

УДК 669.02/09-52

Редакционная коллегия:

Президент РУО АИН РФ, д-р техн. наук,
проф. **В.Г.Лисиенко** – научный редактор (УГТУ);
д-р техн. наук, проф. **Б.Н.Парсункин** – главный редактор (МГТУ);
канд. техн. наук, зав. кафедрой ПКиСУ МГТУ **С.М.Андреев**;
канд. техн. наук, доц. **М.Ю.Рябчиков** – отв. секретарь (МГТУ);
ст. преп. **Е.С. Рябчикова** – секретарь (МГТУ)

Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: межвуз. сб. научн. тр. / под ред. Б.Н. Парсункина. Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2012. с.

Межвузовский сборник научных трудов содержит публикации по результатам исследований специалистами ряда вузов и предприятий Российской Федерации.

Рассмотрены результаты теоретических разработок и практического применения современных технических средств при управлении процессами металлургического производства.

Предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников предприятий металлургической промышленности, эксплуатирующих системы автоматики. Может быть полезен студентам старших курсов соответствующих специальностей.

УДК 669.02/09-52

© Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Но-
сова, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Использование современных микропроцессорных технических средств управления технологическими процессами в металлургии позволяет успешно решать экономические проблемы, возникшие в связи с недостаточным уровнем оснащения промышленных агрегатов современными средствами автоматизации. Причиной этому является существование известных трудностей со сбытом отечественной металлургической продукции на мировом и внутреннем рынках, обострившихся в течение последнего года.

Низкая производительность труда и значительные энергетические затраты существенно снижают конкурентоспособность товарной продукции. Поэтому решение задач ускорения автоматизации металлургического производства, внедрения и развития новых информационных систем диспетчерского управления (SCADA) является весьма актуальной проблемой.

Представленные в данном сборнике работы освещают практически все основные переделы металлургического производства и обеспечивают решение научно-практических задач контроля и управления технологическими процессами на основе разработки более совершенных алгоритмов управления. Большое внимание уделено применению искусственных нейронных сетей и аппарата нечеткой логики в задачах управления и создания моделей технологических процессов.

В данном сборнике приведены результаты исследований, оперативно дающих ощутимые результаты без значительных затрат с использованием ограниченных резервов.

Межвузовский сборник посвящен 20-летию Академии Инженерных Наук имени А.М. Прохорова.

Редакционная коллегия сборника благодарит всех авторов за предоставленные к публикации материалы и надеется на дальнейшее сотрудничество.

**АКАДЕМИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК им. А.М. ПРОХОРОВА
НА УРАЛЕ – ИНЖЕНЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ИННОВАЦИИ И
МОДЕРНИЗАЦИИ**

В 2011 г. Академия инженерных наук им. А.М.Прохорова (АИН) отмечает свое 20-летие. Основные торжества и мероприятия по этому знаменательному событию намечены на ноябрь 2011 г. в Москве.

Академия инженерных наук РФ (АИН РФ) была создана в 1991 году. Ее организатором и первым президентом был академик РАН, лауреат Нобелевской премии, создатель лазерной технологии Прохоров Александр Михайлович, скончавшийся в 2001 году.

В настоящее время Академия носит имя своего первого президента и руководит ею академик РАН Гуляев Юрий Васильевич, одновременно являясь президентом Российского союза научных и инженерных общественных объединений (РосСНИОО).

В составе АИН им. А.М.Прохорова более 1000 членов, объединенных в 10 региональных организаций и по 16 научным отделениям.

В апреле 1992 года в г. Екатеринбурге на базе Уральского политехнического института по инициативе В.Г. Лисиенко был организован Екатеринбургский территориальный научный центр (ЕНЦ) в составе Сибирского отделения АИН РФ. Среди организаторов и создателей ЕНЦ были представители различных научных школ, доктора наук: Лисиенко В.Г., Овчинников Ю.Н., Ярошенко Ю.Г., Смирнов В.К., Лобанов В.И., Ченцов А.Г., Соколовский В.И., Лабунец В.Г и др. Были сформированы два научных отделения: автоматизации и проектирования производственных процессов и вычислительной техники. Избран первый президиум из пяти человек: Лисиенко В.Г., Ярошенко Ю.Г., Овчинников Ю.Н., Панченко Б.А., Лабунец В.Г. Уже через год, учитывая проведенную большую организаторскую работу, президиум АИН постановил создать на базе ЕНЦ Региональное Уральское отделение. Бессменным руководителем, сначала – председателем ЕНЦ, затем президентом РУО АИН, вице-президентом АИН является Заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии Правительства РФ, д-р техн. наук, проф. Лисиенко Владимир Георгиевич.

В г. Перми на базе государственного технического университета сформирован Пермский территориальный научный центр, который возглавил акад. Орлов Ю.М. (в настоящее время руководитель – акад. В.Э.Вильдеман). В г. Нижнем Тагиле был сформирован Северо-Уральский территориальный научный центр во главе с акад. Зудовым Е.Г. (в настоящее время руководитель – акад. В.Ф.Пегашкин). В г. Челябинске под руководством акад. Торопова Е.В. происходило формирование Челябинского территориального научного центра (в настоящее время руководитель – акад. Н.И.Войтович). Территориальные центры сформированы также в Магнитогорске, Ижевске, Кургане, Оренбурге (акад. Б.Н.Парсункин, А.В.Федоров, О.И.Бухтояров, С.И.Богодухов). Успешно работает также Чикагский ТНЦ (США, Б.Майданчик). Окончательное формирование РУО АИН закончилось в 1994 году.

За два года в основном были сформированы научные территориальные центры в Уральском регионе, укреплены творческие и научные связи с предприятиями и организациями Урала для поддержки фундаментальных и прикладных исследований.

Отметим успешную и плодотворную работу ТНЦ: Челябинского (акад. Н.И.Войтович), Северо-Уральского (акад. В.Ф.Пегашкин), Магнитогорского (акад. Б.Н.Парсункин), Пермского (акад. В.Э.Вильдеман).

Большую роль в создании РУО сыграли тесные творческие и организационные связи президиума и президента РУО с вузами Урала.

Фактически создание ЕНЦ и РУО первоначально было реализовано на базе ученых Уральского государственного технического университета-УПИ. Затем в состав РУО вошли в качестве учредителей или коллективных членов Южно-Уральский государственный университет, Пермский государственный технический университет, Оренбургский государственный университет, Курганский государственный университет, Уральский государственный лесотехнический университет, Уральский государственный экономический университет и др. Поддерживались самые тесные связи с Уральским государственным и Уральским государственным горно-геологическим университетами. Для дальнейшего сотрудничества с вузами страны сформирован центр Инженерных образовательных программ.

В составе РУО в качестве учредителей и коллективных членов представлен ряд крупных предприятий Урала: Верхне-Салдинское металлургическое промышленное объединение; Нижнетагильский металлургический комбинат; Екатеринбургский завод обработки цветных металлов; Северский трубный завод; НИИ ме-

таллургической теплотехники; Уральский завод прецизионных сплавов; НИТИ «Прогресс», г. Ижевск; Нижнесалдинский металлургический завод; Трубная металлургическая компания, комбинат «Магнетит», г. Сатка; УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский; НПО «Автоматика», г. Екатеринбург, и др.

В 2003 г. по решению президиума РУО образована новая форма основного участия предприятий и организаций в деятельности РУО — участие в смотре-конкурсе «Развитие академической и инженерной науки на предприятиях и в организациях Уральского региона». Целями проведения конкурса являются способствование использованию достижений академической и инженерной наук, развитие сотрудничества на взаимовыгодной основе по внедрению НИР и оказание помощи в подготовке высококвалифицированных кадров. К настоящему времени уже 30 предприятий реально участвуют в этом смотре-конкурсе.

В свою очередь, РУО АИН является учредителем и участником таких организаций, как международная ассоциация «Знание», Урало-Сибирская ассоциация, «Союз малого и среднего бизнеса Свердловской области», премии Черепановых и др.

В настоящее время в составе РУО АИН более 220 членов: 94 действительных членов (академиков), 82 члена-корреспондента, 27 членов-корреспондентов-советников, 24 академических советников и 1 действительный советник, 30 представителей предприятий - коллективных членов и участников смотра-конкурса. Это самая представительная академическая организация на Урале.

Главная задача РУО заключалась и заключается в разработке и выполнении на базе объединения членов отделения важнейших межрегиональных научно-технических программ, таких как «Наука и производство — экологии и энергосбережению» (руководители – акад. Лисиенко В.Г. и чл.-корр. Щелоков Я.М.); «Наука и производство – космосу и конверсии» (руководители – акад. Лабунец В.Г. и Панченко Б.А.); «Компьютеризация и математические модели в системе образования» (руководитель – чл.-корр. РАН, акад. Ченцов А.Г.); «Трубы нефтяного и газового сортамента» (руководитель – акад. Богатов Л.А.); «Человек и город» (руководитель – акад. Зобнин Б.Б.) и др. В рамках этих программ выполнялись хозяйственные работы, проводились конкурсы грантов, выполнялись поисковые исследования, в рамках действующей докторантуры защищались кандидатские и докторские диссертации. При этом можно отметить комплексный характер проведения ряда научных и опытно-конструкторских работ в рамках межрегиональных проблем, воз-

возможности объединения усилий ученых и предприятий для решения комплексных научных проблем.

Так, в рамках программы «Ресурсосберегающие экологически чистые технологии в металлургии» членами РУО (УГТУ-УПИ и Северским трубным заводом) выполнена комплексная работа: «Комплекс мероприятий экологической защиты в сопряженной системе завод-город», завершившаяся в 1998 г. получением Государственной премии Правительства РФ (В.Г. Лисиенко и работники СТЗ, в том числе член-корреспондент-советник АИН, генеральный директор СТЗ А.С. Дегай и академический советник, Заслуженный мастер России А.Л. Засухин).

Среди комплексных НИР следует отметить проводимую работу в рамках созданной ассоциации КОМЭС (комплексные экспертные системы), руководитель – акад. А.Н.Дмитриев, объединяющей более 10 организаций; НИР по созданию новых технологий комплексной переработки уральских рудных месторождений, включая титано-магнетиты и ильмениты, медно-сернистые руды, окисленные никелевые руды, кианиты (6 организаций), по разработке процессов прямого легирования стали ванадием и другими элементами — процесс ЛП (8 организаций), методы переработки замасляной окалины (4 организации), развитие инженерно-медицинского центра (более 20 организаций, межакадемическая комплексная проблема), решение проблем энергосбережения (Екатеринбургский, Пермский ТНЦ), комплексное решение экологических проблем (Екатеринбургский и Северо-Уральский ТНЦ, г. Н.Тагил), совершенствование радиотехнических систем (Екатеринбургский и Челябинский ТНЦ), развитие систем обработки сигналов (Екатеринбургский ТНЦ совместно с зарубежными учеными) и др.

Проводились хозяйственные работы творческими коллективами для Салдинского и Чусовского металлургических заводов, Верхне-Салдинского металлургического производственного объединения, Уралэнерго, Первоуральского Новотрубного завода, Северского трубного завода, ВИЗ-сталь и др.

На современном этапе в рамках РУО АИН развиваются научные направления: Бескоксвые технологии в металлургии (акад. В.Г.Лисиенко); интегрированный энергоэкологический анализ (акад. В.Г.Лисиенко, чл.-корр. Я.М.Щелоков); многофункциональные плавильные агрегаты (акад.советник Е.А.Коршунов); трубы России (акад. А.А.Богатов); экология и безопасность (акад. Б.Б.Зобнин); холодная мутация ядер (акад. В.Ф.Балакирев, В.В.Крымский); новые покрытия лопаток автосредств (акад. В.П.Лесников, В.П.Кузнецов); гидравлические машины и автоматика, современное

печетрубостроение (чл.-корр. Ю.П.Сторожков, М.Г.Ладыгичев); радиотехнические антенные устройства (Б.А.Панченко, Н.И.Войтович); цифровые методы обработки сигналов (акад. В.Г.Лабунец), фасилити менеджмент (акад. В.П.Чусовских); мировая экономика (акад. Л.Е.Стровский); новые технологии в медицине (акад. В.М.Лисиенко, Н.П.Макарова, Я.Л.Габинский), современные методы функционального анализа в экономике (VALUE ENGINEERING) (иностраный член Б.Майданчик, США).

Хорошие творческие связи РУО АИН имеет с академическими организациями, с рядом институтов УрО РАН (Институт математики и механики, Институт физики металлов. Институт металлургии), а также с Уральским отделением Международной инженерной академии (заключен договор о сотрудничестве), Уральским отделением Международной энергетической академии, Международным межакадемическим союзом.

В 1995 году при РУО АИН был организован Научный центр «Инженерное обеспечение в медицине». В дальнейшем на основе этой инициативы и при поддержке президиума АИН в рамках академии было создано научное отделение «Медицинская инженерия». В настоящее время в составе этого научного отделения на Урале – 12 действительных членов и членов-корреспондентов, профессоров, докторов наук.

Следует также отметить, что два научных отделения АИН РФ базируются на Урале (энергетики и инженерной экономики). Образованы также Научные центры «Теплотехника» (акад. Н.А.Спирин), «Защита от обрушений зданий и сооружений» (акад. А.И.Лебедев), «Информационно-библиографический центр» (чл.-корр. М.Г.Ладыгичев), «История науки и техники» (акад. В.В.Запарий), «Информационно-образовательные программы» (акад. И.В.Мурыгин). Так, в рамках Информационно-библиографического центра с участием членов РУО АИН было издано 5 монографий, 10 крупных справочных изданий.

Среди научных достижений ученых РУО АИН можно отметить развитие и разработку следующих проектов: способы управления высокотемпературными энерготехнологическими процессами на базе регулируемых горелочных устройств и математического моделирования (акад. В.Г. Лисиенко), технологии получения труб для глубоких штанговых насосов и труб из нержавеющей стали с особо чистой поверхностью (акад. А.А. Богатов), проект мини-завода по переработке вторичных материальных ресурсов в сортовой прокат (акад. В.К. Смирнов), агрегаты циклической деформации для производства алюминиевых и стальных листов (акад. О.С. Лехов), спо-

собы повышения эффективности и надежности работы котлов турбин и вспомогательного оборудования ТЭС (акад. Ю.М.Бродов, акад. Б.В.Берг), методы многоцелевой оптимизации режимов энергосистем (акад. П.И.Бартоломей), проблемы стратегического управления предприятиями (акад. Л.Е.Стровский), механизм формирования внешнеэкономической деятельности предприятий (акад. Л.Е.Стровский), новые конструкции и технологии производства металла (Е.А.Коршунов) и др.

Среди проводимых в настоящее время весьма актуальных комплексных НИР с участием ряда организаций и предприятий следует отметить следующие.

Разработка и внедрение способов производства высококачественных железнодорожных колес (акад. А.А.Богатов), создание новых систем управления в металлургии (акад. З.Г.Салихов, Б.Н.Парсункин, Б.Б.Зобнин, Н.А.Спирин), новые способы и конструкции многофункционального плавильного агрегата для производства высоколегированных сталей и сплавов (акад.советник Е.А.Коршунов, акад. В.Г.Лисиенко).

