (GF) имеем граничные условия четвертого рода:

$$t_m = t_{cm}; \quad \lambda_{cm} \frac{\partial t_{cm}}{\partial x} \Big|_{GF} = \lambda \frac{\partial t_m}{\partial x} \Big|_{GF} = \lambda_{cm} \frac{t_m - t_n}{h},$$

где t_n – заданная температура наружной поверхности кристаллизатора; h – толщина стальной плиты.

На внешней поверхности медной (SF) или стальной пластины (SV) имеем теплоотдачу к окружающему воздуху

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{\substack{SF \\ SV}} = \alpha_{\text{возд}} (t_n - t_{\text{возд}}),$$

где $\alpha_{\text{возд}}$ – коэффициент теплоотдачи от задней стенки к воздуху; $t_{\text{возд}}$ – температура окружающего воздуха.

На поверхности каналов водяного охлаждения (OH), (HG), (OO') и ($O'R$) выбираем граничное условие третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{\substack{OH \\ HG \\ OO' \\ O'R}} = \alpha_s (t_k - t_s),$$

где t_k – температура поверхности канала; t_s – средняя температура охлаждающей воды.

Коэффициент теплоотдачи α_s с внутренней поверхности щелевого канала для турбулентного режима течения определяем по формуле Михеева [2]:

$$Nu = \frac{\alpha_s d_{\text{экв}}}{\lambda_{\text{ж}}} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} (\text{Pr}_{\text{ж}} / \text{Pr}_c)^{0,25},$$

где $\text{Re} = \frac{W_s d_{\text{экв}}}{\nu_s}$ – число Рейнольдса; W_s – средняя скорость воды в каналах; $d_{\text{экв}} = \frac{4f}{P}$ – эквивалентный диаметр; f – поперечное живое сечение трубы; P – смоченный периметр поперечного сечения.

Для цилиндрических каналов $d_{\text{экв}} = d$, для полукруглых $d_{\text{экв}} = D \frac{\pi}{\pi + 2}$, для прямо-

угольных $d_{\text{экв}} = \frac{2ab}{a+b}$ и для трапецидальных – $d_{\text{экв}} = \frac{2b(a+d)}{a+d+\sqrt{(a-d)^2+4b^2}}$.

Число Pr для воды на линии насыщения в диапазоне температур от 10 до 210°C может быть представлено зависимостью $\text{Pr}(t) = 89,666t^{-0,8563}$.

Для решения данной задачи теплопроводности использовали конечно-разностный метод. С помощью метода расщепления по координатам была получена система из двух, безусловно-устойчивых, неявных локально-одномерных расчетных схем [3]. Каждая из систем линейных уравнений последовательно решалась методом прогонки [4].

По математической модели была составлена компьютерная программа, позволяющая в удобном для пользователя виде вводить и редактировать исходные данные для любой из рассмотренных вариантов формы охлаждающего канала. Результаты компьютерного моделирования представляются в виде таблиц, графиков и диаграмм.

При численном эксперименте считали, что охлаждающие каналы расположены друг от друга на расстоянии $\delta=42$ мм, а кристаллизатор имеет начальную температуру $t_0=40^\circ\text{C}$ и выполнен он из медного сплава марки МЗРЖ с коэффициентом теплопроводности $\lambda=300$ Вт/(мК). Скорость разлива металла задавалась $v=0,74$ м/мин, средняя скорость охлаждающей воды $W_s=2,5$ м/с, а ее температура $t_s=23^\circ\text{C}$. При расчетах рассматривался элемент кристаллизатора, находящийся на расстоянии $h=200$ мм от мениска, что соответствует по уравнению (2) тепловому потоку на рабочую поверхность $q=1150$ кВт/м².

На рис. 2 приведены температурные поля для кристаллизаторов с прямоугольными и трапецидальными каналами ($b+C=40$ мм) при двух разных моментах времени. Видно, что максимальная температура находится на рабочей поверхности (в точке E), а наибольшая неоднородность температурного поля (градиент) располагается вблизи точки H канала для охлаждения.

Резкая неоднородность изменения температурного поля не наблюдается в кристаллизаторах со сверленными и полукруглыми каналами (рис. 3).

Созданная программа дополнительно позволяет определять тепловые потоки, коэффициент теплопередачи, средние температуры кристаллизатора, рабочей поверхности, контакта со стальной пластиной и поверхности водяного канала.

Для кристаллизаторов с щелевыми ($a=15$ мм, $b=21$ мм) и трапецидальными каналами ($a=20$ мм,

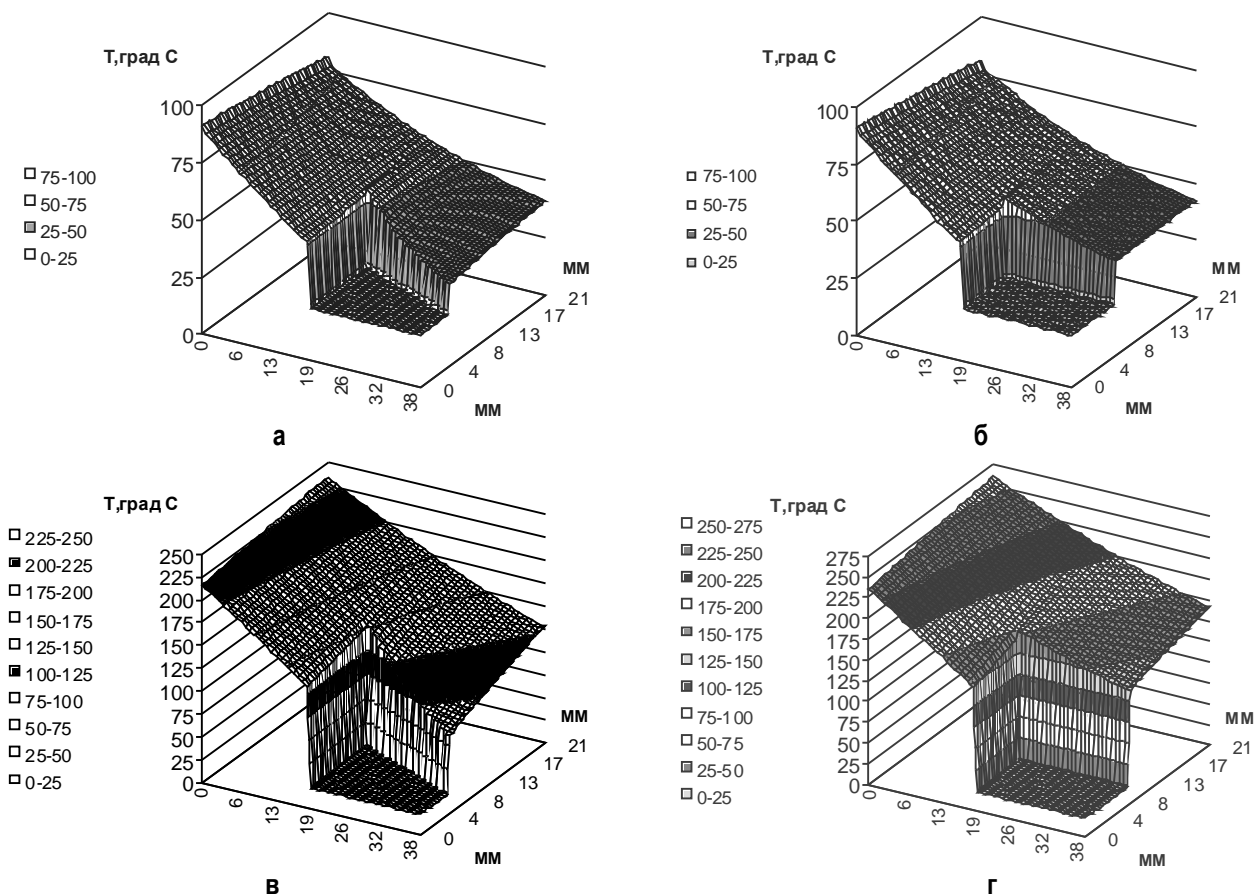


Рис. 2. Температура в элементе стенки кристаллизатора с каналами прямоугольной и трапецидальной формы для момента времени 30 с (а, б) и 600 с (в, г)

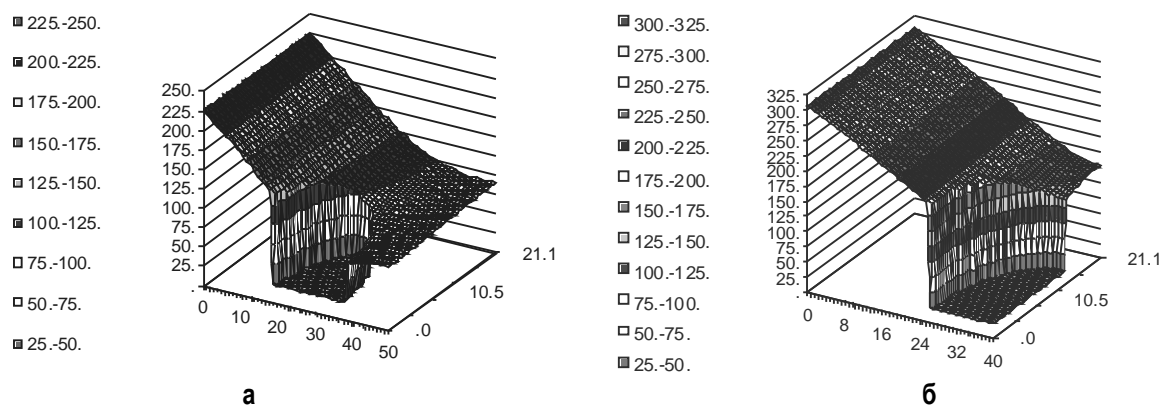


Рис. 3. Температура в элементе стенки кристаллизатора со сверленными $d=20$ мм (а) и полукруглыми $D=28,3$ мм (б) каналами для момента времени 600 с

$d=10$ мм, $b=21$ мм) на рис. 4, показано изменение средних температур во времени.

Из этих рисунков видно, что температурное поле в кристаллизаторе устанавливается с точностью до нескольких градусов примерно через 6...10 мин после начала его работы. Этот результат хорошо совпадает с данными, полученными ранее посредством моделирования стационарного температурного поля [5], и результа-

тами, полученными другими авторами для прямоугольных каналов [2].

В качестве характеристики тепловой работы стенки может выступать коэффициент теплопередачи стенки, который определяли как $K = \frac{q}{(\bar{t}_p - \bar{t}_e)}$, где \bar{t}_p – средняя температура рабочей стенки; \bar{t}_e – средняя температура воды.

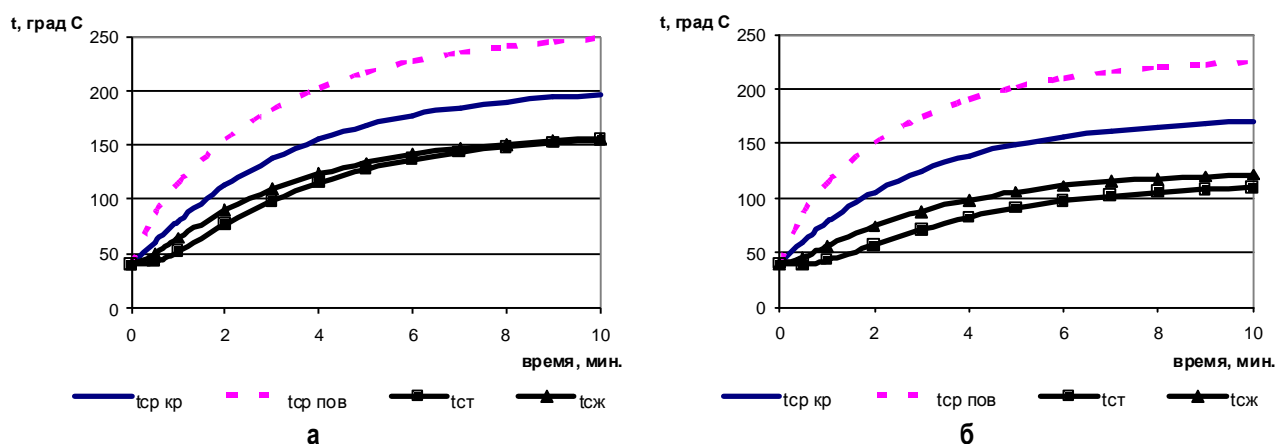


Рис. 4. Изменение во времени средних температур стенки кристаллизатора $t_{cp\ кр}$, его поверхности $t_{cp\ пов}$, границы со стальной плитой $t_{ст}$ и поверхности водоохлаждаемого канала $t_{сж}$ для щелевого кристаллизатора с прямоугольными (а) и трапецидальными каналами (б)

Компьютерное моделирование показало [6], что величина K действительно может выступать в качестве интегральной характеристики самой стенки и параметров теплоотдачи от воды к каналу, т. к. установлена ее слабая зависимость от теплового потока q и температуры охлаждающей воды $t_в$.

Проведены расчеты зависимости коэффициента теплопередачи от расстояния от рабочей стенки до канала L , которая показана на рис. 5. Причем для сверленных каналов $L=C-d/2$, $d=20$ мм для полуцилиндрических $L=H-D/2$, $D=28,3$ мм (см. рис. 1), для прямоугольных и трапецидальных $L=C$, $a=15$ мм, $b=21$ мм. Площадь сечения каналов f оставалась постоянной, а общая толщина стенки кристаллизатора менялась в зависимости от L .

Видно, что при прочих равных условиях коэффициент теплопередачи у сверленных каналов выше, чем у щелевых в среднем на 10%, и выше, чем у полукруглых в среднем на 40%. Это можно объяснить разными площадями поверхности водяного канала, участвующей в теплопередаче. Для сверленных каналов поверхность теплообмена пропорциональна периметру водяного канала

$$L_{ц} = 2\sqrt{\pi}\sqrt{f} \approx 3,54\sqrt{f}. \quad (3)$$

Для полуцилиндрических каналов с учетом того, что поверхность воды, которая омывает стальную пластину, в теплопередаче с рабочей поверхностью кристаллизатора практически не участвует.

$$L_{пц} = \sqrt{2\pi}\sqrt{f} \approx 2,5\sqrt{f}. \quad (4)$$

Аналогично для щелевых прямоугольных каналов имеем

$$L_{щ} = a + \frac{2f}{a} \left[\frac{a}{\sqrt{f}} + \frac{2\sqrt{f}}{a} \right] \sqrt{f} = n\sqrt{f}. \quad (5)$$

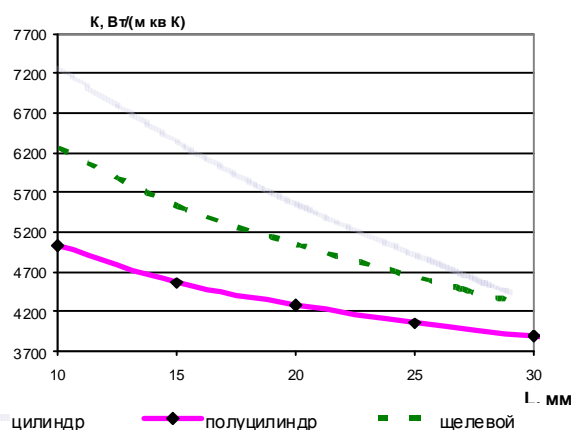


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопередачи от минимального расстояния от рабочей стенки до водяного канала при использовании каналов различной формы

Для условий, приведенных на рис. 5, имеем $n \approx 3,21$. Рассматривая совместно уравнения (3)–(5),

$$\text{получим: } \frac{L_{ц}}{L_{пц}} = \sqrt{2} \approx 1,4; \quad \frac{L_{щ}}{L_{пц}} = 1,1.$$

Данные соотношения подтверждают, что коэффициент теплопередачи при прочих равных условиях зависит от расстояния между рабочей стенкой и водяным каналом и определяется активной поверхностью теплообмена водяного канала.

Было выявлено, как влияют размеры щелевых каналов на коэффициент теплопередачи (рис. 6, а). Изменения геометрических размеров канала произвели при условии, что общая толщина стенки кристаллизатора $H=40$ мм $=const$ и площадь поперечного сечения канала не менялись.

Уменьшение коэффициента теплопередачи с увеличением ширины канала a можно объяснить тем, что при условии равенства площади живого

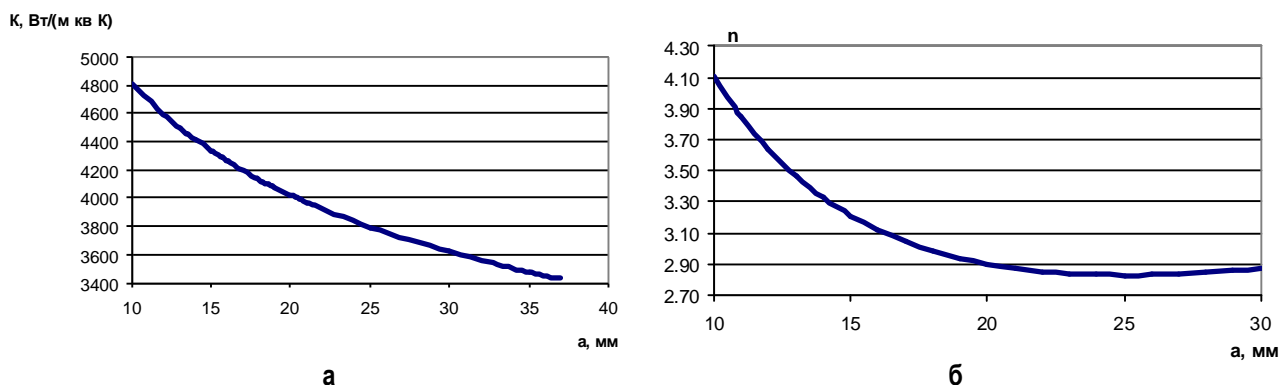


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопередачи (а) и коэффициента n (б) в формуле (5) от ширины щели ($f=a \cdot b=315 \text{ мм}^2=\text{const}$)

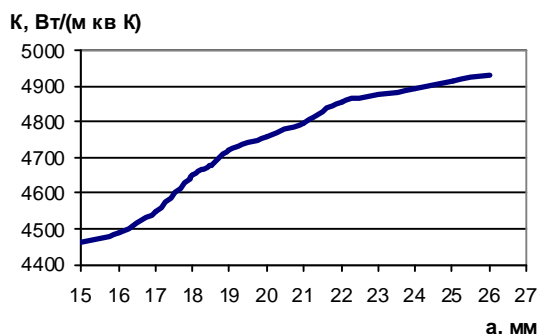


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплопередачи от размера трапецидальной стенки a при условии $f=315 \text{ мм}^2=\text{const}$, $b=21 \text{ мм}=\text{const}$

сечения высота канала b уменьшается, а значит, увеличивается L . Кроме того, уменьшается площадь активной поверхности теплообмена водяного канала. Это видно из рис. 6, б, где показана зависимость коэффициента n от ширины щели.

Использование трапецидальных каналов увеличивает площадь теплопередачи и при прочих равных условиях приводит к повышению коэффициента теплопередачи примерно на 10% при $a > d$.

Таким образом, создана математическая модель и программа расчета распределения темпера-

тур в стенке кристаллизатора МНЛЗ, имеющего различные каналы для охлаждения при нестационарном режиме его работы. При неизменных внешних условиях теплообмена стационарный режим тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ при любых каналах охлаждения наступает через 6–10 мин от начала его нагрева.

Установлено, что оптимальными каналами для охлаждения являются каналы цилиндрической формы, так как происходит охлаждение при максимальной поверхности теплообмена. В сборных кристаллизаторах грань канала, обращенная к стальной плите, не участвует в охлаждении рабочей стенки, поэтому форма каналов должна быть такой, чтобы уменьшить эту поверхность.

При сравнении тепловой работы щелевых каналов полукруглой, прямоугольной и трапецидальной формы установлено, что при заданной площади канала и при прочих равных условиях наименее эффективными являются полукруглые каналы. Коэффициент теплопередачи для щелевых прямоугольных и трапецидальных каналов тем выше, чем больше отношение высоты канала к его ширине и длины широкого основания трапеции к длине узкого.

Библиографический список

1. Ермолюк Т.Д., Лях А.П., Целиков А.А. Повышение эксплуатационной стойкости кристаллизатора МНЛЗ // Сталь. 1985. № 6. С. 33–36.
2. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Под общ. ред. Г.А. Шалаева. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы – «Марат», 2003. 320 с.
3. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 1967. 234 с.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 356 с.
5. Ячиков И.М., Ризванова Ю.А. Моделирование температурного поля в кристаллизаторе с щелевыми каналами // Материалы 63-й НТК по итогам НИР за 2003–2004 гг.: Сб. докл. Т. 2. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 190–193.
6. Вдовин К.Н., Ячиков И.М. Модель нестационарного температурного поля в кристаллизаторе с щелевыми трапецидальными каналами // Вестник ЮУрГУ. Металлургия. Челябинск. 2004. № 8(37). Вып. 4. С.91–93.