Разработка и использование методов энергетического и энерго-экологического анализа (акад. В.Г.Лисиенко, чл.-корр. Я.М.Щелоков), методы математического моделирования и управления сложными технологическими объектами (акад. Г.К.Маликов, В.Г.Лисиенко).

Разработка и внедрение акустических управляющих систем (акад. В.Г.Лисиенко, акад.советник А.Л.Засухин, В.А.Зеленин, акад. Г.К.Маликов).

Создание новых образцов огнеупорных материалов (акад. И.Д.Кащеев).

Создание высокопрочных турбинных лопаток (акад. В.П.Лесников, В.П.Кузнецов) – работа удостоена премии Правительства РФ.

Новые методы диагностики и лечения заболеваний (в том числе лазерного) с использованием представлений о жидкокристаллических структурах (акад. В.М.Лисиенко), новые методы реабилитации в детском возрасте (акад. С.И.Блохина).

И это лишь часть всего большого комплекса НИР и ОКР, проводимых членами РУО АИН в содружестве с многими организациями.

При РУО АИН работала Высшая электронно-компьютерная школа, была получена лицензия на осуществление педагогической деятельности.

С участием РУО АИН проведен ряд научных конференций и совещаний, в том числе международных. В частности, РУО АИН был проведен совместно с УГТУ-УПИ международный российско-американский семинар по проблемам тепломассопереноса (г. Екатеринбург, 1996 г.). В 2004 г. с активным участием РУО АИН проведена международная конференция «Трубы России - 2004», г. Екатеринбург, VII Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2004», г. Пермь. Ежегодно с 2004 г. проводится международный форум «СВЯЗЬПРОМЭКСПО», в том числе и в 2010 г., по результатам форума несколько участников форума – члены АИН – награждаются золотыми медалями за участие в научно-технической конференции (В.Г.Лисиенко, Б.А.Панченко и др.). С 2005 по 2008 годы РУО АИН были проведены три международных научно–практические конференции «На передовых рубежах науки и инженерного творчества». В 2010 г. при поддержке РУО АИН проведена международная научно–практическая конференция «Интеграция России в мировую экономику: Эволюция экономической культуры». Издаются монографии, сборники научных трудов, подготовлены и используются информационные материалы о научных разработках ученых. Получено 10 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

В 2010-2011 гг. проводится заочная международная Научно-техническая конференция «Инженерная поддержка инновации и модернизации» и уже издана первая часть трудов данной конференции, посвященной 15-летию создания Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук.

Тематика конференции связана с актуальными проблемами и перспективами развития инженерной поддержки инноваций и модернизации в производственной, экономической и социальной сферах деятельности. Материалы представлены по следующим проблемно-тематическим направлениям: энергосбережение и экология; физикохимия и технология перспективных материалов; автоматизация и проектирование технологических процессов; информационные сети, связи и радиотехника; информатика и вычислительная техника; приборостроение и диагностика; механика, машиноведение и машиностроение; энергетика; химическая технология; инженерная экономика; медицинская инженерия; проблемы образования.

На конференцию уже представлено 74 доклада, в том числе около 50 % участников от УрФУ, включая докторантов, аспирантов и студентов. Участвуют также ученые США, Франции, Чешской

Республики, представители городов Урала, Москвы. Доклады представлены в рамках 12 секций, соответствующих, в основном, научным отделениям РУО АИН. Среди участников конференции – ряд сотрудников Пермского государственного технического университета, Южно-Уральского государственного университета, Магнитогорского государственного технического университета и других вузов Урала. Участвуют в работе конференции члены других содружественных Академий: УрО РАН, Международной Инженерной академии, Академии электротехнических наук.

В настоящее время перед нашей страной ставятся важные задачи по развитию информационных технологий, модернизации науки и производства. И, естественно, без соответствующей инженерной поддержки в этом плане не обойтись. Проведение данной конференции как раз и ставило задачей определить возможный контур инженерной поддержки, хотя бы в рамках такой общественной организации, как РУО АИН им. А.М.Прохорова. Наши возможности ограничены по вполне понятным причинам, но все же свой вклад в решение этих важных проблем мы стараемся вносить.

РУО АИН стало учредителем премий-медалей им. В.Е.Грум-Гржимайло, А.С.Попова, П.П.Аносова, Д.И.Менделеева, медали и почетной грамоты им. Д.А.Арзамасцева (совместно с Фондом им. Д.А.Арзамасцева).

Премия-медаль им. В.Е.Грум-Гржимайло вручается за воплощение в жизнь идей великого «Грума» и в целях оказания содействия в проведении фундаментальных и прикладных исследований и внедрение этих результатов в производство для решения задач развития новых технологий и науки.

Ежегодно проводятся конкурсы работ по награждению данными медалями. В частности, премия-медаль им. А.С.Попова вручается за проведение фундаментальных и прикладных исследований в области радиоэлектронной науки, за разработку и производство новых радиоэлектронных изделий, новых технологий для их изготовления, за содействие внедрения научных исследований в производство, развитие информационных систем, передовых технологий связи и управления в Уральском регионе.

Разработаны и утверждены положения по награждению всеми вышеупомянутыми медалями. Отметим, что ряд наших членов удостоены наград АИН: медалями А.М.Прохорова, А.И.Берга, Н.А.Семенова.

Членами АИН, в том числе при поддержке РУО, защищено 19 докторских диссертаций (А.Г. Тарасов, С.Г. Майзель, Е.Л. Суханов, В.Ю. Гантимуров, Ю.В. Крюченков, В.В. Лапин, В.М. Рытвин, В.П.

Лесников, В.П. Кузнецов, Г.М.Дружинин, М.С.Фрейдман, П.М.Ерохин, Л.А.Зайнуллин, В.М.Власов, О.В.Синенко, Н.М.Корякин, В.Э.Иванов, С.Т.Князев, В.П.Чернобровин). Защищено 2 кандидатских диссертации. Шесть членов АИН являются членами-корреспондентами РАН (В.Ф. Балакирев, А.А. Махнев, С.С. Набойченко, Л.А.Смирнов, А.Г. Ченцов, В.Е. Щербинин). 13 членов РУО АИН отмечены Государственными премиями.

Успешно развиваются и международные творческие связи ученых РУО с рядом университетов США, включая Пурдье университет (США), Чешской Республики (Высшая школа экономики, Прага), а также с Национальным инновационным центром (США), фирмой «Innovation and Goods» (США), с фирмой Сименс в Германии, с Хейлуджанской Академией наук КНР и др. Заключены договора о сотрудничестве, осуществляется взаимный обмен учеными и информацией.

Перед страной в последнее время ставятся важные задачи по развитию инновационных технологий, модернизации науки и производства. В этом плане и перед АИН как сообществом ученых также возникает необходимость развития коллективных усилий в решении этих важных проблем. Укрепление цепочки «Наука – образование – производство» - именно на этом пути возможно решение стратегических задач, призванных решать в рамках Академии Инженерных наук.

**Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, а/я 18,
УрФУ, РУО Академии Инженерных наук им. А.М.Прохорова
Тел.: (343) 374-01-08, 328-23-22, 374-76-85;
Факс: (343) 374-76-85, 374-01-08;
E-mail: lisienko@mail.ru**

УДК 536

Я.М. Щелоков, В.Г. Лисиенко
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ

Согласно [1] более 50 % потенциала энергоэффективности отечественной промышленности сосредоточено в ее наиболее энергоемких отраслях черной и цветной металлургии, химической и цементной промышленности. *Черная металлургия* считается самой энергоемкой отраслью. На ее нужды расходуется около 25 % суммарного энергопотребления промышленности. Наиболее электроемким является производство стали и проката (около 20 % суммарного электропотребления отрасли), а топливемким – производство чугуна (50 % общего потребления топлива в отрасли). Энергоемкость продукции черной металлургии в России в среднем в 1,2–2 раза выше по сравнению с ведущими зарубежными странами (табл. 1). По мнению [1], это объясняется использованием устаревшей техники (на морально и физически устаревшем оборудовании в России производится почти 50 % стали, чугуна и проката) и несовременной структурой технологий.

Таблица 1

Энергоемкость ряда производств черной металлургии, кг у.т./т

Технология, процесс	Россия, в среднем	Ведущие зарубежные страны
Производство окатышей	43,5	20,4
Производство кокса	47,3	27,2
Производство чугуна	574,6	414,8
Производство электростали из лома (электродуговые печи)	108,3	88,4

Окончание табл.1

Технология, процесс	Россия, в среднем	Ведущие зарубежные страны
Технология прямого восстановления железа (электродуговые печи)	579,9	397,8
Производство стального проката	136,3	13,6–61,2

Только ли в этом природа высокой энергоемкости стали на отечественных заводах? Проведем сравнения на примере показателей работы металлургической компании *Kimitsu Works* (Япония). Именно подобные металлургические предприятия в настоящее время называют «интегрированными заводами». При этом, отмечая, что высокая энергоемкость металлопродукции этих заводов обусловлена их сильно развитой инфраструктурой и несовершенством использования и утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Характеристика энергетического баланса подача/потребление в *Kimitsu Works* такова, что почти вся подаваемая энергия вырабатывается от сжигания угля, а дорогостоящая энергия от сжигания нефти, газа практически полностью исключена. То есть топливо на завод поставляется, а электроэнергия, в основном, производится на предприятии из побочных газообразных продуктов, поступающих от коксовых печей, доменных печей, кислородных конвертеров и т.д. Такой баланс подача/потребление энергии на основе угля был осуществлен путем усовершенствования технологических процессов, таких как непрерывное литье и непрерывный отжиг и обработка, а также разработки и внедрения технологий регенерации отходящего тепла. Это с помощью турбины восстановления давления (ТВД), по-русски ГУБТ, и технологии сухого тушения кокса (УСТК). Эффективность потребления энергии на сталеплавильном заводе влияет как на себестоимость производимой стали, так и на уровень вредного воздействия на окружающую среду.

В итоге на установках по использованию вторичных энергоресурсов вырабатывается до 400 т/ч пара. Но, пожалуй, главное — большая часть пара используется для производства электрической энергии (табл. 2) при среднем объеме выработки 110 МВт·ч. В результате обеспечения высокой степени использования ВЭР для производства электроэнергии, причем с

использованием когда-то созданных в СССР систем (ГУБТ и УСТК), на *Kimitsu Works* достигается удельный расход энергии на производство сырой стали 5,3 Гкал/т (758 кг у.т./т). В России лучшие показатели – на уровне не менее 1000 кг у.т./т.

Таблица 2

Электрическая мощность установок ВЭР

Установка	Мощность, МВт
ТВД (ГУБТ) – ДП № 2	14,8
ТВД (ГУБТ) – ДП № 3	20,5
ТВД (ГУБТ) – ДП № 4	23,0
Агломерационная установка № 3	14,8
Турбина – установка УСТК № 1	33,9
Турбина – установка УСТК № 2	35,2
Турбина – установка УСТК № 3	46,8
Итого	189,0

Следовательно, проблема энергоемкости определяется, как минимум, тремя факторами: инфраструктурой производства, уровнем совершенства используемого технологического оборудования и степенью использования ВЭР, в первую очередь, для производства электроэнергии (когенерация). И на каждом предприятии следует искать свои соотношения при реализации указанных выше факторов. Одним из определяющих инструментов здесь должны стать энергетические обследования.

Согласно ФЗ №261 [2] одной из основных целей энергетического обследования является разработка перечня типовых общедоступных мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности. При этом, в ФЗ №261 отмечается, что разработка энергосберегающих мероприятий, отличных от типовых, общедоступных возможна только по инициативе заказчика проведения энергетического обследования. При этом в ФЗ №261 нет каких-либо положений, позволяющих отличить типовые мероприятия от всех остальных из возможных мер. А о целесообразности такого подхода свидетельствует опыт Европейского Союза (ЕС), где имеется на уровне обязательной Директивы Справочный документ по наилучшим доступным технологиям обеспечения энергоэффективности [3].

Согласно [3] к так называемым «типовым, общедоступным мероприятиям по энергосбережению и повышению энергетической эффективности» следует относить мероприятия, которые могут применяться во всех или в большинстве видов экономи-

ческой деятельности (отраслей) и не являющихся специфичными для конкретных отраслей. В этом случае мероприятиями, отличными от типовых мер, следует называть технологии (решения), которые направлены на повышение энергетической эффективности технологических процессов и оборудования конкретных отраслей.

Если руководствоваться данной классификацией энерго-сберегающих мероприятий, то большинство привычных энергетических и особенно электрических технологий вряд ли можно отнести к «типовым мероприятиям», несмотря на относительную «общедоступность» некоторых из них. К числу отраслевых энергетических технологий следует относить процессы, основанные на разного рода электрических печных агрегатах (солевые печи, тигельные печи, индукционные печи и т.д.). Например, приспособленные для переработки лома конкретного металла, мелкой шихты и т.п. Еще более специфичным является использование, например, электрообогреваемых горнов для переработки низкокачественных лома и отходов и т.п.

Возвращаясь к типовым доступным мероприятиям (ТДМ), следует отметить, что вряд ли возможно составление исчерпывающего списка методов обеспечения энергоэффективности. Кроме того, результаты энергетических обследований (энергетические паспорта) анализируются в Минэнерго РФ по десяти показателям (см. постановление Правительства РФ от 25.01.2011 №19):

- а) оснащенность приборами учета используемых энергетических ресурсов;
- б) объем используемого энергетического ресурса и его изменение;
- в) энергетическая эффективность;
- г) величина потерь переданных энергетических ресурсов;
- д) потенциал энергосбережения и оценка возможной экономии энергетических ресурсов;
- е) перечень типовых мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности;
- ж) использование вторичных энергетических ресурсов, альтернативных (местных) видов топлива и возобновляемых источников энергии;
- з) потребление энергетических ресурсов основными технологическими комплексами;
- и) использование электрической энергии на цели освещения;

к) тепловая характеристика зданий, строений, сооружений.

Отсюда можно заключить, что в результатах энергетического обследования, в части технологических комплексов, отслеживается только «потребление энергетических ресурсов». В этом случае в рамках «типовых доступных мероприятий» (ТДМ) вряд ли могут быть выявлены общие подходы к обеспечению энергоэффективности на предприятиях любого вида деятельности, с учетом его специфических, тем более энергоемких, технологических особенностей. В качестве альтернативы целесообразен переход к комплексному показателю для оценки уровня «оптимизации энергоэффективности», с разработкой мероприятий, отличных от типовых. Если с течением времени степень целесообразности тех или иных ТДМ может измениться, целесообразность оптимизации энергоэффективности должна сохраниться в перспективе. Но при этом необходимо постоянное выявление аспектов энергоэффективности и возможностей для энергосбережения на обследуемом объекте с использованием методик интегрированного эколого-энергетического анализа [4].

Что касается «типовых» *аспектов*, к настоящему времени следует перечислить следующие:

- характер энергопотребления систем и процессов, входящих в состав объекта;
- энергопотребляющее оборудование, а также тип и количество энергии, используемой в целом;
- возможности минимизации энергопотребления, например:
 - контроль/сокращение времени работы оборудования, например отключение неиспользуемого оборудования;
 - оптимизация теплоизоляции;
 - оптимизация энергохозяйства, инженерных сетей, а также связанных с ними систем и процессов;
- возможности использования более эффективных альтернативных источников энергии, в частности избыточной энергии от других процессов и/или систем;
- возможности использования образующейся избыточной энергии в других процессах и/или системах;
- возможности повышения качества тепловой энергии.