УДК 621.313.333.07

В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ЦЕЛЬЮ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Современные условия работы промышленных предприятий диктуют необходимость создания собственных электростанций. Работа таких электростанций характеризуется, как правило, высокой загрузкой генераторов, что объясняется низкой себестоимостью собственной электроэнергии и приводит к необходимости принятия мер по обеспечению как статической, так и динамической устойчивости работы системы.

Динамическая устойчивость энергосистемы, характеризующая реакцию синхронных и асинхронных машин системы на значительные возмущения, в значительной мере определяется устойчивостью работы ее нагрузки, определяющей потребление активной и реактивной мощности от генераторов.

К возмущениям, приводящим к нарушению режима работы двигателей, относятся короткие замыкания в распределительной сети, снижения напряжения, вызванные резким увеличением нагрузки, и т.д.

Как известно, основную часть нагрузки промышленных предприятий представляет двигательная нагрузка, состоящая из синхронных, асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока. Потому появляется необходимость введения нагрузки ее динамическими характеристиками в расчетах динамической устойчивости.

Методика расчета динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей приведена в [1, 2]. Расчет динамических характеристик может быть произведен с использованием численного интегрирования, что используется в проводимой работе. При этом решается уравнение движения ротора, позволяющее определить устойчивость асинхронного двигателя в переходном режиме.

На кафедре ЭПП МГТУ разработана программа, позволяющая производить построение динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей, а также по полученным результатам судить об устойчивости двигателя. Процесс расчета ведется методом последовательных интервалов в сочетании с методом последовательного эквивалентирования, что позволяет вводить

при необходимости корректировку нагрузок на каждом шаге расчета.

Динамическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой изменение скольжения двигателя при резком изменении величины напряжения, набросе нагрузки и других резких изменениях режима.

При изменении напряжения в сети на зажимах двигателей возникает небаланс активной мощности, приводящий к изменению скольжения, которое позволяет судить о степени устойчивости двигателя. В зависимости от величины скольжения его сопротивление изменяется и, следовательно, меняются потребляемые двигателем активная и реактивная мощности, определяющие, в свою очередь, режим работы генераторов.

Для асинхронных двигателей сопротивление при скольжении меньше критического может быть получено согласно [3]:

$$r'_2 = r'_{20}; \quad (1)$$

$$x_k = x_{k0}, \quad (2)$$

где r'_{20} , x_{k0} – параметры схемы замещения, соответствующие нормальному режиму работы двигателя.

При скольжениях больше критического активное и реактивное сопротивления могут быть определены согласно следующим зависимостям:

$$r'_2 = \frac{r'_{20}(1-s) + r'_{21}(s-s_{кр})}{1-s_{кр}}; \quad (3)$$

$$x_k = \frac{x_{k0}(s_1-s) + x_{k1}(s-s_{кр})}{s_1-s_{кр}}, \quad (4)$$

где r'_{21} , x_{k1} – параметры схемы замещения, соответствующие пусковому режиму или режиму самозапуска двигателя; s , $s_{кр}$ – текущее и критическое скольжение двигателя; $s_1 = 0,7-0,9$.

Если скольжение превышает $0,7-0,9$, то величина индуктивного сопротивления в расчетах корректируется:

$$x_k = x_{k1}. \quad (5)$$

В ходе расчета на каждом временном шаге величина сопротивления двигателя корректируется соответственно величине скольжения двигателя, полученной на предыдущем интервале, а мощность на валу – в соответствии с изменением скорости вращения ротора в зависимости от рода момента (вентиляторного или постоянного, не зависящего от частоты).

Различные режимы работы асинхронных двигателей были проанализированы на примере сетевых насосов ЦЭС ОАО «ММК», работающих на напряжении 3 кВ.

При анализе режимов работы асинхронных двигателей были рассмотрены различные условия их работы, в частности короткое замыкание на выводах двигателя, удаленное короткое замыкание в сети, приводящее к снижению напряжения на вы-

водах двигателя, а также отключение короткого замыкания, приводящее к самозапуску группы двигателей или к продолжению их опрокидывания.

Полученные характеристики позволяют судить о том, вернется ли двигатель к нормальной работе после возмущения или остановится. Такие характеристики для сетевого насоса приведены ниже. Как видно, при достаточно быстром отключении или незначительном снижении напряжения при вентиляторном моменте на валу двигатель не успевает опрокинуться и возвращается в нормальную работу (рис. 1, 2).

Если время отключения возрастает, то это приводит к опрокидыванию двигателя и потреблению им значительной реактивной мощности из системы. Худшую устойчивость имеют и двигатели, приводящие механизмы с постоянным моментом сопротивления (рис. 3). Большая нагрузка двигателя также увеличивает вероятность