Отсюда следует, что в рамках энергетического обследования не обойтись без использования надлежащих инструментов и методик, позволяющих выявить и количественно оценить *возможности* для оптимизации энергопотребления, включая:

- энергетические модели, базы данных и энергобалансы;

- аналитические методы, например экономический и энергетический анализ [4,5], и др.;
- оценки и расчеты.

В рамках оптимизации энергоэффективности энергопотребляющих систем, процессов следует определить цели применения типовых доступных мероприятий. Здесь ТДМ для обеспечения энергоэффективности часто встречающихся видов деятельности, систем и процессов на установках можно охарактеризовать следующим образом:

- Цели ТДМ состоят в оптимизации:
 - систем сжигания топлива;
 - паровых систем.

Посредством использования адекватных методов, включая:

- методы, специфичные для конкретных отраслей и описанные в отраслевых справочных документах;
- методы по топливосжигающим установкам, получившие практическое подтверждение.
- Цели ТДМ состоят в оптимизации следующих систем и процессов:
 - системы сжатого воздуха;
 - насосные системы;
 - системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха;
 - системы освещения;
 - сушка, концентрирование и сепарация. Для этих процессов ТДМ также включает изучение возможностей использования механической сепарации наряду с тепловыми процессами.

Утилизация тепла

- Цели ТДМ состоят в поддержании КПД теплообменников посредством обоих методов, названных ниже:
 - периодический мониторинг КПД;
 - предотвращение образования отложений и накипи или их удаление.

Методы для процессов охлаждения и соответствующие ТДМ состоят в поиске полезного применения отходящего тепла вместо его рассеяния в процессе охлаждения. Там, где охлаждение необходимо, следует рассмотреть возможность примене-

ния свободного охлаждения (с использованием атмосферного воздуха).

Когенерация

- Цели ТДМ состоят в поиске возможностей для когенерации; при этом потребители могут находиться в пределах установки или за ее пределами (третья сторона).

Во многих случаях государственные органы (местного, регионального или федерального уровня) оказывают содействие в достижении соглашения с третьей стороной или сами являются таковой (см. ФЗ №190 «О теплоснабжении»).

Снабжение электроэнергией

- Цели ТДМ состоят в повышении коэффициента мощности в соответствии с требованиями местного поставщика электроэнергии при помощи доступных методов.
- Цели ТДМ состоят в проверке системы энергоснабжения на наличие высших гармоник и, при необходимости, использовании фильтров.
- Цели ТДМ состоят в оптимизации эффективности системы энергоснабжения.

Подсистемы с электроприводом

Замена электродвигателей энергоэффективными двигателями (ЭЭД) и приводами переменной скорости представляет собой одну из очевидных мер повышения энергоэффективности. Однако целесообразность таких мер должна рассматриваться в контексте всей системы, в которой используются двигатели; в противном случае, существуют риски:

- потери потенциальных выгод от оптимизации способа эксплуатации и размера систем и, как следствие, от оптимизации потребностей в электроприводах;
- потери энергии в результате применения приводов переменной скорости в неподходящем контексте.
 - Цели ТДМ здесь можно свести к применению следующей последовательности шагов по оптимизации электроприводов:
 - оптимизируйте всю систему, в состав которой входят электроприводы (например, систему охлаждения);
 - затем оптимизируйте приводы в системе в соответствии с вновь определенными требованиями к нагрузке, используя один или несколько известных методов там, где они применимы;

○ после оптимизации энергопотребляющих систем оптимизируйте оставшиеся (неоптимизированные) двигатели, используя известные методы и следующие критерии (рекомендуются Директивами Европейского Союза):

- оставшиеся двигатели, эксплуатируемые более 2000 ч/год, являются приоритетными для замены ЭЭД;
- для приводов, эксплуатируемых с переменной нагрузкой, работающих с мощностью менее 50% от максимальной более 20% времени эксплуатации и работающих более 2000 ч/год, следует рассматривать возможность замены приводами переменной скорости.

На заключительном этапе процесса оптимизации энергоэффективности следует проводить сравнительный анализ, в ходе которого организация (предприятие и т.д.) оценивает итоги своей деятельности по освоению энергосберегающих технологий, сравнивая их с наилучшими практическими результатами. И здесь важным является обеспечение сопоставимости данных на уровне предприятий, технологических процессов, отраслей и т.д.

Без освоения предлагаемой или подобной системы оптимизации энергоэффективности вряд ли можно обеспечить условия сопоставимости при оценке вклада энерготехнологических установок в энергетическую эффективность предприятия, отрасли.

Как отмечалось выше, в мировой практике сложилось одно из обязательных условий функционирования металлургического производства – это выработка электрической энергии на технологических агрегатах (установки сухого тушения кокса, преобразование избыточного давления колошникового газа, использование физического тепла дымовых газов печей и т.д.). Удельный показатель производства электроэнергии здесь достигает 200 кВт.ч/т сырой стали. Сейчас уже технологии отмечают (Н.П. Лякишев, 2004 г.), что будущее отечественной металлургии – это единый энергометаллургический комплекс с энергоемкостью стали в 2 раза ниже существующих значений в 1000 – 1200 кг у.т./т стали [5].

Для достижения подобных глобальных задач надо водить соответствующие отраслевые индикаторы (показатели). Однако последнее издание подобных рекомендаций по стандартизации было в 1995 г. [6]. Естественно, в них были зафиксированы итоги, сложившиеся в отечественной металлургии на уровне 1990 года.

Выводы

1. Для предприятий черной металлургии обязательные энергетические обследования [2] не следует ограничивать составлением перечня типовых общедоступных энергосберегающих мероприятий.
2. Одним из результатов энергетического обследования должна стать «оптимизация энергоэффективности технологических систем», с целью перехода к энерготехнологической структуре металлургического производства.
3. В связи с введением ФЗ № 261 обязательных энергетических обследований становится актуальной задача переиздания рекомендаций по основным направлениям энергосбережения в черной металлургии.

Список литературы

1. Мазурова О.В. Роль новых технологий в снижении энергоемкости промышленности // Промышленная энергетика. 2010. № 11. С. 2 – 7.
2. Федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261 « Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
3. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям обеспечения энергоэффективности. Русская версия. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2009, 455 с. URL: [http:// www.14000.ru](http://www.14000.ru)
4. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств (интегрированный энерго-экологический анализ: теория и практика): в 2 т. Т.1. М.: Теплотехник, 2008. 688 с.
5. Щелоков Я.М. Энергетический анализ хозяйственной деятельности: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 390 с.
6. Р 50-605-100 94. Рекомендации по стандартизации. Энергосбережение. Основные направления энергосбережения в черной металлургии. Технологические мероприятия по снижению расхода котельно-печного топлива. М.: изд-во стандартов, 1995. 21 с.

**ЭМИССИЯ В КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНЫХ ПРОЦЕССАХ
ДИОКСИДА УГЛЕРОДА – ПАРНИКОВОГО ГАЗА**

Металлургические процессы характеризуются значительной эмиссией экологически вредных и парниковых веществ. Среди них есть диоксид углерода, который является парниковым газом. В этой связи возникает проблема вычисления эмиссии диоксида углерода в различных металлургических процессах. В данной работе приведены формулы для расчета эмиссии диоксида углерода в кислородно-конвертерных процессах. На основании этих формул можно разработать алгоритмы вычислений для информационных систем АСУ ТП.

В кислородно-конвертерных процессах с дожиганием оксид углерода дожигается возле горловины конвертера с выделением дополнительного тепла или уходит с дымовыми газами в систему очистки и дожигания. В связи с дожиганием весь выгоревший углерод исходной шихты образует диоксид углерода – CO_2 . Масса образованного CO_2 в конвертерном процессе определяется массой окисленного углерода

$$M_{G2} = 3,667 \Delta m_C,$$

где M_{G2} – масса образованного CO_2 при выгорании углерода, т; Δm_C – количество выгоревшего углерода, т/т продукции; 3,667 – коэффициент, который задает количество массы образующегося диоксида углерода на единицу сгораемого углерода [1].

Наряду с чугуном в конвертер загружается металлолом.

Масса окисленного углерода определится как

$$\Delta m_C = C_4 m_4 + C_n m_n - C_{ст} m_{ст} = C_4 D_4 m_{ш} + C_n D_n m_{ш} - C_{ст} m_{ст}, \quad (1)$$

где C_4 – массовая доля содержания углерода в чугуне; m_4 – масса чугуна в металлической шихте т; C_n – массовая доля содержания углерода в ломе; m_n – масса лома в металлической шихте т; $C_{ст}$ – массовая доля содержания углерода в получаемой стали; $m_{ст}$ – масса получаемой стали, т; D_4 – массовая до-

ля чугуна в металлошихте; D_n – массовая доля лома в металлошихте; $m_{ш} = m_ч + m_n$ – масса металлической шихты, т.

С учетом коэффициента потерь $K_n = m_{ст}/m_{ш}$, который учитывает потери исходной массы от выгорания углерода, железа и других исходных составляющих загружаемой шихты, формула (1) приводится к виду:

$$\Delta m_C = m_{ш}(C_ч D_ч + C_n D_n) - C_{ст} m_{ст} = m_{ст} \left(\frac{C_ч D_ч + C_n D_n}{K_n} - C_{ст} \right). \quad (2)$$

Коэффициент K_n с учетом выгорания железа можно определить из следующего соотношения:

$$m_{ст}^{Fe} = K_B m_{ш}^{Fe}. \quad (3)$$

где $m_{ш}^{Fe}$ – масса железа в шихте (чугуне и ломе); $m_{ст}^{Fe}$ – масса железа в стали; $K_B = m_{ст}^{Fe}/m_{ш}^{Fe}$ – коэффициент выгорания железа.

Массу выплавляемой стали через $m_{ст}^{Fe}$ можно определить:

$$m_{ст} = m_{ст}^{Fe} / (1 - C_{ст} - Si_{ст} - Mn_{ст} - P_{ст} - S_{ст}), \quad (4)$$

а массу железа в шихте, соответственно

$$m_{ш}^{Fe} = m_ч(1 - C_ч - Si_ч - Mn_ч - P_ч - S_ч) + m_n(1 - C_n - Si_n - Mn_n - P_n - S_n). \quad (5)$$

Здесь символами C , Si , Mn , P , S с индексами «ч» и «л» обозначены массовые доли (массовые концентрации) углерода, кремния, марганца, фосфора, серы в чугуне и ломе, а с индексами «ст» – то же в стали. С учетом (3)-(5) и соотношений

$m_ч = D_ч m_{ш}$, $m_n = D_n m_{ш}$ справедливо

$$\begin{aligned} m_{ст} &= \frac{m_{ст}^{Fe}}{1 - C_{ст} - Si_{ст} - Mn_{ст} - P_{ст} - S_{ст}} = \frac{K_B m_{ш}^{Fe}}{1 - C_{ст} - Si_{ст} - Mn_{ст} - P_{ст} - S_{ст}} = \\ &= \frac{K_B m_{ш} [D_ч(1 - C_ч - Si_ч - Mn_ч - P_ч - S_ч) + D_n(1 - C_n - Si_n - Mn_n - P_n - S_n)]}{1 - C_{ст} - Si_{ст} - Mn_{ст} - P_{ст} - S_{ст}}. \quad (7) \end{aligned}$$

Разделив (7) на $m_{ш}$, получим формулу для определения коэффициента $K_n = m_{ст}/m_{ш}$:

$$\begin{aligned} K_n &= \frac{K_B [D_ч(1 - C_ч - Si_ч - Mn_ч - P_ч - S_ч) + D_n(1 - C_n - Si_n - Mn_n - P_n - S_n)]}{1 - C_{ст} - Si_{ст} - Mn_{ст} - P_{ст} - S_{ст}} = \quad (8) \\ &= \frac{K_B \sum D_i (1 - C_i - Si_i - Mn_i - P_i - S_i)}{1 - C_{ст} - Si_{ст} - Mn_{ст} - P_{ст} - S_{ст}}, \end{aligned}$$

где D_i , C_i , Si_i , Mn_i , P_i , S_i , – массовые доли шихты, углерода, кремния, марганца, фосфора, серы в i -м компоненте.

Для примера предположим, что в кислородный конвертор загружается чугуны 90% и лом 10%. Их состав: чугуны – $C_{\text{ч}}=4\%$, $Si_{\text{ч}}=1,2\%$, $Mn_{\text{ч}}=1\%$, $P_{\text{ч}}=0,2\%$, $S_{\text{ч}}=0,05\%$ (суммарное количество примесей 6,45%, остальное – железо); лома – $C_{\text{л}}=0,12\%$, $Si_{\text{л}}=0,2\%$, $Mn_{\text{л}}=0,5\%$, $P_{\text{л}}=0,04\%$, $S_{\text{л}}=0,05\%$ (суммарное количество примесей 0,91%). Состав выплавляемой стали: $C_{\text{СТ}}=0,3\%$, $Si_{\text{СТ}}=0,2\%$, $Mn_{\text{СТ}}=0,3\%$, $P_{\text{СТ}}=0,04\%$, $S_{\text{СТ}}=0,05\%$ (суммарное количество примесей 0,89%).

Для этих данных имеем из (8) $K_{II} = 0,8545$. Масса выгоревшего углерода из (3) равна:

$$\Delta m_{\text{C}} = m_{\text{СТ}} ((0,9 \cdot 0,04 + 0,1 \cdot 0,0012) / 0,8545 - 0,003) = 0,03926 m_{\text{СТ}}.$$

Эмиссия CO_2 $M_{G_2} = 3,667 \cdot 0,03926 m_{\text{СТ}} = 0,144 m_{\text{СТ}}$ т, или удельный коэффициент эмиссии диоксида углерода $\beta_{\text{дУ}} = 144$ кг/т стали (72,8 м³ на т стали).

По удельному коэффициенту эмиссии можно вычислить выбросы CO_2 за час, месяц, год. Например, современный конвертер емкостью 400 т стали образует около $400 \cdot 0,144 = 57,6$ т диоксида углерода, или 29135 м³ за плавку. При длительности плавки в 400-тонном конвертере, равной 0,5 ч, его производительность составляет 800 т/ч. Таким образом, в эмиссии CO_2 составит 115,2 т/ч, а в течение года при количестве рабочих дней конвертера 320.

$$M_{G_2} = 115,2 \cdot 320 \cdot 24 \approx 884736 \text{ т, или } \approx 448 \text{ млн. м}^3.$$

Выводы:

1. Разработан алгоритм, позволяющий оценить выбросы диоксида углерода конкретной плавки.
2. Приведены примеры использования формул алгоритма.

Список литературы

1. Шевелев Л.Н. Оценка выбросов парниковых газов в черной металлургии России // Бюл. «Черная металлургия». 2008. №8. С. 3 – 8.
2. Каленский И.В. Рекомендации по учету выбросов CO_2 на предприятиях черной металлургии // Сталь. 2007. №5. С. 121 – 129.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ МЕТАЛЛА

Нагрев металла перед прокаткой на листовых станах является одной из самых энергоемких технологических операций, поэтому оптимизация режимов нагрева металла перед прокаткой является одной из основных задач повышения энергоэффективности производства.

Проблема использования оптимальных энергосберегающих режимов нагрева в металлургических печах камерного или проходного типа сводится к расчету и реализации такой траектории изменения температурного состояния нагреваемого изделия во времени или по длине рабочего пространства, которая сводила бы стоимость нагрева (определяемую в основном стоимостью количества затраченного на нагрев топлива и стоимостью металла, потерянного при окислении) к минимуму [1]. Так как целью энергосберегающего режима является минимизация энергетических затрат (расхода топлива) на нагрев металла до заданного теплового состояния за заданное время T , то затраты энергии на нагрев заготовки определим функционалом следующего вида:

$$I = \int_0^T U(\tau)^2 d\tau \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $U(\tau) = k \cdot V_T(\tau)$ – характеристическая температура управления, пропорциональная расходу топлива, $^{\circ}\text{C}$; $V_T(\tau)$ – расход топлива; k – коэффициент передачи по каналу расход топлива – характеристическая температура управления; τ – текущее время процесса $0 \leq \tau \leq T$; T – заданное время нагрева.

Практически все исследователи процессов оптимального нагрева заготовок перед прокаткой представляют процесс нагрева массивных заготовок перед дальнейшей их обработкой как систему с распределенными параметрами и используют для решения задачи расчета оптимальной траектории нагрева вариационные методы [2 – 6]. Решение вариационной задачи ме-

тодом максимума Понтрягина Л.С. позволяет определить общую стратегию оптимального энергосберегающего режима управления нагревом.

Для изучения оптимального управления нагревом массивных тел процесс передачи тепла можно упрощенно представить последовательным соединением нескольких инерционных звеньев, например, как показано на рис. 1 [5].

Энергия от управляющего воздействия (например, от сжигания определенного расхода топлива) последовательно через передаточную функцию инерционного звена $W_1(P)$ передается рабочему пространству нагревательной печи (греющей среды), что приводит к изменению температуры $t_{ГС}(t)$, затем через передаточную функцию $W_2(P)$ на поверхность нагреваемого тела, вызывая изменение температуры $t_{ПОВ}(t)$, и затем к центру нагреваемого тела, вызывая изменение температуры $t_{Ц}(t)$.

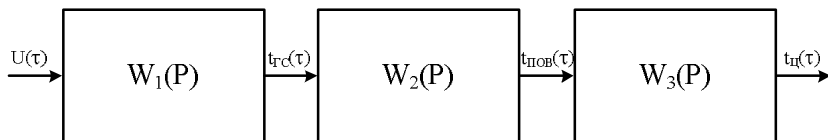


Рис. 1. Упрощенная модель процесса передачи тепла и нагрева массивного тела

Такая динамическая модель позволяет наглядно представить физические процессы передачи энергии, а также, после адаптации, использоваться для расчета температуры поверхности и центра нагреваемых тел в реальных процессах.

В первом приближении в качестве передаточных функций для упрощенной модели нагрева массивного тела могут использоваться передаточные функции звеньев I-ого порядка, т.е.:

$$\begin{aligned} W_1(P) &= \frac{1}{T_0 P + 1}, \\ W_2(P) &= \frac{1}{T_1 P + 1}, \\ W_3(P) &= \frac{1}{T_2 P + 1}, \end{aligned} \quad (2)$$

где T_0 , T_1 , T_2 – постоянные времени по каналам: управляющее воздействие – температура греющей среды; температура греющей среды – температура поверхности; температура поверхности – температура центра нагреваемого тела соответственно,

определяемые при адаптации упрощенной модели нагрева массивного тела.

В качестве критерия оптимальности может быть выбран критерий минимизации расхода энергии на нагрев (1).

Требуется выбрать такое управление $U(\tau)$, чтобы по окончании заданного времени процесса нагрева T критерий / принимал наименьшее из возможных значений.

Математическое описание инерционного процесса нагрева тела можно представить следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dt_{GC}}{d\tau} = \frac{1}{T_0} [U(\tau) - t_{GC}(\tau)], \quad (3)$$

$$\frac{dt_{ПОВ}}{d\tau} = \frac{1}{T_1} [t_{GC}(\tau) - t_{ПОВ}(\tau)], \quad (4)$$

$$\frac{dt_{Ц}}{d\tau} = \frac{1}{T_2} [t_{ПОВ}(\tau) - t_{Ц}(\tau)], \quad (5)$$

Поставим следующую вариационную задачу: среди всех допустимых управлений $U(\tau)$ найти такое, чтобы соответствующее ему решение системы уравнений (3) – (5) доставляло минимум функционалу (1). Решаем поставленную задачу с помощью метода Понтрягина Л.С. [2]. Для этого, используя математическое описание процесса нагрева (3) – (5), введем функцию следующего вида:

$$H = \varphi_0 \cdot U(\tau) + \frac{\varphi_1(\tau)}{T_0} [U(\tau) - t_{GC}(\tau)] + \frac{\varphi_2(\tau)}{T_1} [t_{GC}(\tau) - t_{ПОВ}(\tau)] + \frac{\varphi_3(\tau)}{T_2} [t_{ПОВ}(\tau) - t_{Ц}(\tau)] + \varphi_4, \quad (6)$$

где φ_0, φ_4 являются константами, а $\varphi_1(\tau), \varphi_2(\tau), \varphi_3(\tau)$ играют роль сопряженных переменных и определяются из уравнений:

$$\frac{d\varphi_1(\tau)}{d\tau} = -\frac{\partial H}{\partial t_{GC}(\tau)} = \frac{\varphi_1(\tau)}{T_0} - \frac{\varphi_2(\tau)}{T_1}; \quad (7)$$

$$\frac{d\varphi_2(\tau)}{d\tau} = -\frac{\partial H}{\partial t_{ПОВ}(\tau)} = \frac{\varphi_2(\tau)}{T_1} - \frac{\varphi_3(\tau)}{T_2}; \quad (8)$$

$$\frac{d\varphi_3(\tau)}{d\tau} = -\frac{\partial H}{\partial t_{Ц}(\tau)} = \frac{\varphi_3(\tau)}{T_2}. \quad (9)$$

Необходимое условие оптимальности определяется следующей теоремой (принцип максимума): если допустимое управление доставляет минимум функционалу (1), то оно удовлетворяет условию максимума функции H по U , т.е.

$$\frac{\partial H}{\partial U} = 2 \cdot U(\tau) \cdot \varphi_0 + \frac{\varphi_1}{T_0} = 0, \quad (10)$$

отсюда находим функцию оптимального управления:

$$U_{\text{опт}}(\tau) = -\frac{\varphi_1(\tau)}{2 \cdot T_0 \cdot \varphi_0}, \quad (11)$$

где $\varphi_0 = -1$ по определению [2]

Совместное интегрирование системы уравнений (3) – (5) и (7) – (9) позволяет из

(11) найти траекторию оптимального управления $U_{\text{опт}}(\tau)$.

Решение системы уравнений производится любым известным методом, в том числе и достаточно простыми, например Рунге – Кутта или Эйлера.

В качестве начальных условий для решения зададимся начальными и конечными температурами нагреваемого металла. Однако, для численного интегрирования системы уравнений (3) – (5) и (7) – (9) требуется определить начальные условия для системы (7) – (9) т.е. $\varphi_1(0)$, $\varphi_2(0)$, $\varphi_3(0)$, что является наиболее сложной, с математической точки зрения, процедурой расчета оптимального управления.

Так как из физического смысла поставленной задачи известны условия на правом конце траектории системы (3) – (5), т.е. заданы конечные температуры рабочего пространства $t_{\text{ГС}}^*(T)$, поверхности $t_{\text{ПОВ}}^*(T)$ и центра $t_{\text{Ц}}^*(T)$, то надо выбрать такие $\varphi_1(0)$, $\varphi_2(0)$, $\varphi_3(0)$, чтобы совместное решение систем (3) – (5) и (7) – (9) привело бы систему в точку $t_{\text{ГС}}(T) = t_{\text{ГС}}^*(T)$, $t_{\text{ПОВ}}(T) = t_{\text{ПОВ}}^*(T)$, $t_{\text{Ц}}(T) = t_{\text{Ц}}^*(T)$.

Один из возможных вариантов определения начальных значений функций сопряженных переменных – использование критерия достижения требуемых температур в конце назначенного времени нагрева и проведение итерационной поисковой процедуры, например, как показано в [5, 6].

В данной работе предлагается прямой метод расчета начальных значений функций сопряженных переменных (7) – (9), что позволяет, за счет отказа от итерационного поиска повысить скорость расчета.

В силу линейности исходной системы

(3) -

(5) и

(7) -

(9) решение поставленной задачи можно провести с использованием метода интерполяции, поставив в соответствие начальные и конечные значения функций сопряженных переменных и переменных состояния. Рассмотрим основную идею предлагаемого метода.

Для определения математической связи между начальными и конечными значениями сопряженных переменных и переменных состояния был использован следующий подход.

Так как система линейна и однородна, то начальные и конечные значения переменных связаны функциональной зависимостью. В применении к решению поставленной задачи можно записать при $t_{ГC}(0) = const$, $t_{ПОВ}(0) = const$, $t_{Ц}(0) = const$:

$$\varphi_1(0) = g_1(t_{ГC}(T), t_{ПОВ}(T), t_{Ц}(T)) \quad (12)$$

$$\varphi_2(0) = g_2(t_{ГC}(T), t_{ПОВ}(T), t_{Ц}(T)) \quad (13)$$

$$\varphi_3(0) = g_3(t_{ГC}(T), t_{ПОВ}(T), t_{Ц}(T)) \quad (14)$$

где $g(E) = AE^2 + BE + C$ - квадратичная функция, коэффициенты которой подлежат определению; E - вектор аргументов конечного значения переменных состояния $E = (t_{ГC}(T), t_{ПОВ}(T), t_{Ц}(T))$; A , B , C - вектора коэффициентов функциональной зависимости.

После нахождения значений вектора коэффициентов A , B , C всегда можно рассчитать начальные значения функций сопряженных переменных при любых заданных конечных состояний переменных состояния системы (3) – (5).

Определение коэффициентов уравнения можно провести известным методом квадратичной интерполяции. Для этого необходимо произвести определения конечных значений переменных состояния при нескольких (не менее трех) наборах значений сопряженных переменных. Метод основывается на опре-

делении коэффициентов квадратичного уравнения по набору полученных значений.

Например, для одномерного случая задача определения коэффициентов квадратичного полинома запишется следующим образом. Пусть (табличным или алгоритмическим способом) задана функция $f(x)$, для которой требуется получить аналитическое уравнение. В первом приближении такую функцию можно аппроксимировать квадратичным полиномом вида:

$$f(x) = ax^2 + bx + c, \quad (15)$$

где a, b, c - постоянные коэффициенты, требующие определения.

Для определения коэффициентов полинома выберем, каким либо способом, три точки x_1, x_2, x_3 и вычислим целевую функцию в этих точках, т.е. определим $f(x_1), f(x_2), f(x_3)$.

Для определения значения коэффициентов a, b, c требуется решить систему уравнений вида:

$$ax_1 + bx_1 + c = f(x_1); \quad (16)$$

$$ax_2 + bx_2 + c = f(x_2); \quad (17)$$

$$ax_3 + bx_3 + c = f(x_3). \quad (18)$$

Решение может быть произведено любым известным методом решения систем линейных уравнений. В данном случае наиболее удобно будет использовать метод Крамера.

Определение коэффициентов для функции, которая представлена в векторной форме в n -мерном пространстве, порядок определения векторов-коэффициентов $A = (a_1, \dots, a_n)$, $B = (b_1, \dots, b_n)$, $C = (c_1, \dots, c_n)$ ведется аналогичным образом, как и для представленного одномерного случая.

Рассмотрим применение метода квадратичной интерполяции для определения начального значения сопряженных переменных в задаче оптимизации, с использованием упрощенной модели, представленной на рис. 1.

Для упрощения математического представления задачи введем следующие обозначения:

$$z_1 = \frac{1}{T_0}, \quad z_2 = \frac{1}{T_1}, \quad z_3 = \frac{1}{T_2}, \quad z_4 = \frac{1}{2 \cdot T_0 \cdot \varphi_0}.$$

$$x_0 = t_{ГС}(\tau), \quad x_1 = t_{ПОВ}(\tau), \quad x_2 = t_{Ц}(\tau), \quad x_3 = \varphi_1(\tau), \quad x_4 = \varphi_2(\tau), \\ x_5 = \varphi_3(\tau).$$

За x_0^0, \dots, x_5^0 обозначим начальные значения переменных системы, за x_0^T, \dots, x_5^T - конечные. Подставим в уравнение

(3) вместо $U(\tau)$ функцию

(11). Таким образом, в получившейся системе стало меньше на одну переменную. В результате полученная система линейных однородных значений приобрела вид:

$$\begin{aligned}
 x_0' &= z_1(z_4 x_3 - x_0); \\
 x_1' &= z_2(x_0 - x_1); \\
 x_2' &= z_3(x_1 - x_2); \\
 x_3' &= z_1 x_3 - z_2 x_4; \\
 x_4' &= z_2 x_4 - z_3 x_5; \\
 x_5' &= z_3 x_5.
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Решение подобной дифференциальных системы производится последовательно. Для чего может быть использован любой известный метод решения систем дифференциальных уравнений.

Начальные значения переменных x_0, x_1, x_2 определяются условиями задачи, т.е. $x_0^0 = t_{TC}(0)$, $x_1^0 = t_{ПОВ}(0)$, $x_2^0 = t_{Ц}(0)$.

Решим систему

(19), используя в качестве начальных значений переменных x_3, x_4, x_5 любые, выбранные случайным образом величины, причем три произвольных точки для каждой переменной определяются. Решение системы произведем трижды, для каждого набора случайных начальных значений переменных x_3, x_4, x_5 . Обозначим наборы начальных значений как $(x_{31}^0, x_{41}^0, x_{51}^0)$, $(x_{32}^0, x_{42}^0, x_{52}^0)$, $(x_{33}^0, x_{43}^0, x_{53}^0)$.

В результате решений системы

(19) получим три набора конечных значений $(x_{01}^T, x_{11}^T, x_{21}^T, x_{31}^T, x_{41}^T, x_{51}^T)$, $(x_{02}^T, x_{12}^T, x_{22}^T, x_{32}^T, x_{42}^T, x_{52}^T)$, $(x_{03}^T, x_{13}^T, x_{23}^T, x_{33}^T, x_{43}^T, x_{53}^T)$.

Для определения коэффициентов – векторов $A = (a_1, a_2, a_3)$, $B = (b_1, b_2, b_3)$, $C = (c_1, c_2, c_3)$ используем матричный метод решения системы линейных уравнений. Найдем определители следующих матриц.