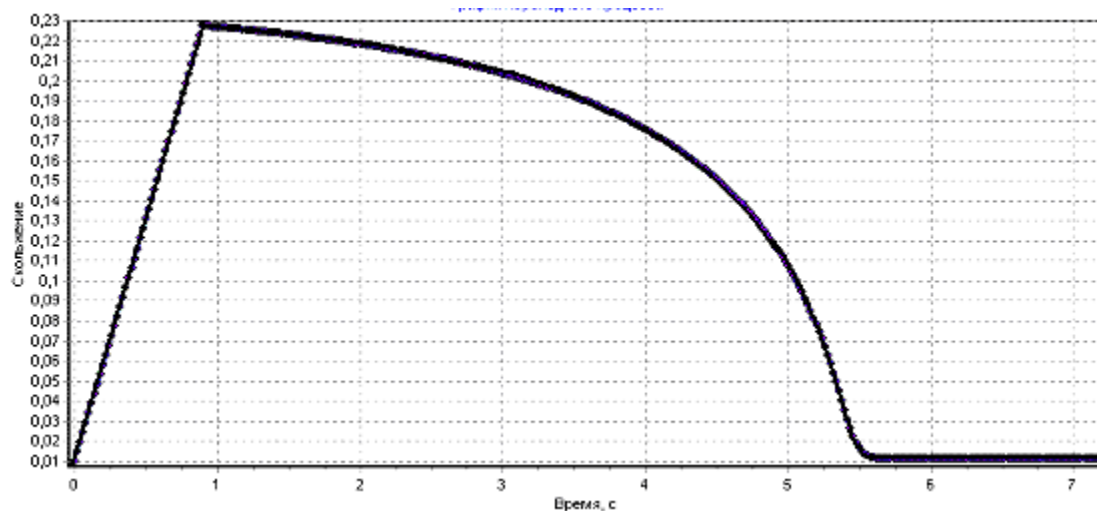


Рис. 1. Изменение скольжения во времени в течение переходного процесса

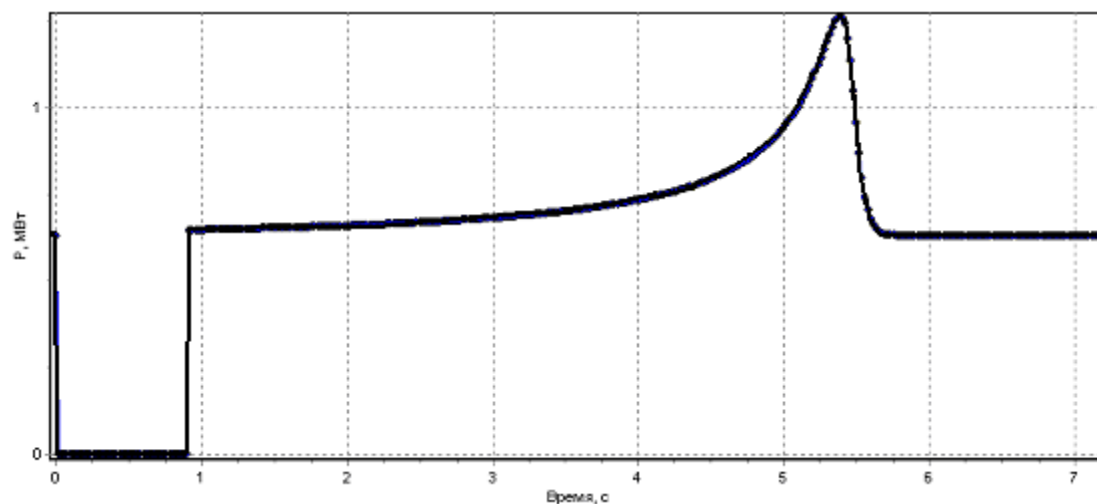


Рис. 2. Изменение активной мощности во времени в течение переходного процесса

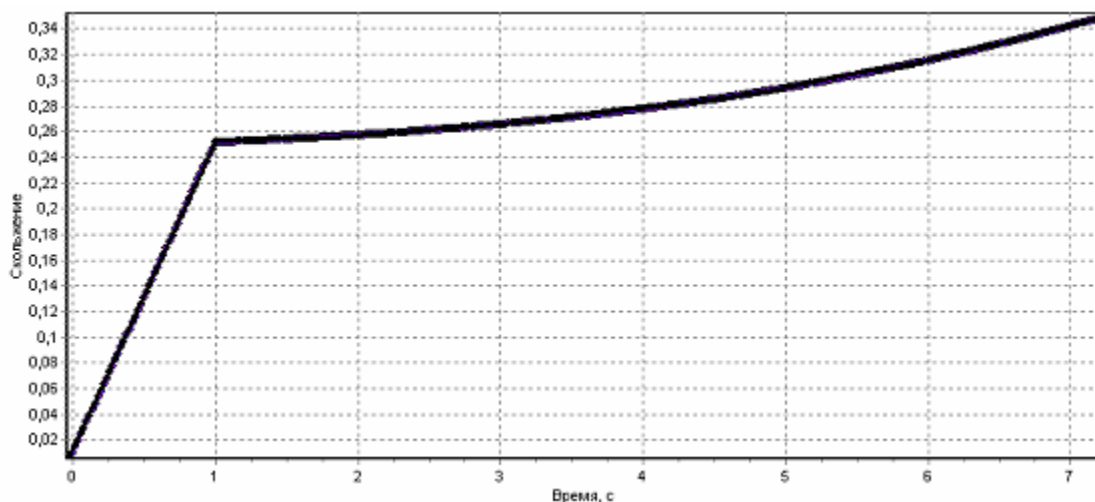


Рис. 3. Изменение скольжения во времени при постоянном моменте на валу

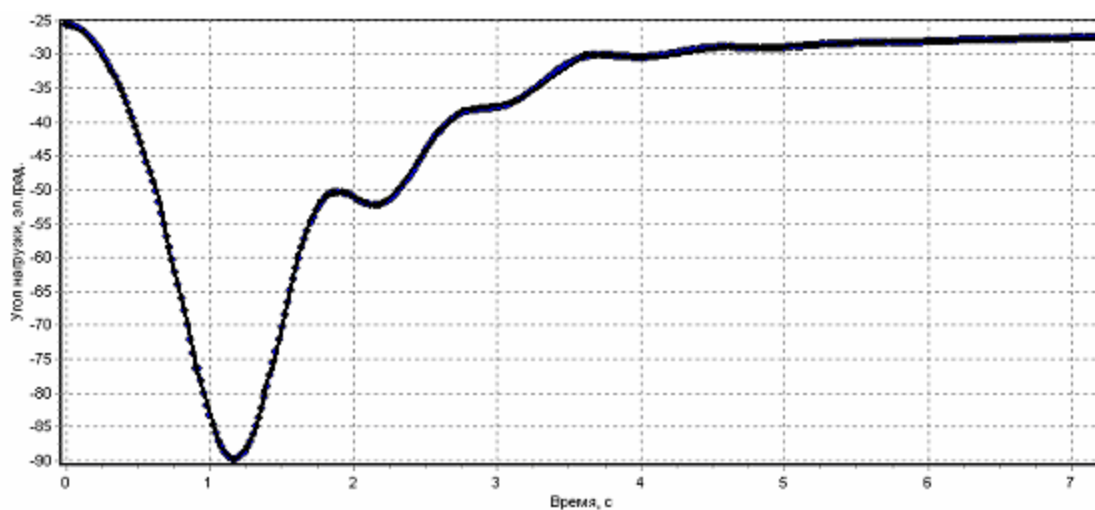


Рис. 4. Изменение угла ротора синхронного двигателя в переходном процессе

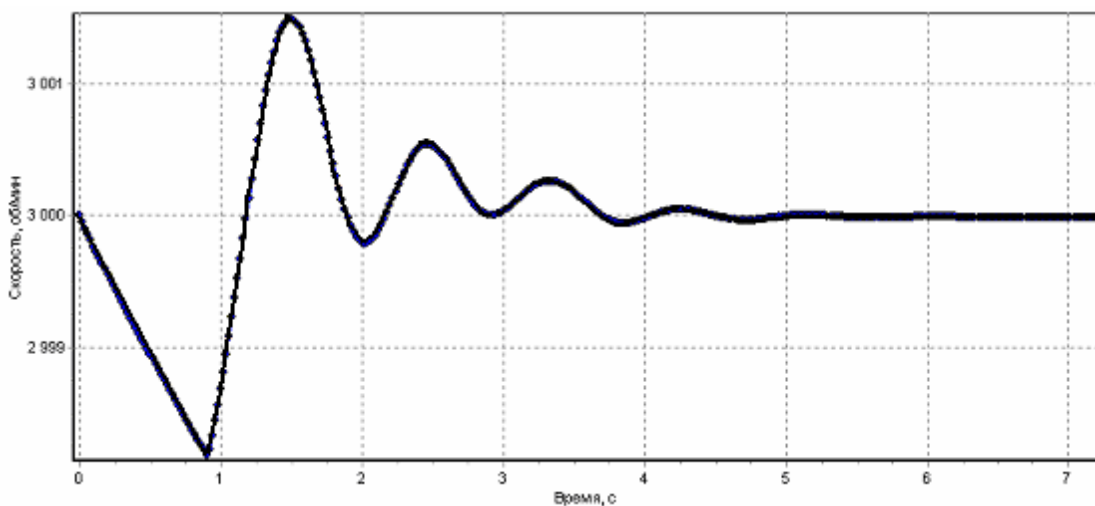


Рис. 5. Изменение скорости ротора синхронного двигателя в переходном процессе

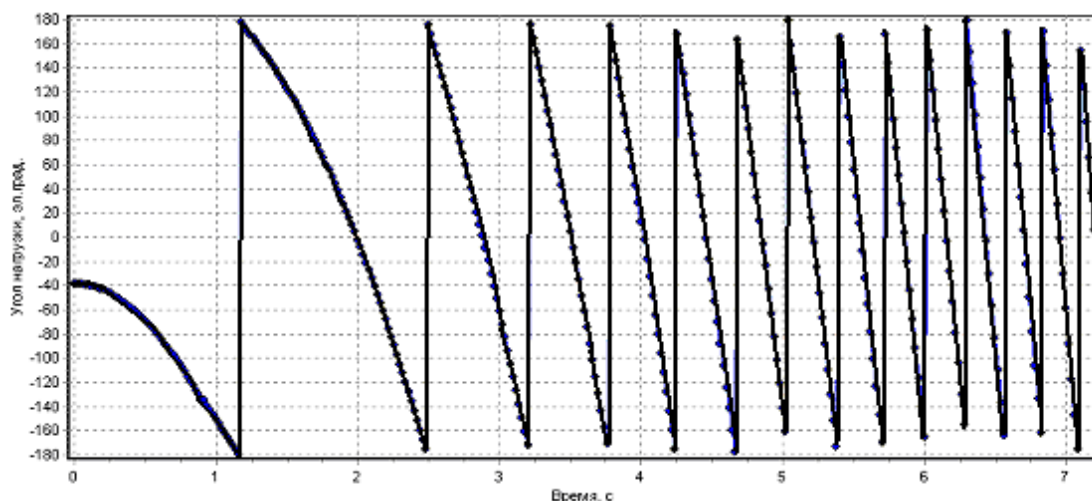


Рис. 6. Изменение угла ротора синхронного двигателя при замыкании на его шинах

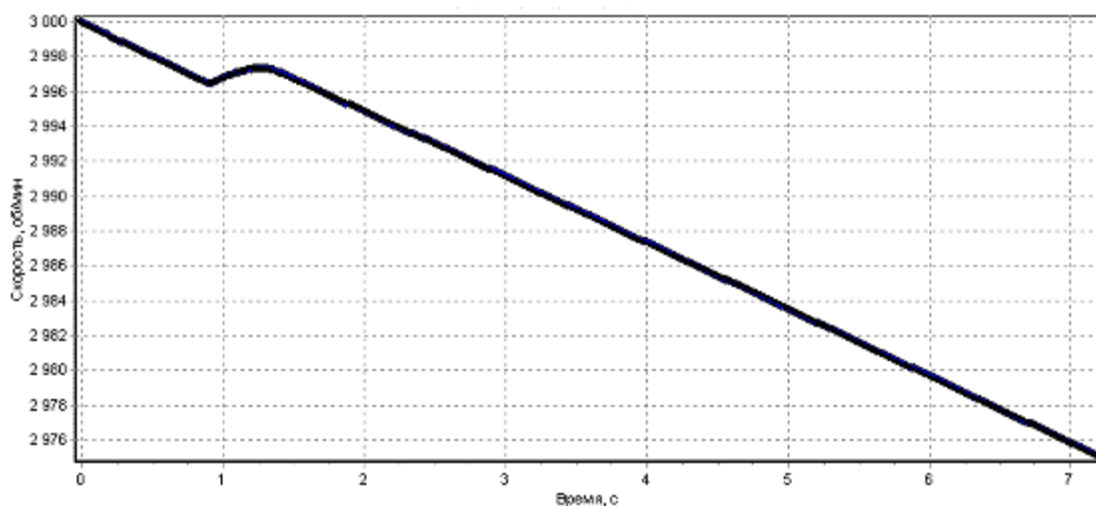


Рис. 7. Изменение скорости ротора синхронного двигателя при замыкании на его шинах

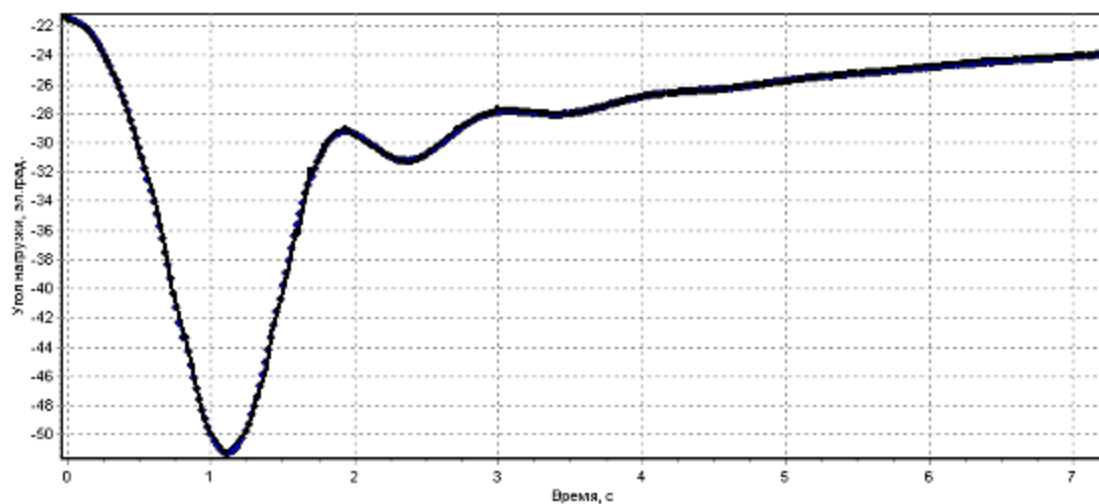


Рис. 8. Изменение угла ротора синхронного двигателя при работе форсировки

опрокидывания двигателя и, следовательно, ухудшает динамическую характеристику машины.

Кроме суждения об устойчивости отдельных двигателей, полученные характеристики позволяют построить эквивалентную динамическую характеристику группы асинхронных двигателей в зависимости от величины остаточного напряжения, необходимую при определении динамической устойчивости автономно работающей системы электроснабжения.

Динамическая характеристика синхронного двигателя в общем случае представляет собой изменение угла во времени при резких возмущениях в питающей сети или на валу двигателя [4].

В ходе расчета на каждом шаге расчета определяется небаланс мощности на валу и вычисляется соответствующее ему изменение угла. В переходном режиме генераторы вводятся постоянной переходной э.д.с. за неизменным переходным сопротивлением.

Быстрое отключение короткого замыкания приводит к возвращению синхронного двигателя в синхронизм и предотвращает появления поворотов ротора относительно поля статора (рис. 4, 5). Не приведет к выпадению из синхронизма и удаленное короткое замыкание даже при большем

времени отключения. При замыкании на шинах двигателя и даже при малом времени отключения двигатель тормозится (рис. 6, 7). Работа форсировки двигателя предотвращает его останов (рис. 8).

Как и для асинхронного двигателя, полученные характеристики могут быть применены для анализа динамической устойчивости отдельных электроприемников, а также для определения комплексной динамической нагрузки узла в целом.