Определитель матрицы начальных значений сопряженных переменных:

$$q = \begin{vmatrix} x_{31}^0 & x_{41}^0 & x_{51}^0 \\ x_{32}^0 & x_{42}^0 & x_{52}^0 \\ x_{33}^0 & x_{43}^0 & x_{53}^0 \end{vmatrix}. \quad (20)$$

Определители для первой координаты искомых векторов А, В, С:

$$p_1 = \begin{vmatrix} x_{01}^T & x_{41}^0 & x_{51}^0 \\ x_{02}^T & x_{42}^0 & x_{52}^0 \\ x_{03}^T & x_{43}^0 & x_{53}^0 \end{vmatrix}, \quad p_2 = \begin{vmatrix} x_{31}^0 & x_{01}^T & x_{51}^0 \\ x_{32}^0 & x_{02}^T & x_{52}^0 \\ x_{33}^0 & x_{03}^T & x_{53}^0 \end{vmatrix}, \quad p_3 = \begin{vmatrix} x_{31}^0 & x_{41}^0 & x_{01}^T \\ x_{32}^0 & x_{42}^0 & x_{02}^T \\ x_{33}^0 & x_{43}^0 & x_{03}^T \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Вычисление первой координаты для искомых векторов А, В, С:

$$a_1 = \frac{p_1}{q}, \quad b_1 = \frac{p_2}{q}, \quad c_1 = \frac{p_3}{q}. \quad (22)$$

Аналогичным образом вычислим остальные координаты векторов А, В, С. Определители для второй координаты:

$$r_1 = \begin{vmatrix} x_{11}^T & x_{41}^0 & x_{51}^0 \\ x_{12}^T & x_{42}^0 & x_{52}^0 \\ x_{13}^T & x_{43}^0 & x_{53}^0 \end{vmatrix}, \quad r_2 = \begin{vmatrix} x_{31}^0 & x_{11}^T & x_{51}^0 \\ x_{32}^0 & x_{12}^T & x_{52}^0 \\ x_{33}^0 & x_{13}^T & x_{53}^0 \end{vmatrix}, \quad r_3 = \begin{vmatrix} x_{31}^0 & x_{41}^0 & x_{11}^T \\ x_{32}^0 & x_{42}^0 & x_{12}^T \\ x_{33}^0 & x_{43}^0 & x_{13}^T \end{vmatrix}. \quad (23)$$

$$a_2 = \frac{r_1}{q}, \quad b_2 = \frac{r_2}{q}, \quad c_2 = \frac{r_3}{q}. \quad (24)$$

Для третьей координаты:

$$w_1 = \begin{vmatrix} x_{21}^T & x_{41}^0 & x_{51}^0 \\ x_{22}^T & x_{42}^0 & x_{52}^0 \\ x_{23}^T & x_{43}^0 & x_{53}^0 \end{vmatrix}, \quad w_2 = \begin{vmatrix} x_{31}^0 & x_{21}^T & x_{51}^0 \\ x_{32}^0 & x_{22}^T & x_{52}^0 \\ x_{33}^0 & x_{23}^T & x_{53}^0 \end{vmatrix}, \quad w_3 = \begin{vmatrix} x_{31}^0 & x_{41}^0 & x_{21}^T \\ x_{32}^0 & x_{42}^0 & x_{22}^T \\ x_{33}^0 & x_{43}^0 & x_{23}^T \end{vmatrix}. \quad (25)$$

$$a_3 = \frac{w_1}{q}, \quad b_3 = \frac{w_2}{q}, \quad c_3 = \frac{w_3}{q}. \quad (26)$$

Таким образом, были найдены коэффициенты системы уравнений (12) – (14), представленной квадратичными полиномами и связывающей конечные значения температурных параметров с начальными значениями сопряженных переменных. Решение этой системы можно произвести матричным методом. Для этого вычислим определители матриц:

$$l = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}, \quad l_1 = \begin{vmatrix} t_{ГC}^*(T) & b_1 & c_1 \\ t_{ПОВ}^*(T) & b_2 & c_2 \\ t_{Ц}^*(T) & b_3 & c_3 \end{vmatrix}, \quad l_2 = \begin{vmatrix} a_1 & t_{ГC}^*(T) & c_1 \\ a_2 & t_{ПОВ}^*(T) & c_2 \\ a_3 & t_{Ц}^*(T) & c_3 \end{vmatrix},$$

$$l_3 = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & t_{ГC}^*(T) \\ a_2 & b_2 & t_{ПОВ}^*(T) \\ a_3 & b_3 & t_{Ц}^*(T) \end{vmatrix}. \quad (27)$$

Отсюда определяем решение системы уравнений (12) – (14).

$$\varphi_1(0) = \frac{l_1}{l}, \quad \varphi_2(0) = \frac{l_2}{l}, \quad \varphi_3(0) = \frac{l_3}{l}. \quad (28)$$

Функция оптимального управления вычисляется по формуле

(11).

Рассмотрим пример расчета функции оптимального управления нагревом для упрощенной системы при следующих заданных параметрах.

Постоянные времени: $T_0=30$ мин, $T_1=15$ мин, $T_2=35$ мин. Заданное время нагрева $T=200$ мин. Конечные температуры нагрева $t_{ГC}^*(T) = 930^\circ\text{C}$, $t_{ПОВ}^*(T) = 1250^\circ\text{C}$, $t_{Ц}^*(T) = 1250^\circ\text{C}$.

В результате определяется решение системы (12) – (14):

$$\varphi_1(0) = 7.037 \cdot 10^3; \quad \varphi_2(0) = 0.899 \cdot 10^3; \quad \varphi_3(0) = 1.2 \cdot 10^3.$$

Используя заданные параметры режима нагрева, и полученные начальные значения сопряженных переменных и решив совместно систему уравнений (3) – (5) и (7) – (9) из

(11) найдем оптимальное управляющее воздействие для перевода температуры нагреваемой заготовки из начального

состояния в заданное конечное. На рис. 2 приведена расчетная траектория нагрева заготовки при оптимальном управлении, рассчитанном по упрощенной модели, с использованием предложенного метода нахождения начальных значений сопряженных функций.

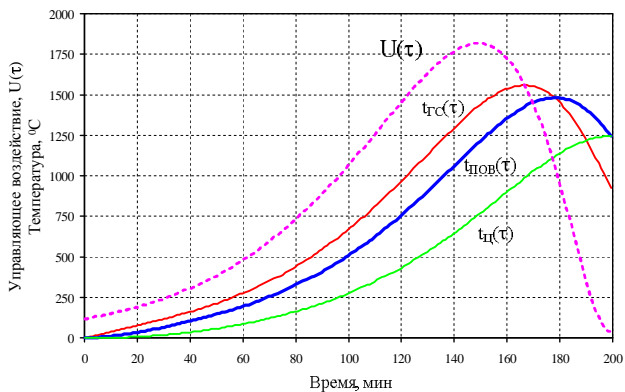


Рис. 2. Расчетная траектория изменения параметров $t_{ГC}(\tau)$, $t_{ПОВ}(\tau)$, $t_{Г}(\tau)$ и оптимального управления $U_{ОПТ}(\tau)$ при заданных параметрах нагрева и найденных начальных значениях сопряженных переменных

Полученная траектория оптимального управления подчиняется общей закономерности – при наличии резерва времени на нагрев заготовки, интенсификация нагрева должна происходить в конце назначенного времени на нагрев.

Предложенный метод может быть также использован и для расчета начальных значений сопряженных переменных в задачах оптимального управления нагревом массивных тел, модель нагрева которых представлена уравнением теплопроводности, например, для задачи, поставленной в [6].

Список литературы

1. Автоматизация методических печей / Буглак Л.И., Вольфман И.Б., Ефроймович С.Ю. и др. - М.:Металлургия, 1981. -196 с.
2. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. - М.: Наука. 1975. - 568 с.
3. Трубицын Г.В., Сотников Г.В. Численное решение задачи оптимального нагрева металла в камерных печах с минималь-

ным расходом топлива // Изв. вузов. Черная металлургия. -1983. -№12. -С.103-107.

4. Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Бушманова М.В. Оптимизация управления тепловым режимом нагревательных печей // Сталь. -2003. -№9. -С. 65-67.

5. Парсункин Б.Н., Прозоров В.В., Андреев С.М. Оптимальное управление нагревом металла с целью минимизации затрат топлива // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Вып.3. – Магнитогорск: МГТУ, 1998. -С.163-168.

6. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бушманова М.В. Оптимизация работы тепловых агрегатов с целью минимизации расхода топлива // Энергосбережение, теплоэнергетика и металлургическая теплотехника: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – С.21-29.

УДК 620.179

**Савченко Ю.И., Рыскужина И.В.,
Лисовская М.А., Вострокнутова О.Н.**
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ЭМАП

Падающая на поверхность металла электромагнитная волна (ЭМВ) создает в скин-слое переменный электрический ток той же частоты, который, взаимодействуя с внешним магнитным полем, приводит к возникновению механической силы. Механическая сила возбуждает в образце ультразвуковые волны. Данный механизм носит название Электро-Магнито-Акустического Преобразования (ЭМАП). При установлении стоячей волны на толщине образца амплитуда колебаний резко возрастает. Используя этот эффект и измеряя частоту и ширину резонансного пика, а также размеры образца, косвенным методом можно определить скорость ультразвуковой волны и добротность стали.

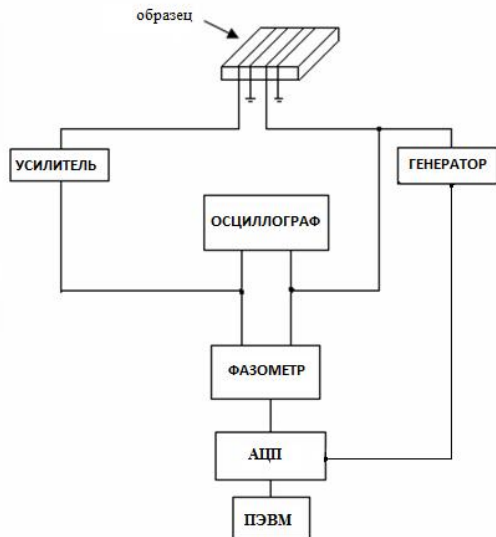


Рис. 1. Блок - схема установки

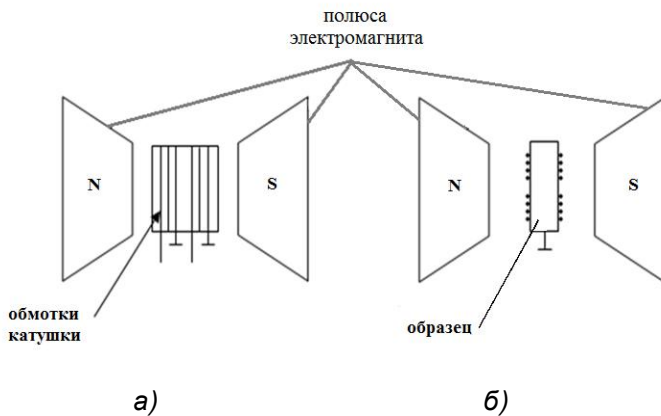


Рис. 2. Расположение образца между полюсами магнита для измерения скорости: а – продольной, б – поперечной акустических волн

Технические характеристики установки:

Создаваемое магнитное поле $0 \div 2,2$ Тл.

Частотный диапазон возбуждения акустических волн $0 \div 2000000$ Гц ± 0.1 Гц с шагом 0.1 Гц.

Измерение разности фаз $0^\circ \dots 360^\circ \pm 0.01^\circ$.

Образец помещается между полюсами электромагнита, магнитная индукция, создаваемая которым, изменяется от 0 до $2,2$ Тл. В зависимости от ориентации образца в магнитном поле в нем может возбуждаться либо продольная, либо поперечная акустическая волна (рис.2).

Программа, работающая на ПЭВМ, посредством Аналого-Цифрового Преобразователя (АЦП) подает сигнал установки частоты на разъем дистанционного управления генератора. Синусоидальный сигнал переменного напряжения подается на катушку, намотанную на образце, и на один из каналов осциллографа и измерителя разности фаз (фазометра). Сигнал со второй катушки, намотанной на образце, поступает на усилитель и после усиления на второй канал осциллографа и фазометра. Значение разности фаз, измеренное фазометром через разъем дистанционного управления, считывается устройством ввода-вывода АЦП и передается в управляющую программу. Программа строит зависимость сдвига фаз между сигналами на первой и второй катушках от частоты. При наблюдении акустического резонанса происходит резкое изменение сдвига фаз.

С помощью данной установки измеряются частоты и амплитуды резонансных пиков. На рис. 3 показан наблюдаемый резонанс для образца стали 9Х1 при намагничивающем поле 1.8 Тл.

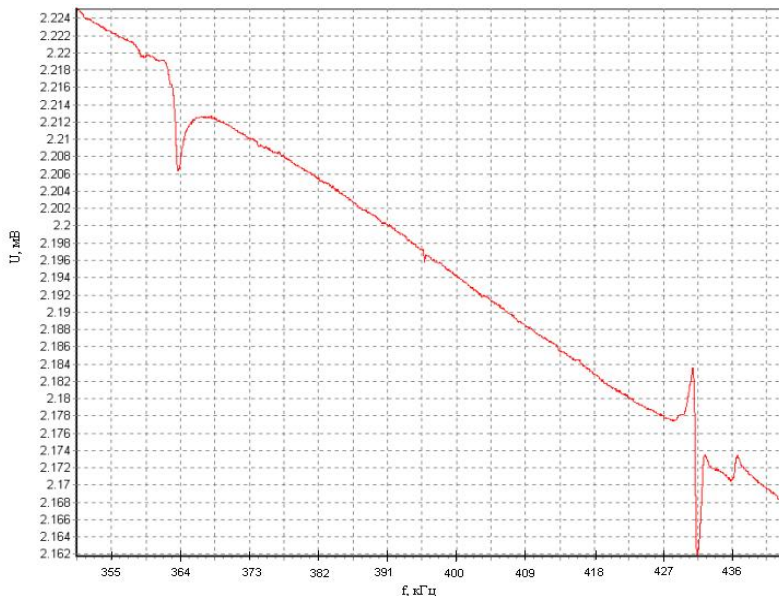


Рис. 3. Наблюдаемые резонансы при УЗК ($V=1.8$ Тл)

Зная частоту, на которой наблюдается резонанс, и толщину образца, можно определить скорость распространения ультразвуковой волны в образце по формуле

$$C = f \cdot 2d, \quad (1)$$

где C - скорость распространения ультразвуковой волны; f - резонансная частота; d - толщина образца.

При малом затухании можно определить добротность образца стали через полуширину резонансного пика

$$Q = \frac{f}{\Delta f}. \quad (2)$$

Для высокой точности определения C и Q необходимо выполнение следующего условия: толщина образца должна быть меньше других его размеров. Если толщина образца будет соизмерима с другими его размерами, то установившиеся моды колебаний будут накладываться друг на друга и определение резонансной частоты станет невозможным.