Современные условия работы собственных электростанций не исключают появления режимов, опасных с точки зрения сохранения динамической устойчивости работы сети. Приведенные выше расчеты позволяют осуществить прогноз возможных режимов работы двигателей и разработать мероприятия, позволяющие предотвратить нарушение работы электроприемников. Кроме того, наличие динамических характеристик нагрузки позволит производить более точный расчет режимов при значительных изменениях параметров сети, в том числе и при выходе энергоузла на отдельную от энергосистемы работу, что обуславливает актуальность приведенных расчетов и их применение на практике.

Библиографический список

1. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 283 с.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / Под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с., ил.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с., ил.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1970. 472 с., ил.

УДК 621.771.001

О.М. Евсеев

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РЕГУЛЯТОРАМ ДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК МЕЖДУ ВАЛКАМИ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Обжатие металла в очаге деформации осуществляется под действием касательных сил трения. Усилие прокатки деформацию не производит, так как вектор усилия прокатки неподвижен. Усилие прокатки и коэффициент трения определяют величину сил трения. Передача энергии от валков полюсе осуществляется в зоне отставания очага деформации за счёт пластического внедрения микровыступов шероховатости валка в металл полосы. Энергия, передаваемая в зону отставания, больше, чем это необходимо для совершения за-

данного обжатия, поэтому часть её накапливается в виде упругой энергии сжатия металла в зоне отставания. Пластическая деформация в зоне опережения происходит за счёт накопленной упругой энергии сжатия в зоне отставания. Благодаря этому металл в зоне опережения обгоняет валки, а в нейтральном сечении возрастает давление. Во всём пластическом очаге деформации металл испытывает напряжение упругого сжатия и напряжения пластического сдвига. Касательные силы трения меняют знак в нейтральном сечении на по-

верхности валка, внутри очага деформации знак касательных сил сопротивления не меняется. Касательные силы трения на валке и касательные силы сопротивления деформации вдоль дуги очага деформации статически не уравновешены, поэтому они имеют разные скорости.

Энергия, передаваемая от валков полосе, расходуется на совершение пластической деформации и на износ контактных поверхностей полосы и валка, то есть на износ шероховатостей. В результате износа образуется металлическая пыль, и часть энергии расходуется на нагрев валков и полосы. Мощность пластической деформации пропорциональна результирующей касательной силе, приведенной к сечению выхода полосы, и скорости этого сечения. Мощность трения потерь пропорциональна касательным силам трения и разнице скоростей трущихся поверхностей. При симметричной прокатке скорости и моменты верхнего и нижнего валков одинаковы. Однако реально симметричных режимов прокатки не существует. Проблем с выравниванием скоростей валков с требуемой точностью нет, есть проблемы с выравниванием моментов прокатки. Равенство моментов позволяет полностью использовать мощность обоих двигателей, продлевает срок службы их, а также уменьшает потери на нагрев двигателей и их преобразователей.

Разница моментов прокатки при равных линейных скоростях валков зависит в основном от разницы сил трения, которая в свою очередь зависит от разницы геометрических размеров шероховатостей валков и от разницы механических свойств шероховатостей, в частности от различия пределов текучести и пределов прочности металла валков. Чтобы разница сил трения на верхнем и нижнем валках была минимальной, то при равных условиях термической обработки пары рабочих валков они должны быть изготовлены из одной плавки. Подбор пары рабочих валков должен быть сделан на заводе-изготовителе валков.

Равенство шероховатостей и механических свойств валков позволяет не только выравнивать моменты прокатки, но и обеспечить одинаковый износ шероховатости обоих валков в процессе прокатки.

Мощность износа определяется интегрированием элементарной мощности износа вдоль дуги очага деформации

$$N_T = N_{T0} + N_{T1} = \int_0^{l_T} dN_{T0} + \int_{l_T}^{l_0} dN_{T1}, \quad (1)$$

где N_{T0} , N_{T1} – мощности трения износа в зонах отставания и опережения соответственно; l_0 – длина дуги очага деформации; l_T – длина дуги очага от сечения входа до нейтрального сечения.

Дифференциал мощности износа

$$dN = \tau \cdot b \cdot dl(V_b - V), \quad (2)$$

где V – скорость сечения очага деформации на расстоянии l от входа очага деформации; V_b – линейная скорость валка; b – ширина полосы; τ – касательное напряжение трения на поверхности валка.

В теории практики нет теоретических зависимости распределения сил трения τ вдоль очага деформации. Для качественной оценки влияния изменения опережения металла S на величину потерь энергии и на величину момента прокатки принимаем постоянство удельных сил трения, то есть $\tau = \text{const}$.

Скорость сечения толщиной h на расстоянии l определяется исходя из постоянства секундного объема

$$V = \frac{V_0 h_0}{h}. \quad (3)$$

Заменяя дугу хордой, можно составить пропорцию

$$\frac{\Delta h_1}{l_0} = \frac{\Delta h}{l}, \quad (4)$$

где Δh_1 – абсолютное обжатие в сечении выхода очага деформации; Δh – обжатие на расстоянии l от входа очага деформации.

Тогда

$$h = h_0 - \Delta h = h_0 - \frac{\Delta h_1}{l_0} l. \quad (5)$$

Подставив h из (5) в (3), получим значение скорости сечения очага деформации

$$V = \frac{V_0 h_0}{h_0 - \frac{\Delta h_1}{l_0} l}. \quad (6)$$

Мощность износа в зонах отставания и опережения с учётом ((1), (2), (6))

$$N_T = \int_0^{l_T} \tau \cdot b \cdot \left(V_b - \frac{V_0 h_0}{h_0 - \frac{\Delta h_1}{l_0} l} \right) dl +$$

$$+ \int_{l_\gamma}^{l_0} \tau \cdot b \cdot \left(\frac{V_0 h_0}{h_0 - \frac{\Delta h_1}{l_0} l} - V_B \right) dl. \quad (7)$$

Длина зоны отставания l_γ определяется из выражения (6), в котором $V = V_B$:

$$l_\gamma = \frac{h_0 \cdot (V_0 - V_B)}{\Delta h_1 \cdot V_B} l_0. \quad (8)$$

После интегрирования (7) с учётом (8) получено выражение для мощности износа

$$N_T = \tau \cdot b \cdot \frac{\sqrt{R \cdot \Delta h_1}}{\Delta h_1} V_B \cdot \left[\Delta h_1 - (1 + S) \cdot h_1 \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \right], \quad (9)$$

в котором $l_0 = \sqrt{R \cdot \Delta h}$, $S = \frac{V_1 - V_B}{V_B}$.

Момент прокатки определяется из выражения

$$M = \tau \cdot b \cdot (2l_\gamma - l_0) \cdot R. \quad (10)$$

Подставив значение l_0 и l_γ , после преобразований получим

$$M = \tau \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h_1} \cdot \left(1 - \frac{2h_1}{\Delta h_1} \cdot S \right) \cdot R. \quad (11)$$

Для установившегося процесса прокатки в

выражении (9) обозначим

$$A = \tau \cdot b \cdot \frac{\sqrt{R \cdot \Delta h_1}}{\Delta h_1} \cdot V_B,$$

тогда

$$N_T = A \cdot \left(\Delta h_1 - (1 + S) \cdot h_1 \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \right). \quad (12)$$

В выражении (11)

$$B = \tau \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h_1} \cdot R,$$

тогда

$$M = B \cdot \left(1 - \frac{2h_1}{\Delta h_1} \cdot S \right). \quad (13)$$

Зависимости (12) и (13) представляют собой уравнение прямых линий $N_T = f(S)$ и $M = f(S)$.

Для конкретного симметричного режима обжатий ($h_0=4$ мм, $h_1=3,2$ мм) эти зависимости приведены на **рис. 1** (линии 1и 1'). Там же приведены зависимости, когда силы трения на верхнем валке больше симметричных на 20 % (линии 2 и 2'), а на нижнем на 20% меньше (линии 3 и 3'). Анализ графиков показывает, что мощность трения износа незначительно зависит от изменения опережения, но пропорциональна силе трения. Это обстоятельство очень важное для выравнивания коэффициентов трения на валках в процессе прокатки. Шероховатость с большей высотой микровыступов и более твёрдая будет изнашиваться быстрее, что способствует самовыравниванию моментов на валках в процессе прокатки. Момент прокатки в большей степени зависит от изменения опережения, чем мощность износа.

Выравнивать моменты на валках можно, воздействуя на скорость только одного валка, например уменьшать скорость перегруженного валка (опережение S возрастает) или увеличивать скорость недогруженного валка (опережение S уменьшается).

Уменьшение скорости и момента только перегружённого валка приводит к уменьшению суммарной мощности валков, к уменьшению скорости полосы, а следовательно,

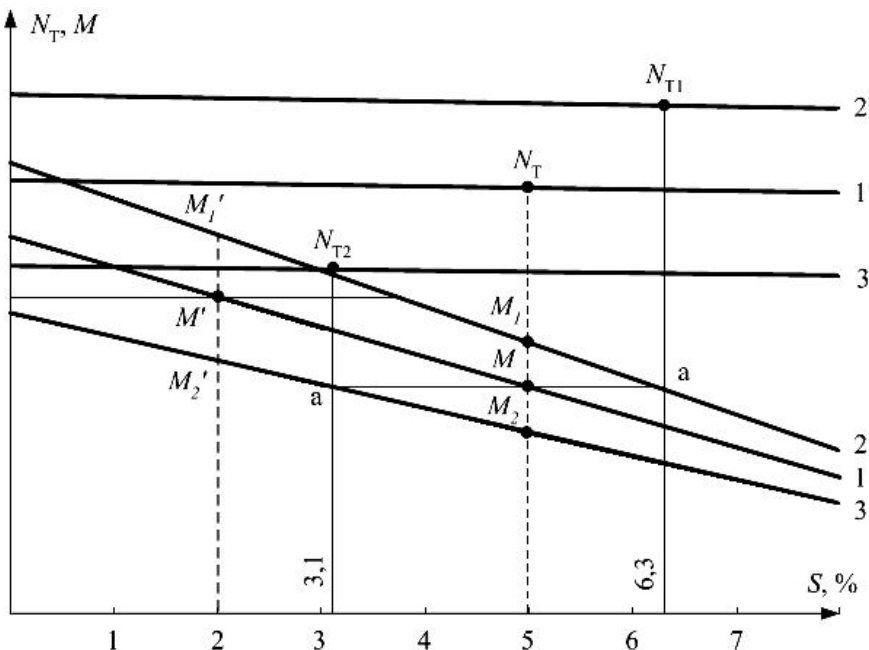


Рис. 1. Зависимость мощности трения N_T и моментов прокатки M от опережения металла S на верхнем и нижнем валках

уменьшается опережение на недогруженном валке. За счёт этого на недогруженном валке при прокатке без натяжений возрастает момент прокатки. Так как выравнивание моментов приводит к уменьшению скорости полосы, то при непрерывной прокатке нарушается постоянство секундного объёма в стане, уменьшается заднее натяжение и возрастает переднее. Выравнивание моментов путём увеличения скорости только недогруженного валка также приводит к нарушению постоянства секундного объёма, но в этом случае увеличивается заднее натяжение и уменьшается переднее.

При отклонении межклетьевых натяжений от заданных значений вступают в работу регуляторы натяжений. Если регуляторы натяжений быстроедействующие с воздействием на гидравлические нажимные устройства и астатические, они не позволяют измениться межклетьевым натяжением, поэтому выравнивание моментов прокатки между валками не произойдёт и может возникнуть колебательный режим. Колебание натяжений будут происходить с частотой упругих синфазных колебаний валков, так как именно синфазные колебания валков вызывают продольные колебание полосы и колебание натяжений. При синфазных колебаниях валков якоря двигателей колеблются с разными амплитудами, так как жесткости трансмиссионных валов верхнего и нижнего приводов разные. Возникающая при этом разница мгновенных значений динамических моментов якорей усиливается регулятором деления нагрузок, воздействующим только на один двигатель.

Регулятор деления нагрузок с воздействием на один двигатель был разработан для 5-клетьевого стана 2030 холодной прокатки на НЛМК (г. Липецк) фирмой Siemens. Автором этой статьи выполнено осциллографирование процесса выравнивания нагрузок*. На рис. 2 приведена осциллограмма, из которой следует, что выравнивание нагрузок между двигателями не происходит, а в процессе выравнивания возникает колебательный режим.

Приведенный выше анализ позволяет сделать вывод о том, что выравнивание нагрузок между валками на непрерывных станах холодной прокатки следует производить путем изменения скорости не одного валка, а обоих валков в противофазе.

* Исследование оборудования и технологии холодной прокатки тонких полос на стане 2030 НЛМК с целью повышения качества проката: Отчет / ВНИИМЕТМАШ; № ГР 01860006344. М., 1987. 63 с.

При выравнивании моментов между валками не должно нарушаться постоянство секундного объёма в стане. Для этого не должна изменяться скорость полосы и суммарный момент прокатки. На рис. 1 показан частный случай выравнивания моментов при среднем опережении 5% и разница моментов $\pm 20\%$ от среднего. Чтобы суммарный момент остался неизменным, скорость перегруженного верхнего валка нужно уменьшить, так чтобы опережение на нем возросло до 6,3%, а скорость нижнего недогруженного валка повысить, так чтобы опережение на нем уменьшилось до 3,1%. Таким образом, чтобы суммарный момент прокатки остался неизменным, скорость перегруженного валка нужно уменьшать в меньшей степени, чем увеличивать скорость недогруженного валка. Если при выравнивании нагрузок увеличение и уменьшение скоростей верхнего и нижнего валков сделать одинаковыми, отрезок а-а на рис. 1 опустится ниже, следовательно, выравнивание нагрузок приведет к уменьшению суммарного момента валков. В результате обжатие в клетки уменьшается и регуляторы толщины и натяжения отреагируют на это перемещением нажимного устройства или изменением скоростей двигателей. Изменение коэффициентов трения на валках в процессе прокатки происходит очень медленно. Поэтому регуляторы толщины и натяжения успевают отреагировать на изменение момента прокатки от действия регуляторов деления нагрузок. Кроме того, нельзя прогнозировать, в каком соотношении нужно изменять скорости верхнего и нижнего валков, чтобы не изменить суммарный момент прокатки при выравнивании нагрузок на валках, так как зависимости, приведенные на рис. 1, построены исходя из постоянства сил трения на валках, что на самом деле не так. Однако они дают возможность показать, что выравнивание нагрузок может привести к пробуксовке одного валка относительно полосы. Из рис. 1 видно, что при опережении $S=2\%$ выравнивание моментов не произойдет и нижний недогруженный валок будет иметь отрицательное опережение, то есть будет буксовать. Величина отрицательного опережения зависит от величины коэффициента регулятора деления нагрузок. Чем точнее выравниваются нагрузки, тем больше пробуксовка в случае ее возникновения. Нагрузка на буксующем валке практически не меняется, поэтому реагировать на сигнал

регулятора деления нагрузок будет только момент перегруженного валка, а это, как отмечалось выше, приводит к уменьшению секундного объема. Если при пробуксовке недогруженного валка не ограничивать разницу скоростей, то момент перегруженного валка снизится до момента буксующего, нагрузки на валках сравниваются, пробуксовка может исчезнуть, но уменьшится момент клетки. Уменьшение секундного объема может произойти на столько, что потребуется перестройка обжатий всего стана, чтобы обеспечить заданную толщину на его выходе. Клеть с буксующим валком уменьшает технологический коэффициент передачи в структуре регуляторов толщины и натяжения. Это может вызывать появление колебательных режимов и снизить точность регулирования толщины.

Для ограничения пробуксовок нужно ограничить разницу скоростей валков так, чтобы опережение на валках изменялось в пределах $\pm(2-$

3)%). Если такой разницы скоростей окажется недостаточно для выравнивания моментов, разница моментов останется. В этом случае перегруженный валок, имея меньшую скорость, будет больше изнашиваться, так как мощность трения износа на нем будет больше. Она практически, как отмечалось выше, не зависит от опережений (см. рис. 1). Наступит режим самовыравнивания коэффициентов трения. Большая шероховатость будет больше изнашиваться, а разница моментов прокатки стремиться к нулю.

При ограниченной разнице скоростей валков в пределах $\pm(2-3)\%$ от среднего значения скорости может возникнуть пробуксовка недогруженного валка (см. рис. 1). При малой разнице скоростей эффект самовыравнивания сил трения останется. Если разницу скоростей не ограничивать, самовыравнивания не будет и буксующий валок начнет полироваться. Явление полировки одного валка наблюдалось на 4-клетьевом стане 2500 холодной прокатки ММК.

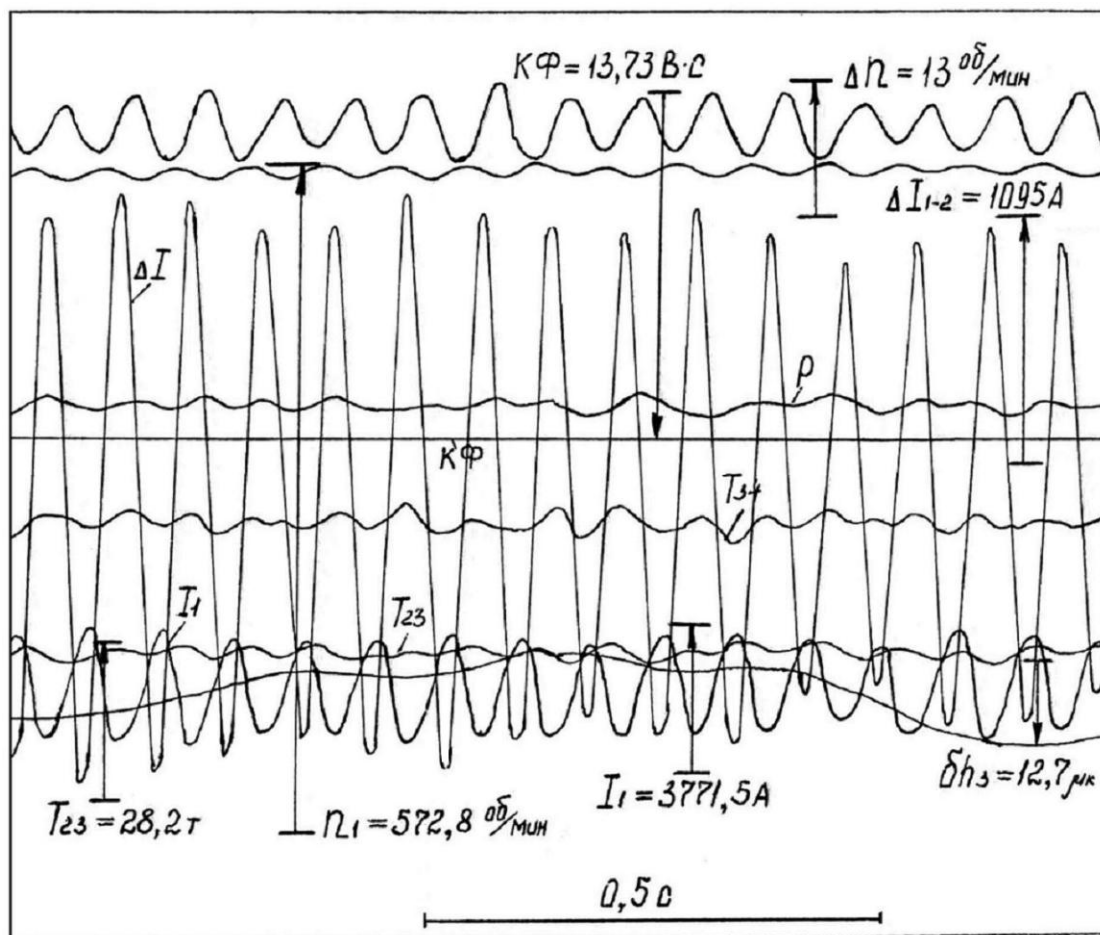


Рис. 2. Осциллограмма процесса прокатки при использовании регулятора деления нагрузок с воздействием на один двигатель

Кроме основной задачи по выравниванию нагрузок между валками в процессе прокатки, регулятор деления нагрузок должен облегчить надежный захват полосы валками при заправке ее в стан. Для облегчения захвата полосы рабочие валки часто насекают дробью. Перед захватом при прокатке толстой полосы между валками есть зазор, валки между собой механически не связаны. Выравнять нагрузки между валками нельзя, а если попытаться это сделать, то валки начнут вращаться в разные стороны, так как моменты холостого хода разные и не выравниваются при изменении скоростей. При вращении валков перед захватом в разные стороны имеющиеся в трансмиссиях приводов люфты (в редукторах, в шпинделях, в трефах) закрыты в разных направлениях. При входе полосы в клеть валки тормозятся, происходит закрытие люфтов в одном из приводов, возникает динамический удар и возможна динамическая пробуксовка одного из валков, в результате чего на валке образуется навар. Наоборот, если перед захватом полосы между валками нет зазора, моменты между ними нужно выравнивать. В противном случае из-за какой-либо несимметрии, электрической или механической, один привод будет работать в двигательном режиме, а другой – в генераторном. Люфты в трансмиссиях будут закрыты, но в разных направлениях. При входе полосы в клеть возникнет динамический удар. Если же перед захватом полосы моменты двигателей будут выравнены, оба привода будут работать в двигательном режиме, преодолевая суммарный момент холостого хода. Люфты в обоих приводах будут закрыты в одном направлении, при захвате полосы динамических ударов не возникает. Таким образом, регулятор деления нагрузок должен автоматически включаться или отключаться в зависимо-

сти от наличия зазора между валками. Изменение токов и скоростей двигателей при захвате полосы сведенными валками с отключенным и включенным РДН показано на рис. 3 и 4 соответственно.