Определение упругих свойств материала

Скорость продольных волн в изотропных твердых телах определяется модулем упругости E (модуль Юнга), коэффициентом Пуассона ν и плотностью среды ρ .

$$C_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu)(1 - 2 \cdot \nu)}}. \quad (3)$$

Скорость поперечных волн определяется модулем сдвига μ и плотностью среды ρ .

$$C_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (3) и (4), можно выразить упругие модули через скорости продольной и поперечной волн.

$$\nu = \frac{C_L^2 - 2 \cdot C_t^2}{2 \cdot (C_L^2 - C_t^2)}; \quad (5)$$

$$\mu = \rho \cdot C_t^2. \quad (6)$$

$$E = \rho \cdot C_t^2 \frac{3 - 4 \cdot C_t^2 / C_L^2}{1 - C_t^2 / C_L^2}. \quad (7)$$

С помощью данного метода на установке были получены экспериментальные данные и рассчитаны упругие свойства для стали 9Х1 ($C_L = 6200$ м/с; $C_t = 3520$ м/с; $\nu = 0,26$; $\mu = 97$ ГПа; $E = 244$ ГПа), которые хорошо согласуются с теоретическими значениями.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. /под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил.
2. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 308 с.

3. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – М.: изд-во стандартов, 1982. – 248 с.

4. Акустический контроль твердости поверхностных слоев изделий сложной конфигурации / Ботаки А.А., Лебедев А.А., Левитан Л.Я. и др. // Дефектоскопия. – 1980. - № 6. – С. 94 – 96.

О.В.Аникина, П.Ф.Зибров

ГОУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса», blue-waterfall@yandex.ru

ПРИВЕДЕНИЕ ТАБЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ К ДЕТЕРМИНИРОВАННОМУ ВИДУ

Актуальность работы

На протяжении всей истории развития программирования ведется поиск новых способов описания алгоритмов. Изучение их структур позволяет сделать доступными для широкого понимания оригинальные методы решения практических задач. Исследования [1] показывают, что электронные таблицы (ЭТ) являются удобным и эффективным инструментом анализа и визуализации самых разнообразных алгоритмов информационных структур.

Проблематика работы

Под информационной структурой программы понимается совокупность сведений о том, как ее элементы данных (входные, промежуточные и выходные) связаны друг с другом. Для изучения информационной структуры алгоритмов и программ традиционно используются два подхода [2]: 1) *денотационный подход*, основывающийся на исследовании состояния памяти программ (применяется довольно редко); 2) *операционный подход*, рассматривающий программу как последовательность связанных между собой действий. Он применяется чаще, к нему относится большой и важный класс графовых моделей программ.

В классе графовых моделей информационную структуру программы удобно описывать с помощью ациклического ориентированного графа алгоритма $G = (V, E)$, в котором вершины V соответствуют совокупности операций (действий) программы, а дуги E отражают связи (отношения) между вершинами графа.

Граф алгоритма почти всегда зависит от входных данных, т.к. общее число вершин и совокупность дуг графа зависят от условных переходов, циклических конструкций, размерности массивов, т.е. в общем случае граф алгоритма является *параметризованным* и *недетерминированным*.

Для изучения особенностей структуры алгоритма предложено использовать ориентированный граф связей между ячейками алгоритмической табличной модели этого алгоритма [1]. В сравнении с обычно применяемым для этой цели графом алгоритма, граф связей между ячейками табличной модели обладает преимуществом, так как он учитывает состав, тип и семантику переменных, определяет организационную структуру табличной модели алгоритма, легко визуализируется в электронных таблицах.

Цели и задачи работы

Целью исследования является разработка инновационного метода эквивалентного преобразования недетерминированных программ и алгоритмов в детерминированные.

Результаты реализации решения задачи

Одним из важнейших требований, предъявляемых к табличной модели алгоритма, является ее детерминированность, т.е. независимость структуры и операций, выполняемых в ячейках табличной модели алгоритма, от входных данных.

Для детерминированной табличной модели алгоритма имеет место взаимно-однозначное соответствие между операторами присваивания реализующей алгоритм программы и соответствующими им ячейкам табличной модели. Для недетерминированной табличной модели алгоритма такого соответствия при всех входных данных нет. В случае недетерминированной табличной модели алгоритма можно лишь утверждать, что существует взаимно-однозначное соответствие между каким-то подмножеством операторов присваивания программы и ячейками имитационной табличной модели алгоритма при каждом конкретном наборе входных данных. Разным значениям входных данных могут соответствовать разные подмножества.

Можно выделить несколько причин недетерминированности компьютерных программ и имитирующих их табличных моделей:

- 1) *непостоянство размеров массивов входных данных*, например, на входе программы может изменяться число элементов сортируемого массива;
- 2) *наличие циклов с заранее неизвестным числом проходов*;
- 3) *наличие в программе альтернативных операторов*, из-за которых при изменении входных данных выполняются различные ветви алгоритмов.

Устранение неопределенности, связанной с переменной размерностью массивов входных данных. В некоторых высокоуровневых языках программирования, например в Visual Basic, для решения этой проблемы используются динамические массивы, однако большинство структурированных языков программирования массивы динамического типа не поддерживают. Поэтому стандартным приемом устранения неопределенности, связанной с переменной размерностью массивов входных данных, является резервирование памяти под входные массивы с некоторым запасом.

Поскольку в табличных моделях возможность работы с динамическими структурами данных отсутствует (функции Excel пассивны), здесь данная неопределенность устраняется аналогичным способом - избыточным резервированием ячеек под входные массивы данных.

Устранение неопределенности, связанной с наличием в программе циклов с неизвестным числом проходов. Разворачивание таких циклов в табличных моделях имеет ряд отличий от разворачивания циклов с фиксированным числом проходов:

- нужно оценить необходимое число проходов цикла и развернуть цикл на рабочем листе ЭТ с запасом, чтобы условие завершения цикла выполнялось для самого неблагоприятного случая;
- в табличную модель добавляется вспомогательная индикаторная переменная (флаг), с помощью которой на каждом проходе цикла контролируется условие его завершения.

Устранение неопределенности, связанной с наличием в программе альтернативных операторов. Неопределенность, связанная с наличием в программе альтернативных операторов, встречается практически в каждой программе, поскольку именно альтернативные операторы придают программам необходимую им гибкость и интеллект. Поэтому задача эквива-

лентного преобразования недетерминированных программ, содержащих альтернативные операторы, в детерминированные является исключительно важной. Здесь под эквивалентными преобразованиями понимаются такие преобразования программы, при которых она в одних и тех же условиях дает одинаковые результаты, включая все ошибки округления.

В общем случае существуют три вида альтернативных операторов: условные операторы ветвления, операторы выбора варианта и операторы условной передачи управления. Операторы условной (и безусловной) передачи управления здесь рассматриваться не будут по той причине, что парадигма структурированного программирования для того и создавалась, чтобы избавиться от этих операторов в программе, т.к. они сильно затрудняли чтение и анализ пользователями неструктурированных программ. Поэтому на практике в программах, написанных на структурированных языках программирования, операторы условной передачи управления используются крайне редко.

Операторы выбора варианта можно представить как совокупность условных операторов, поэтому без ограничения общности в дальнейшем будем рассматривать только блочные условные операторы вида:

```
IF cond THEN
  <операторы присваивания ветви branch_True>
ELSE
  <операторы присваивания ветви branch_False>
ENDIF,
```

где *branch_True* и *branch_False* – последовательность операторов присваивания, которая выполняется, когда логическое условие *cond* принимает значение *True* и *False* соответственно.

Предлагаемый оригинальный метод эквивалентного преобразования недетерминированных алгоритмов и программ в детерминированные заключается в формальном выравнивании ветвей *branch_True* и *branch_False* условного оператора с последующей заменой условных операторов программы совокупностью эквивалентных операторов присваивания с условной функцией IIF (ЕСЛИ). Выравнивание ветвей *branch_True* и *branch_False* условного оператора выполняется для того, чтобы эти ветви стали симметричными, т.е. содержали одинаковые последовательности операторов присваивания. Выравнивание ветвей осуществляется добавлением в них «пустых» операторов

ров присваивания вида $var = var$ таким образом, чтобы сохранялся частичный порядок выполнения операций программы.

Идею метода проиллюстрируем на простом примере. Пусть дан фрагмент программы (рис.1), содержащий условный оператор. На рис.1 показан также граф связей между ячейками табличной модели алгоритма для случая выполнения ветви *branch_True* (рис. 1, а) или ветви *branch_False* (рис. 1, б).

Очевидно, что этот фрагмент программы является недетерминированным, т.к. при разных входных данных в нем будет выполняться одна или другая ветвь условного оператора.

```
x = ...
y = ...
IF cond(x, y) THEN
  x = f1(x, y)
ELSE
  y = f2(x, y)
ENDIF
```

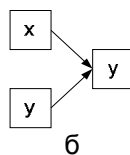
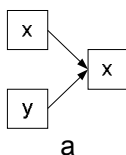


Рис. 1. Граф связей между ячейками недетерминированной табличной модели: выполняется ветвь *branch_True* (а), ветвь *branch_False* (б)

Выровняем ветви *branch_True* и *branch_False* условного оператора, выполнив простые эквивалентные преобразования приведенного фрагмента:

```
x = ...
y = ...
IF cond(x, y) THEN
  x = f1(x, y)
  y = y
ELSE
  x = x
  y = f2(x, y)
ENDIF
```

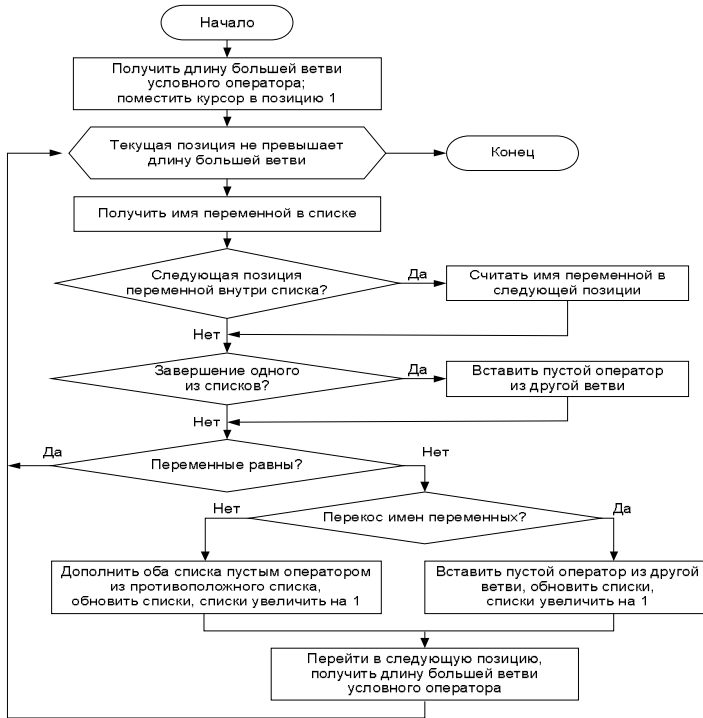


Рис.2. Блок-схема алгоритма выравнивания ветвей условных операторов ветвления

Заменяя условный оператор эквивалентными операторами присваивания, содержащими в правой части условную функцию IIF, получим детерминированный эквивалент исходного фрагмента программы (рис.3):

$x = \dots$
 $y = \dots$
 $x = \text{IIF}(\text{cond}(x, y), f1(x, y), x)$
 $y = \text{IIF}(\text{cond}(x, y), y, f2(x, y))$

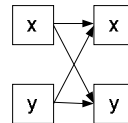


Рис. 3. Граф связей между ячейками детерминированной табличной модели алгоритма

В общем виде блок-схема алгоритма выравнивания ветвей условных операторов ветвления имеет вид, показанный на рис.2.

Заключение

Предложенный метод эквивалентного преобразования недетерминированных программ в детерминированные расширяет возможности табличного моделирования широкого круга вычислительных алгоритмов и может быть использован как разработчиками табличных моделей, так и для учебных целей.

Список литературы

1. Технологии имитационного табличного моделирования численных алгоритмов: монография / О.В. Аникина, В.И. Аникин, П.Ф. Зибров. – Тольятти: ТГУ, 2011. – 150 с.
2. Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.

УДК 621.316.11+621.311.1.003

Е.Б. Ягольникова

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ТАРИФ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ ОАО «ММК»

Проблема компенсации реактивной мощности является одной из важных проблем электроснабжения с технической и экономической точек зрения. В связи с переходом на новые экономические отношения с 1992 года этой проблеме уделялось недостаточно внимания. Тарифы на передачу электроэнергии определялись косвенным образом, в результате чего установленные на предприятиях источники реактивной мощности (статические батареи конденсаторов, фильтрокомпенсирующие устройства, синхронные двигатели) остались невостребованными и были отключены.

В настоящее время тарифы на электроэнергию определяются по [1-3]. Согласно данным документам в состав конечного тарифа (цены) включена услуга по передаче электрической

энергии в зависимости от соотношения активной и реактивной мощности для потребителей электрической энергии. Таким образом для снижения тарифа на передачу электрической энергии промышленному предприятию выгодно, чтобы компенсирующие устройства, отключенные на сегодняшний день, использовались для компенсации реактивной мощности.

С этой целью был проведен анализ значений коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы наибольших суточных нагрузок электрической сети. Согласно [3] предельные коэффициенты реактивной мощности в узлах присоединения нагрузки следующие (табл. 1).

Таблица 1

Предельные коэффициенты реактивной мощности

Положение точки присоединения потребителя к электрической сети	$\text{tg } \varphi$
Напряжение 110 кВ (220 кВ)	0,5
Напряжение 35 кВ	0,4
Напряжение 6-20 кВ	0,4
Напряжение 0,4 кВ	0,35

Проведенный анализ суточных графиков электрических нагрузок ОАО «ММК» показал, что средние значения $\text{tg } \varphi$ по основным узлам за март-апрель 2010г. составляют: ПС№86 – 0,4; ПС 60 от 0,7 до 1,0; ПС 90 -77 от 0,5 до 0,6; ПС 30 – от 1,0 до 1,5. Соотношения активной и реактивной мощностей для ПС № 86 и 90 для данной конфигурации электрической схемы не превышают нормативных, а соотношение мощностей для других узлов является завышенным, особенно для подстанции № 30.

С целью оценки возможности использования существующих устройств компенсации реактивной мощности и синхронных двигателей для снижения соотношения активной и реактивной мощности в узлах нагрузки (ПС № 30, 60, 77); снижения потерь электрической энергии и тарифов на оказание услуг при ее передаче по электрическим сетям был проведен анализ оценки состояния установленных в ОАО «ММК» компенсирующих устройств и синхронных двигателей и возможности его использования для компенсации реактивной мощности в узлах поставки

электроэнергии от ООО «Магнитогорская энергетическая компания».

В результате расчетов, которые выполнялись с помощью программы анализа и оптимизации [4], были получены следующие результаты (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчетов для узлов подстанций при различных сочетаниях компенсирующих устройств

Параметр	Работа компенсирующих устройств	ПС		
		30	77	60
P, кВт	СД 0% ФКУ (СК) отключены	39,7	45,92	44,56
	СД 100% ФКУ (СК) отключены	44,41	45,68	44,7
	СД 100% ФКУ (СК) включены	46,87	52,23	51,4
Q, кВар	СД 0% ФКУ (СК) отключены	42,17	31,17	44,94
	СД 100% ФКУ (СК) отключены	42,38	31	44,09
	СД 100% ФКУ (СК) включены	30,09	20,91	34,38
tg(φ)	СД 0% ФКУ (СК) отключены	1,06	0,68	1,008
	СД 100% ФКУ (СК) отключены	0,95	0,67	0,98
	СД 100% ФКУ (СК) включены	0,6	0,4	0,78

По результатам расчета видно, что с применением всех имеющихся устройств для компенсации реактивной мощности $\text{tg } \varphi$ значительно снижается, а следовательно, снижается и тариф на передачу электрической энергии.