На осциллограммах видно, что при захвате полосы возникают противофазные и синфазные колебания валков. Противофазные колебания быстро затухают, но они могут вызвать навар полосы на валках. Синфазные колебания валков вызывают продольные колебания полосы и при захвате полосы следующей клетью выдергивают полосу из валков. Поэтому, если колебания полосы при подходе ее к следующей клетке продолжают, вальцовщику приходится останавливать клеть, колебания полосы затухают, затем процесс заправки возобновляется. Оба вида колебаний можно демпфировать регулятором деления нагрузок, но для этого нужен большой коэффициент РДН. Противофазные колебания затухают быстро, так как они с одной стороны демпфируются электромагнитными моментами двигателей, с другой – затрата энергии на пластическую деформацию. Синфазные колебания валков происходят при малой потере энергии, поэтому долго не затухают. Оба валка колеблются в фазе вместе с полосой без потери энергии на деформацию. Чтобы демпфировать синфазные колебания валков, нужно заставить их часть энергии отдавать на деформацию полосы. Для этого нужно с высокой точностью выравнять моменты якорей двигателей, тогда якоря будут колебаться с одинаковой амплитудой. Ввиду того, что жесткости трансмиссионных валов верхнего и нижнего приводов разные, валки будут колебаться синфазно, но с разными амплитудами, следовательно, и с разными скоростями. В процессе колебания на валках будет меняться скольжение, следовательно, часть кинетической энергии валков

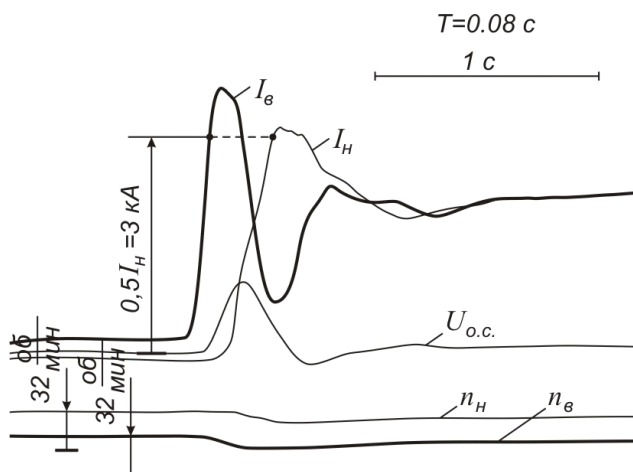


Рис. 3 – Переходные процессы при захвате полосы сведенными валками с отключенным РДН

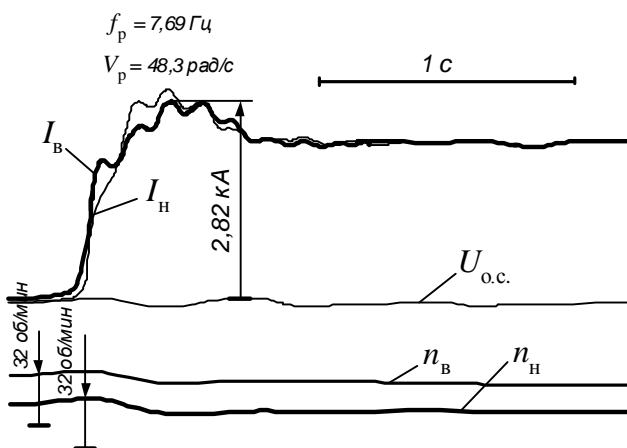


Рис. 4 – Переходные процессы при захвате полосы сведенными валками с включенным РДН

будет расходоваться на совершение пластической деформации, что способствует демпфированию колебаний.

Выводы

1. Для одинакового деления нагрузок между рабочими валками клетки пара валков должна быть изготовлена из одной плавки, подвергаться одинаковой термической и механической обработке.

2. При выравнивании нагрузок между валками нужно изменять скорость не одного валка, а обоих в противофазе.

3. При выравнивании нагрузок относительная разница скоростей валков должна быть ограничена (2–3)% от среднего значения скорости.

4. Перед захватом полосы при разведенных валках на холостом ходу выравнивание нагрузок должно быть отключено, при сведенных валках без зазора – включено.

5. Для демпфирования противофазных и синфазных колебаний валков коэффициент регулятора деления нагрузок должен быть максимальным по условиям устойчивости контура регулирования.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Буланова Ольга Викторовна – старший преподаватель, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Васильев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Вдовин Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры электрометаллургии и литейного производства ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Заслуженный деятель науки РФ.

Головин Вячеслав Васильевич – начальник центральной электротехнической лаборатории ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Данилов Владимир Николаевич – помощник начальника цеха по электрооборудованию кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Демин Степан Александрович – аспирант кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Евсеев Олег Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Журавлев Юрий Петрович – главный инженер управления главного энергетика ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Игуменцев Валентин Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Ишматов Закир Шарифович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского государственного технического университета (УГТУ-УПИ), г. Екатеринбург.

Карандаев Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электротехнических систем, декан энергетического факультета ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Кирпичников Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Коваленко Алексей Юрьевич – ведущий инженер центральной электротехнической лаборатории ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Косенков Алексей Васильевич – начальник отделения электропривода центральной электротехнической лаборатории ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Ларина Татьяна Петровна – старший преподаватель кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Лукьянов Виктор Петрович – заместитель главного инженера по автоматике управления главного энергетика ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Лукьянов Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, заместитель проректора по научной работе, директор Инновационно-технического центра ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Малафеев Алексей Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Николаев Александр Аркадьевич – студент гр. ЭА-01-1 кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Омельченко Евгений Яковлевич – кандидат технических наук, директор Магнитогорского филиала ООО НТЦ «Приводная техника» (г. Челябинск), доцент.

Погорелов Иван Леонидович – кандидат технических наук, заместитель главного энергетика по эксплуатации электрического оборудования ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Ротанова Юлия Николаевна – аспирант, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Сарваров Анвар Сабулханович – доктор технических наук, профессор, декан факультета автоматики и вычислительной техники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Селиванов Игорь Андреевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Суспицын Евгений Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Фадеев Андрей Викторович – инженер-наладчик Магнитогорского филиала ООО НТЦ «Приводная техника» (г. Челябинск).

Чесноков Сергей Владимирович – главный инженер ОАО «НИИметиз», г. Магнитогорск.

Швидченко Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Шиляев Павел Владимирович – заместитель главного энергетика по автоматизации и наладке ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Ячиков Игорь Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА

1. ИНДУКЦИОННЫЙ импульсный датчик скорости электроприводов постоянного тока без механической стыковки с валом двигателя. Основные характеристики: диапазон измерений – не менее 500; нелинейность характеристики – не более 0,2 %; уровень оборотных пульсаций – не более 0,1 %. Рекомендуемые области применения: электроприводы, работающие в условиях повышенных температур, влажности, вибрации и запыленности в замен серийно выпускаемых датчиков скорости.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук **В.И. Косматов**.

2. ИНДУКЦИОННАЯ шахтная печь периодического действия, предназначенная для нагрева токами промышленной частоты калиброванной стали и проволоки в крупногабаритных мотках внешним диаметром до 1,5 м. Предлагается использование данной печи в термических отделениях калибровочных и проволочных цехов металлургических предприятий взамен колпаковых печей косвенного действия. Печь обеспечивает энергосберегающий нагрев разовой загрузки массой до 3 т в окислительной среде со скоростью до 250 град/ч и расходом электроэнергии до 350 кВтч/т. По отношению к известным образцам, предлагаемая конструкция проще в изготовлении, т.к. использует типовую пускорегулирующую аппаратуру.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук **Ю.И.Тартаковский**.

3. СИСТЕМА автоматического регулирования возбуждения крупных сетевых синхронных двигателей мощностью 1-10 МВт с резкопеременной нагрузкой, например используемых в качестве электроприводов клетей и преобразовательных агрегатов прокатных станов. Предлагаемая система позволяет существенно демпфировать качания ротора и активного тока статора при набросах нагрузки и одновременно качественно регулировать реактивный ток статора на заданном уровне в функции напряжения сети и реактивных токов смежных потребителей. При этом увеличивается надёжность и устойчивость синхронного двигателя и механического оборудования, повышается качество напряжения питающей сети, снижаются потери электроэнергии. Разработанная система реализуется на базе промышленных тиристорных возбудительных устройств посредством их частичной реконструкции без дополнительных капитальных затрат.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук **Г.П. Корнилов**.

4. ТЕХНОЛОГИЯ производства азотированного феррохрома в процессе обработки его расплава струей низкотемпературной азотной плазмы. В качестве сырья могут быть использованы отходы ферросплавного производства. Технология предназначена для предприятий металлургического комплекса. По отношению к лучшим мировым образцам - превосходит или соответствует многим аналогичным разработкам, проще и дешевле в изготовлении. Стоимость оборудования меньше аналогов на 25 %. Срок окупаемости проекта до 2-х лет. Внедрение разработки позволит наладить собственное производство азотированных ферросплавов для легирования стали вместо покупаемых на стороне. Затраты на установку составляют 150 тыс. у.е.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук **Е.Б. Агапитов**.

5. ПРОГРАММЫ расчета установившихся режимов системы электроснабжения крупных промышленных предприятий с собственными электростанциями и замкнутой структурой сетей 110–220 кВ. Использование программ позволяет выполнить расчет: уровней напряжения и потерь мощности; оптимальной загрузки источников реактивной мощности; определение оптимальных коэффициентов трансформации силовых трансформаторов; токов короткого замыкания; токов замыкания на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью с учетом работы дугогасящих реакторов.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук **А.В. Малафеев**.

6. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ асинхронный двигатель с индивидуальной компенсацией реактивной мощности. Применяется для насосов, вентиляторов, транспортеров, нефтяных качалок, рольгангов, компрессоров и т.д. Обладает повышенными энергосберегающими свойствами: $\cos\varphi=1$ и энергетическим КПД $\eta_{эн}=\eta \cdot \cos\varphi=0,85-0,9$, что на 15-20 % выше по сравнению с энергетическим КПД

традиционных асинхронных двигателей. Дополнительные затраты на изготовление нового или реконструкцию обычного двигателя окупаются экономией электроэнергии за 0,25-0,5 года.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук **Р.Г. Мугалимов.**

7. УСТРОЙСТВО тягодутьевого на основе сопла с центральным телом турбореактивного двигателя. Диапазон расходов от 15 м³/ч для колпаковых печей и до 3000-6000 м³/ч для вращающихся печей известняково-доломитового и цементного производств. Сопло с центральным телом может быть использовано для организации эвакуации продуктов сгорания из рабочего пространства колпаковой печи, либо для достижения необходимого разряжения в условиях вакуумирования при внепечной обработке стали. Простота конструкции в изготовлении и эксплуатации, а также снижение расходов природного газа на 5-10 % при сохранении производительности печи и качества обрабатываемого материала обеспечивает значительный эффект в производстве металлургической извести.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук **В.В. Коцев.**

8. СИСТЕМА автоматического регулирования удельного натяжения и высоты петли полосы чистой группы широкополосного стана горячей прокатки с улучшенными динамическими характеристиками. Предложенный алгоритм определения натяжения по параметрам электропривода петледержателя позволяет выполнить систему по принципу прямого регулирования координат. Разработанная система регулирования позволяет добиться: обеспечения нижних границ допусков стандарта по толщине готового проката; сокращения количества застреваний, возникающих из-за нерегулируемых отклонений натяжений прокатываемой полосы; снижения концевой обрезки за счет улучшения условий захвата и выброса полосы, и как результат всего вышесказанного, повышения коэффициента выхода годного горячего проката.

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук **А.С. Карандаев.**

9. ОРГАНИЗАЦИЯ дистанционного обучения иностранным языкам.

Преимущества предлагаемой технологии: модульный характер обучения, обеспечивающий конструирование учебных программ для каждого обучаемого с учетом уровня его подготовки и потребностей; ориентация на обучение взрослых слушателей (возможность выбора индивидуальных графиков прохождения курса); использование открытых Интернет - стандартов и интерактивных элементов.

Экономичность дистанционных технологий: позволяют проводить обучение как групп, так и отдельных слушателей, удаленных от образовательного центра; обеспечивают возможность создания и обновления курсов в короткие сроки; обладают относительно невысокой стоимостью, что делает их доступными для большинства желающих получить образование.

Руководитель разработки – доц., канд. филол. наук **Л.И. Антропова.**

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ ФАКУЛЬТЕТА АВТОМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

1. КОМПЬЮТЕРНЫЕ технологии технического обслуживания и диагностирования промышленного оборудования, обеспечивающие: нормализацию и оцифровку различных параметров промышленного оборудования; регистрацию и отображение параметров в различных графических формах в реальном масштабе времени; формирование базы данных параметров оборудования и различные варианты математической обработки; разработку структуры и последующую работу диагностических моделей в реальном масштабе времени.

Основные факторы экономической эффективности от внедрения систем контроля и диагностирования: сокращение количества аварийных отказов оборудования; оперативное обнаружение и предотвращение аварий на ранних стадиях их развития; проведение профилактических ремонтов по фактическому состоянию оборудования.

В настоящее время предлагаемые системы внедрены и успешно эксплуатируются на ряде объектов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»: на 2-х клетевом дрессировочном стане и на 5-ти клетевом стане холодной прокатки 630 ЛПЦ-8; на стане горячей прокатки 2500 ЛПЦ-4; на сталь и промковшах МНЛЗ № 1 и МНЛЗ № 4 кислородно-конвертерного цеха, на установке печь-ковш кислородно-конвертерного цеха.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук **С.А. Евдокимов**.

2. СИСТЕМА энергосберегающего управления процессом нагрева непрерывно-литых заготовок в нагревательных печах проходного типа.

Система управления в каждый момент времени выполняет расчет и установку оптимального распределения тепловых нагрузок по зонам нагревательной печи в зависимости от темпа прокатки, геометрических размеров (толщины) и начального теплового состояния заготовок, загружаемых в нагревательную печь и обеспечивает рациональное сжигание топлива в каждой зоне нагревательной печи путем поиска и поддержания оптимального соотношения топливо-воздух, что позволяет снизить удельный расход топлива на 3–5%.

Внедрение системы на современных нагревательных печах, оснащенных локальными контурами управления с использованием микропроцессорных контроллеров, практически не требует изменения этих систем. Обязательным условием эффективной работы системы является контроль и управление температурой поверхности нагреваемого металла по зонам нагревательной печи.

В результате внедрения системы на одной печи участка нагревательных печей стана 2500 ЛПЦ-4 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» полученный экономический эффект составил 360 тыс. руб.

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук **Б.Н. Парсункин**.

3. МЕТОДИКА проектирования и автоматизированный электропривод многороликового тянущего правильного устройства (ТПУ) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), позволяющий за счет целесообразного регулирования координат электропривода ТПУ улучшить качество непрерывнолитых заготовок и увеличить производительность МНЛЗ.

В результате внедрения электропривода на МНЛЗ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» получено: стабилизация скорости разлива стали в пределах $\pm 2\%$; снижение статических и динамических растягивающих усилий в кристаллизующемся слитке; оперативное (непосредственно в ходе разлива стали) диагностирование неисправностей в роликовой проводке по 9-ти показателям.

Экономический эффект от внедрения автоматизированного электропривода ТПУ на МНЛЗ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» составил 24 млн руб. в год.

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук **С.И. Лукьянов**.

4. СИСТЕМА плавного пуска высоковольтных электродвигателей переменного тока с использованием трансформаторно-тиристорного низковольтного устройства.

Пусковое устройство содержит в своем составе трехфазный трансформатор мощностью в три раза меньше мощности электродвигателя и низковольтный тиристорный регулятор напряжения, подклю-

ченый в цепь вторичной обмотки трансформатора. Для создания такого пускового устройства не требуются высоковольтные силовые ключи и высоковольтное исполнение комплектного тиристорного устройства. Стоимостные показатели предложенного варианта построения пускового устройства в 2–3 раза ниже существующих устройств высоковольтного исполнения.

Устройство внедряется на вентиляторе в ЛПЦ-4 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук **А.С. Сарваров**.

5. ТЕХНОЛОГИЯ выпуска автолиста с регламентированной микротопографией поверхности, а так же аппаратура измерения параметров микротопографии поверхности и ее функциональных характеристик (функции распределения вероятности, корреляционных и спектральных функций, фазовых портретов и фрактальных характеристик).

В результате внедрения данных работ на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» разработана технология выпуска автолиста с первой группой обработки поверхности с регламентированной микротопографией поверхности по высотным и шаговым параметрам с подтвержденным экономическим эффектом 2058 тыс. руб. в год.

Руководитель разработки – проф., канд. техн. наук **В.К. Белов**.

6. ТЕХНОЛОГИЯ непрерывной разливки IF-стали на машинах криволинейного типа, предусматривающая разливку низкоуглеродистой стали на машинах непрерывной разливки криволинейного типа с охлаждением по зонам вторичного охлаждения путем подачи воды в зависимости от скорости вытягивания заготовки, требуемой макроструктуры и содержания углерода, марганца и серы.

Внедрение новой технологии позволило без изменения конструкции машины получать металл требуемой макроструктуры при экономии водных ресурсов; расширить сортамент слябов шириной более 2350 мм, отливаемых на машинах непрерывного литья заготовок; увеличить среднюю скорость непрерывной разливки на 0,1 м/мин.

Технология внедрена в работу машин непрерывного литья заготовок кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Экономический эффект от внедрения составил 4265 тыс. руб. за счет увеличения производительности машины непрерывного литья заготовок.

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук **Д.Х. Девятов**.

7. ТЕХНОЛОГИЯ автоматизированной оценки непрерывно-литой заготовки прямоугольного и квадратного сечения, исключая визуальную субъективную оценки качества. Автоматизированная оценка качества заготовок прямоугольного сечения производится по электронному изображению серного отпечатка, для заготовок квадратного сечения – по фотографии, получаемой на автоматизированном рабочем месте, входящий в состав КИС ОАО «ММК».

Технология прошла успешные опытные испытания для образцов прямоугольного сечения $250 \times 750 \div 2500 \text{ мм}^2$ в макротемплетной лаборатории, входящей в состав ЦЛК ОАО «ММК». На программное обеспечение для технологии автоматизированной оценки качества непрерывно-литой заготовки получена регистрация в Общероссийском фонде алгоритмов и программ.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук **О.С. Логунова**.

8. СИСТЕМА технического диагностирования состояния и настройки механического и электрического оборудования тянущих роликов зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

В системе технического диагностирования по виду изменения токов нагрузки электродвигателей тянущих роликов в реальном масштабе времени отображаются следующие характерные неисправности, негативно влияющие на качество макроструктуры непрерывнолитых заготовок: износ и остаточный прогиб бочки тянущих роликов; исправность подшипниковых узлов линий привода; исправность редуктора; распределение статических и динамических продольных усилий, создаваемых в слитке электроприводом тянущих роликов в процессе его вытягивания; периодические и случайные буксовки электроприводов тянущих роликов; точность выставки роликовой проводки.

Разработаны обобщенный алгоритм системы технического диагностирования, диагностические признаки и алгоритмы для каждой диагностической функции.

Система технического диагностирования внедрена на МНЛЗ №2,3 ОАО «ММК». Экономический эффект составляет около 2 млн руб. в год.

Руководители разработки: проф., д-р техн. наук **С.И. Лукьянов**;
доц., канд. техн. **Е.С. Суспицын**.

9. СИСТЕМА технического диагностирования электропривода роликов отводящего рольганга листового стана горячей прокатки.

Разработаны обобщенный алгоритм системы диагностирования, диагностические признаки и алгоритмы диагностирования появления неисправностей в электрическом и механическом оборудовании линий привода отводящего рольганга листового стана горячей прокатки. Система диагностирования позволяет в реальном масштабе времени выявить следующие неисправности: эксцентриситет бочки ролика; неисправность одной или двух резиновых муфт; перегрев электродвигателя ролика; неисправность (обрыв) щеточно-коллекторного устройства электродвигателя; состояние подшипниковых устройств линий привода; точность выставки роликов вдоль технологической линии.

Система технического диагностирования внедрена на стане 2000 горячей прокатки ОАО «ММК».

Руководители разработки: проф., д-р техн. наук **С.И. Лукьянов**;
доц., канд. техн. **Д.В. Швидченко**.