Список литературы

1. Приказ № 49 « Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договоры энергоснабжения)».
2. Постановление Правительства Российской Федерации N 530 "Об утверждении Правил функционирования розничных рынков электрической энергии в переходный период реформирования электроэнергетики" (Собрание законодательства Российской Федерации, 2006, N 37, ст. 3876).
3. Постановление Правительства Российской Федерации N 861 "Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам администратора торговой системы оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств (энергетических установок) юридических и физических лиц к электрическим сетям.
4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611306. Программа «Расчет и оптимизация установившихся и переходных эксплуатационных режимов параллельной и раздельной работы с энергосистемой и режимов замыкания на землю с оценкой влияния на электрооборудование в системах электроснабжения промышленных предприятий» / В.А. Игуменцев, В.В. Зиновьев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова// Оф. Бюл. «Программы для ЭВМ, базы данных, ТИМС». – М.: ФИПС, 2007. – №2.

А.А. Шпонько
ООО «ДМАиТ», г. Магнитогорск
М.В. Вечеркин
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»

ВЫБОР АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ БАЗЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗОДУВНЫХ МАШИН КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время в условиях коксохимического производства ОАО «ММК» актуальна проблема обеспечения бесперебойной работы газодувных машин, которые являются одним из ключевых агрегатов коксохимического производства.

Газодувная машина представляет собой агрегат, состоящий из нагнетателя, повышающего редуктора и высоковольтного асинхронного двигателя. Ротор нагнетателя имеет два рабочих колеса, каждое из которых содержит по 26 лопастей. Частота вращения ротора нагнетателя составляет 3906 об/мин, частота вращения двигателя – 1490 об/мин.

Одной из главных сложностей эксплуатации является осаждение пекообразного вещества (ПОВ) на роторах, лабиринтных уплотнениях и внутренних полостях корпуса газодувных машин. Это приводит к тому, что после остановки машины её повторный пуск невозможен из-за заклинивания ротора вследствие застывания ПОВ, которое имеет температуру размягчения около 50°C.

Решить данную проблему помогает промывка газодувной машины и газопровода коксового газа водосмоляной эмульсией. В то же время, практическая реализация данного мероприятия связана с рядом сложностей. В частности, отсутствие доступа к внутренним полостям работающей машины не позволяет оценить толщину осажденного слоя и сделать вывод о необходимости промывки и времени промывки. Кроме этого, в случае перерасхода водосмоляной эмульсии возможна заливка газопровода коксового газа и аварийная остановка газодувных машин.

Эффективная и безаварийная реализация процесса промывки невозможна без решения следующих основных задач:

1. Получение достоверной информации о толщине осажденного слоя на внутренних полостях работающей газодувной машины.

2. Определение рациональных режимов расхода водосмоляной эмульсии в процессе промывки.

3. Оценка технического состояния газодувной машины в процессе промывки.

Решение первой задачи позволит принимать обоснованные решения о необходимости промывки того или иного агрегата, второй – минимизировать расход водосмоляной эмульсии, третьей – предотвратить возможные аварийные ситуации, связанные с промывкой.

Наиболее сложной задачей является оценка толщины осажденного слоя ПОВ. Это обусловлено тем, что доступ к внутренним полостям газодувной машины при ее работе невозможен. Непосредственная оценка толщины осажденного слоя возможна лишь при остановке машины и снятии верхней крышки кожуха нагнетателя. В условиях непрерывного производства любая остановка машины (кроме остановки на плановый ремонт) ведет к существенным экономическим потерям. Очевидно, что реализация метода непосредственного измерения будет крайне дорогостоящей и непродуктивной.

В подобных условиях необходима реализация таких средств и методов неразрушающего контроля, которые, по определению, не только дадут информацию о толщине осажденного слоя, но и не будут влиять на работу агрегата и процесс производства.

Для решения поставленных задач наиболее рационально использовать вибрационные методы контроля. Это связано с тем, что виброакустические процессы обладают огромной информационной емкостью и практически мгновенной реакцией на изменение технического состояния объекта.

Возможность реализации вибрационных методов контроля для решения задачи оценки толщины осажденного слоя ПОВ основано на следующих соображениях.

Методы вибрационной диагностики основаны на анализе параметров вибрации работающего агрегата. Эти параметры несут некоторую информацию о свойствах среды, в которой они распространяются. При этом из множества параметров, характеризующих вибрационный процесс, необходимо выделить только те, которые прямо или косвенно характеризуют состояние объекта контроля. В данном случае эти параметры должны

отражать информацию о толщине слоя смолы на корпусе или роторе газодувной машины.

Диагностические признаки, несущие информацию о толщине осаденного слоя, могут находиться во временной или спектральной областях сигнала вибрации. Для поиска этих признаков необходимы многочисленные измерения в различные моменты времени эксплуатации газодувной машины.

Для анализа осциллограмм и спектров вибрации газодувной машины был разработан виброанализатор, структурная схема которого приведена на рис.1.

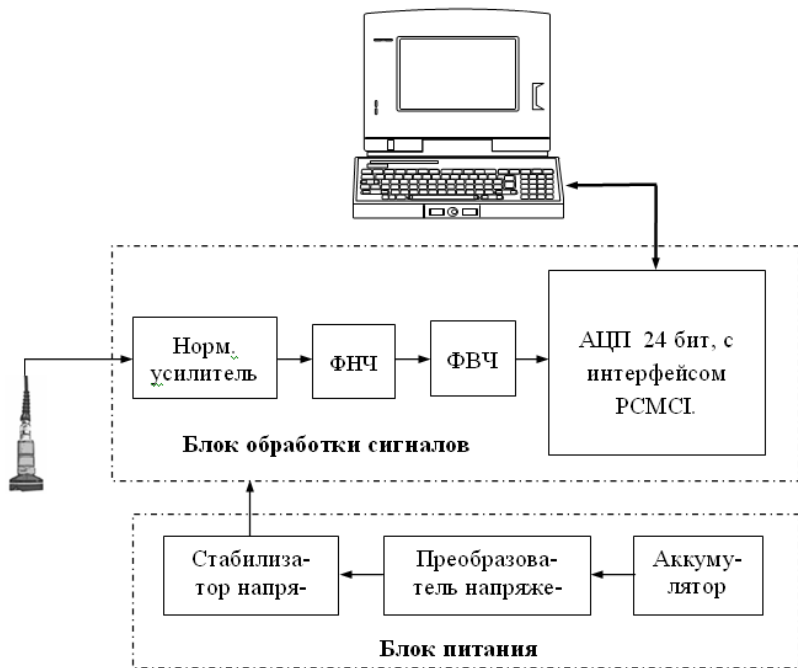


Рис.1. Структурная схема виброанализатора

Виброанализатор состоит из датчика виброускорения (пьезоакселерометра) со встроенным усилителем заряда, нормирующего усилителя, фильтров низких и высоких частот, аналого-цифрового преобразователя с интерфейсом РСМСІ и ноутбука.

Виброанализатор работает следующим образом. Виброускорение исследуемого механического оборудования преобразуется акселерометром в электрический сигнал. Усиливается нормирующим усилителем и фильтруется фильтрами низких и высоких частот, которые формируют частотный диапазон исследуемого виброускорения. Затем преобразуется аналого-цифровым преобразователем в цифровую форму, и поступает для обработки через порт PCMC1 в ноутбук. В нём с помощью разработанного программного обеспечения с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) получается спектр виброускорения, который усредняется и сохраняется на жестком диске ноутбука. Аккумулятор используется для питания датчика виброускорения и электронных схем виброанализатора.

Частотный диапазон вибрации машины совпадает с диапазоном шума, генерируемого нагнетателем, и лежит в области от 10 Гц до 8 кГц. Исходя из этого в качестве датчика виброускорения был выбран пьезоакселерометр AC102-1A со встроенным усилителем заряда. Его технические характеристики приведены в таблице.

Характеристики пьезоакселерометра AC102-1A

Параметр	Значение
Коэффициент преобразования	9,9 мВ/(м/с ²)
Частотный диапазон	2...10000 Гц
Неравномерность АЧХ	± 3 дБ
Температурный диапазон	-50...+120°С
Частота установочного резонанса	23 кГц

Датчик виброускорения устанавливался на поверхность кожуха с помощью плоского магнита. Для получения устойчивых показаний перед началом измерений он прогревался до температуры кожуха (~80°С). Таким образом, стабилизировалась температурная погрешность датчика на уровне 7 – 8%.

Для преобразования аналогового сигнала с датчика виброускорения в цифровой используется Дельта-сигма АЦП разрядностью 24 бита с частотой преобразования 192 кГц. Фильтры низких и высоких частот 4-го порядка имеют частоты среза 15 кГц и 50 Гц соответственно.

Для питания схем усилителей, фильтров и АЦП используется литиево-ионный аккумулятор. Напряжение аккумулятора 3,6-4,2 В преобразуется в напряжение питания 20 В для усили-

теля заряда датчика и ± 15 В для нормирующего усилителя и фильтров. Аккумуляторная батарея обеспечивает автономную работу виброанализатора в течение 6 ч.

Программное обеспечение написано в среде программирования Delphi 7. Для расчета спектрального состава вибраций использован модифицированный метод оценки спектральной плотности мощности (СПМ) Уэлча [1, 2]. Для повышения точности полученных спектров вибрации они усреднялись по 100 измерениям.

Фиксацию величины вибрации производили в 10 точках кожуха, напротив мест прохождения лопасти рабочего колеса мимо отводного патрубка. При вращении рабочего колеса в этом месте возникает периодическая последовательность импульсов статического давления, генерирующая пульсацию потока газа и вибрацию газодувной машины на лопастной частоте [3, 4]. Кроме того, дополнительно фиксировался спектр вибраций на корпусе подшипника нагнетателя, на корпусе муфты редуктора и на корпусе редуктора.

Измерение проводились в течение 7 месяцев. За время исследований получено более 550 спектров виброускорений в диапазоне от 100 Гц до 6 кГц в 14 контрольных точках

Типичный спектр, полученный на кожухе нагнетателя газодувной машины, показан на рис.2. Частотный диапазон вибрации кожуха лежит в интервале от 100 Гц до 6 кГц.

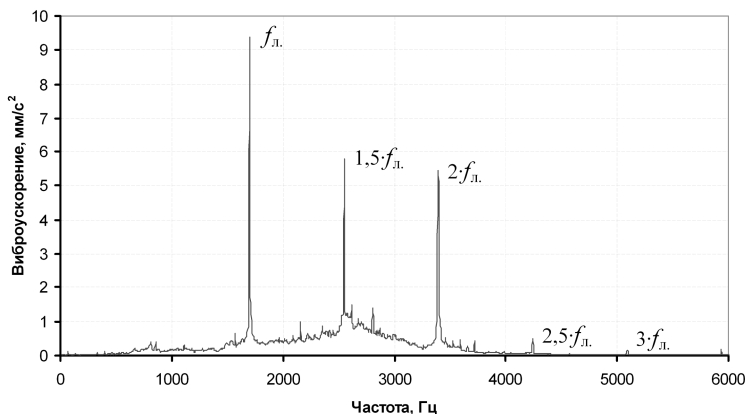


Рис.2. Типичный спектр виброускорения кожуха нагнетателя

На рис. 2 отмечены 5 гармоник на частотах: 1692.6, 2538.9, 3385.2, 4231.5, 5077.8 Гц. Частоты этих гармоник кратны половине частоты лопастной гармоники рабочего колеса. Частоты

та лопастной гармоник определяется как произведение частоты вращения колеса $f_{\text{обор}} = 65.1 \text{ Гц}$ на число лопастей:

$$f_{\text{л}} = 26 \times f_{\text{обор}} = 26 \times 65.1 = 1692.6 \text{ Гц}.$$

Наличие в спектре гармоник, кратных $0.5f_{\text{л}}$, обусловлено конструкцией ротора, на котором расположено два идентичных рабочих колеса.

С течением времени амплитуда гармоник увеличивается, что вызвано накоплением смолы на роторе. Наибольшее изменение амплитуды колебаний происходит в нижней части кожуха, что объясняется скапливанием смолы в этой области газодувной машины.

На рис. 3 приведено сопоставление спектров гармоник нижней части кожуха газодувной машины, снятые в течение 15 недель эксплуатации машины после ремонта.

Исследования показали, что увеличение амплитуды гармоник происходит в течение 2-2,5 месяцев после пуска газодувной машины в эксплуатацию. Далее значения амплитуды колеблются относительно некоторого постоянного значения. Эти колебания связаны с различными нагрузками на газодувную машину во время проведения измерений.

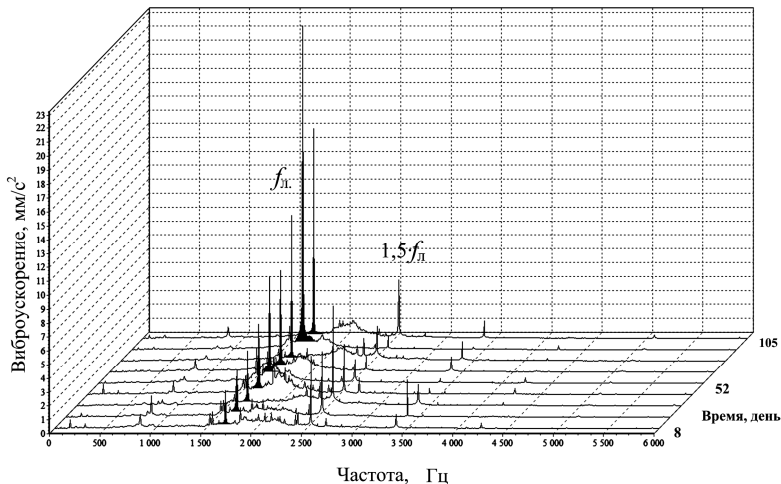


Рис.3. Спектр виброускорения в нижней точке кожуха нагнетателя ГДМ №12 в течение 15 недель

На рис. 4 показана аппроксимация зависимости изменения амплитуды виброускорения на основной частоте (1692,6 Гц) от времени эксплуатации газодувной машины с момента ремонта

(за 100 % принята амплитуда сигнала в момент времени сразу после ремонта).

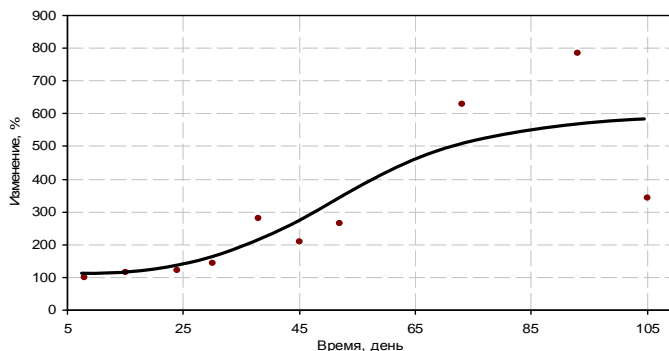


Рис.4. Зависимость изменения амплитуды виброускорения на основной частоте (1692,6 Гц) от времени эксплуатации газодувной машины с момента ремонта

Характер зависимости позволил сделать вывод, что при работе нагнетателя рост толщины осаденного слоя в пространстве между кожухом и рабочим колесом происходит лишь до определенного значения. Дальнейшему росту осаденного слоя препятствуют потоки газа, которые уносят частички размягченного ПОВ.

Прекращение изменения амплитуды виброускорения в контрольных точках является показателем того, что толщина осаденного слоя достигла максимума. Очевидно, что для гарантированного пуска машины после аварийной остановки промывка должна осуществляться до достижения этого значения.

Для контроля технического состояния газодувной машины в процессе ее эксплуатации, а так же при проведении промывки необходимо контролировать среднеквадратичное значение (СКЗ) виброскорости. Этот параметр нормирован ГОСТом и его значение однозначно определяет общее техническое состояние газодувной машины. Для контроля СКЗ виброскорости рационально использовать относительно недорогие датчики, типа ДВСТ-1, которые следует устанавливать на верхнюю крышку подшипника ротора газодувной машины со стороны редуктора.

Список литературы

1. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
2. Иванов В.В. Методы вычислений на ЭВМ: справ. пособие. – Киев, 1986. – 384 с.
3. Анализ вибрационного состояния насосного агрегата при контрольных испытаниях как способ оценки его надежности / Е.В. Соколов, Д.Т. Анкудинов, А.В. Феофанов // Материалы всерос. науч.-техн. конференции «Математическое моделирование механических явлений», 28-29 мая 2004г. / Урал. гос. горно-геолог. акад. – Екатеринбург, 2004. – С.68-72.
4. Применение численного метода для определения собственных частот колебаний ротора центробежного химического насоса / Е.В. Соколов, Д.Т. Анкудинов // Материалы II всерос. науч.-техн. конференции студентов и аспирантов, 17-26 апреля 2006 г. / Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2006. – Ч. 1. – С.188-191.

УДК 50.03.03

**А.Ю. Миков, И.И. Мацко,
О.С. Логунова**

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ*

Для современных промышленных предприятий характерна сложная структура производственных процессов. Для выпуска продукции, удовлетворяющей предъявленным требованиям, необходимо осуществлять оперативный контроль качества отобранных контрольных образцов. При этом в условиях непрерывного производства важными являются своевременность, точность выявления дефектов и достоверность информации, полученной при проведении диагностики продукции [1 – 3].

* Работа выполняется в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009 – 2013 гг.

Целью исследования, приведенного в работе, является повышение достоверности информации о качестве металлургической продукции путем теоретического обоснования и построения методики использования нейросетевых методов для сегментации низкоконтрастных изображений образцов.

Для достижения цели были поставлены и решены задачи:

- исследование формы и структуры типовых объектов на низкоконтрастных изображениях серных отпечатков и фотографий образцов;
- теоретическое обоснование выбора типовых нейросетевых структур для сегментации изображений;
- синтез нейросетевой структуры для обработки изображений образцов металлургической продукции.

На изображениях представлены два вида объектов: травленный темплет от заготовки квадратного сечения и серный отпечаток для заготовки прямоугольного сечения (рис. 1). Место расположения дефекта на темплете носит случайный характер и дефект образует объект нерегулярной формы.

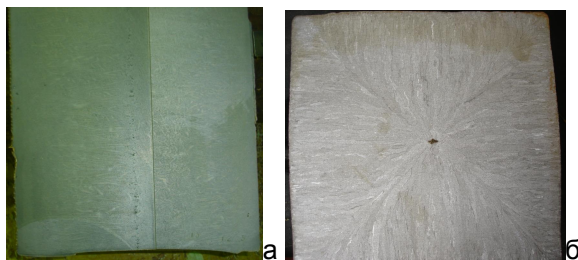


Рис. 1. Изображения темплетов: а – прямоугольного; б – заготовки квадратного сечения

Цветовая градация образцов в оттенках серого. На изображении дефекты могут вырождаться в отметки размером в один или несколько смежных пикселей и представляют собой точечные и малоразмерные объекты, лишённые одного из самых информативных признаков изображений – формы. Средняя яркость фона (темплета) выше средней яркости изображений дефектов. Увеличение контрастности и выделение краев дефектов позволит повысить точность и скорость оценки образцов.

Для решения поставленной задачи невозможно обойтись применением какой-то определенной нейросетевой структуры, поэтому возникает необходимость в использовании комбинации нескольких нейронных сетей.

Выделение краев изображений дефектов можно осуществить при помощи однослойной нейронной сети. На входной слой подается полутоновое изображение темплета, на выходе нейронной сети формируется матрица Z . Выполнив поэлементное умножение XZ (где X – матрица входного изображения), получаем сегментированное изображение с выделенными краями областей, содержащих потенциальные дефекты.

Каждый нейрон первого слоя соответствует входящему элементу растра. Помимо этого на вход нейрона подаются значения соседних восьми пикселей. Веса настраиваются так, чтобы на сумматоре получилось

$$\sum_{i=1, j=1}^{N, M} |x_{i\pm 1, j\pm 1} - x_{i, j}|,$$

где N, M – размерность изображения; x_i – значение сигнала пикселя.

Принадлежность пикселя контуру определяется путем оценивания перепада уровня яркости в рассматриваемой области. Если величина близка к нулю, значит пиксель лежит в области с равномерным уровнем яркости и его изменение не требуется; в противном случае необходимо окрасить пиксель в черный цвет. В качестве активационной выбрана сигмоидальная функция

$$\phi(v) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha v}},$$

где α – параметр наклона сигмоидальной функции, v – индуцированное локальное поле.

Нелинейный характер активационной функции снижает уровень зашумленности. На рис. 2 представлен фрагмент структуры предлагаемой нейронной сети с сигмоидальными активационными функциями, где Y – значение сигналов пикселей, N – соответствующий пикселю нейрон, Z – маска для исходного изображения.

Эффективность работы рассматриваемой нейронной структуры можно повысить, проведя предварительную обработку изображения с усилением резкости изображения и уточнения границ.

Наличие дефектов на темплете создает перепады яркости, которые соответствуют высокочастотным составляющим на Фурье-образе изображения. Целесообразно провести высокочастотную фильтрацию для повышения резкости изображения и уточнения краев дефектов. В [4] рассматривается четырехслойная нейронная сеть прямого распространения, реализующая дискретное преобразование Фурье для отсеечения шумов на обрабатываемом изображении. Модификация такой нейроструктуры (рис. 3) может быть применена для подавления низкочастотной части Фурье-преобразования. Нейронная сеть состоит из трех слоев (см. рис. 3):

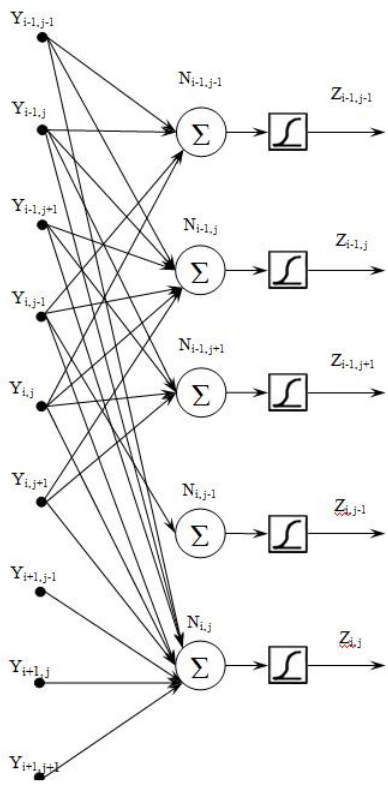


Рис. 2. Фрагмент структуры однослойной нейронной сети

1) количество нейронов на входном слое соответствует числу пикселей в изображении. Каждый сигнал подается на все нейроны первого слоя, на котором осуществляется дискретное преобразование Фурье;

2) на втором слое происходит высокочастотная фильтрация с подъемом частотной характеристики: подъем частотной характеристики, выполняемый за один шаг одновременно с высокочастотной фильтрацией, позволяет увеличить вклад исходного изображения в конечный результат. Посредством синаптических весов на слой передаются сигналы нейронов, входящих в полосу пропускания Гауссова фильтра высоких частот. Гауссов фильтр высоких частот дает хорошее качество для объектов небольших размеров в несколько пикселей и поэтому является наиболее рациональным для решения рассматриваемой проблемы;

3) третий слой реализует обратное преобразование Фурье. Выходом является изображение повышенной резкости.

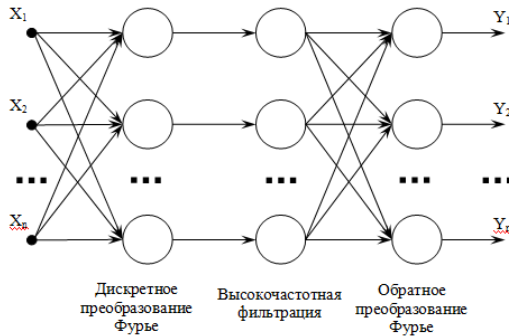


Рис. 3. Структура трехслойной нейронной сети прямого распространения для высокочастотной фильтрации изображения

Объединив рассмотренные нейронные структуры, получим гибридную нейросеть, решающую задачу сегментации низкоконтрастного изображения выделением границ объектов (рис. 4). Объединение осуществляется путем подачи выходных сигналов трехслойной сети (см. рис. 3) на вход однослойной (см. рис. 2).



Рис. 4. Схема нейросетевой структуры для сегментации низкоконтрастного изображения

Предлагаемая гибридная нейронная сеть для решения задачи выделения границ на изображении низкой контрастности с объектами нерегулярной формы является достаточно простой, она не требует алгоритмов обучения и настройки синаптических коэффициентов.

Список литературы

1. Логунова О.С. Системный подход к исследованию информационных потоков в управлении качеством непрерывно-литой заготовки // Проблемы теории и практики управления. – 2008. – № 6. – С. 56 – 62.
2. Logunova O.S. Internal-defect formation and the thermal state of continuous-cast billet // Steel in Translation. – 2008. – Т. 38. – № 10. – С. 849-852.
3. Continuous-casting template defect recognition by means of hybrid neural network / O. A. Azarova, M. V. Zaretsky, O. S. Logunova / Proceeding of the Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2008). – Ufa : Ufa State Aviation Technical University, 2008. – V. 1. – P. 49–50.
4. Замятин Н.В., Якимович Е.А. Фильтрация изображения в задаче распознавания зрительных образов // Нейрокомпьютеры в системах обработки изображений. Кн. 7: монография / общ. ред. А.И. Галушкина. – М. : Радиотехника, 2003. – С. 5–12.

УДК 621.74.047

**Б.Н. Парсункин,
М.С. Галдин, С.А. Шорохов**
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ РАЗЛИВКЕ НА МНЛЗ

Непрерывнолитые заготовки являются основным сырьём для производства проката, и качество заготовок определяет качество готового металлоизделия. Процесс создания современных конкурентоспособных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) требует постоянного совершенствования принимаемых

технических и технологических решений, комплексного решения вопросов конструирования, технологии и качества. Прогресс в области разработки передовых технологий и конструктивных решений в отрасли не возможен без математического моделирования поведения непрерывнолитой заготовки на базе современных средств вычислительной техники.

При использовании теории двухфазной зоны для описания тепловых процессов, протекающих в затвердевающей слитке во время его прохождения МНЛЗ, предполагается, что затвердевание многокомпонентных сплавов происходит в интервале температур ликвидус-солидус с образованием зоны твёрдого жидкого состояния, разделяющей твёрдую и жидкую часть. Поэтому для более полного описания затвердевания сплавов целесообразно применять квазиравновесную модель затвердевания, учитывающую процессы тепломассопереноса, происходящие в области переходной двухфазной зоны.

Для описания процесса затвердевания за основу принимается дифференциальное уравнение энергии с внутренними источниками тепла, особенностью которого для зоны кристаллизации является учёт выделяющейся теплоты кристаллизации [1].

Уравнение энергии при наличии внутренних источников тепла в общем виде запишется как

$$\rho \cdot (Di / d\tau) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}t) + q_V, \quad (1)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³;

$(Di / d\tau)$ – полная производная энтальпии по времени;

λ – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·°C);

t – температура, °C;

q_V – плотность внутренних источников тепла, Вт/м².

При условии неподвижной среды и при постоянных физических свойствах оно запишется в виде:

$$\rho \cdot C \cdot (dt / d\tau) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}t) + q_V, \quad (2)$$

где C – удельная теплоёмкость металла, Дж/(кг·°C).

Для учёта выделяющейся теплоты кристаллизации вводится величина относительного количества твёрдой фазы $\psi = V_{TB} / V_0$, которая по смыслу может рассматриваться как

относительное количество ещё не выделившегося тепла кристаллизации, V_0 и V_{TB} – соответственно объёмы всего расплава и твёрдой фазы; $\psi = 0$ для жидкой фазы, $\psi = 1$ для твёрдой фазы и для двухфазной зоны может изменяться от нуля до единицы [1].

С введением величины ψ для кристаллизующегося слоя величина плотности внутреннего источника тепла

$$q_V = q_{KP} \cdot \rho \cdot (d\psi / d\tau), \quad (3)$$

где q_{KP} – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг;

$d\psi / d\tau$ – скорость затвердевания сплава.

Тогда получим:

$$\rho \cdot C \cdot (dt / d\tau) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}t) + q_{KP} \cdot \rho \cdot (d\psi / d\tau). \quad (4)$$

В соответствии с рекомендациями, представленными в работе [1], для упрощения методики решения задачи затвердевания теплота кристаллизации учитывается при помощи введения эффективной теплоёмкости $C_3(t)$ [Дж/(кг·°C)], для учёта явлений конвективного теплопереноса в жидкой фазе вводится коэффициент эффективной теплопроводности $\lambda_3(t)$ [Вт/(м·°C)].

Также для учёта изменения плотности стали при фазовом переходе вводится понятие эффективной плотности $\rho_3(t)$ [кг/м³], которая определяется следующим образом:

$$\rho_3(t) = \begin{cases} \rho_{ж} & \text{при } t > t_L; \\ \rho_{ж} + (\rho_{тв} - \rho_{ж})(t_L - t) / (t_L - t_C) & \text{при } t_C < t < t_L; \\ \rho_{тв} & \text{при } t_C < t. \end{cases} \quad (5)$$

Выразив значения $C_3(t)$, $\lambda_3(t)$ и $\rho_3(t)$ с учётом соотношения фаз, можно окончательно записать дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho_3(t) \cdot C_3(t) \cdot (dt / d\tau) = \text{div}(\lambda_3(t) \cdot \text{grad}t). \quad (6)$$

Полученная в итоге система уравнений вместе с условиями однозначности представляет собой полную формулировку математической модели процесса затвердевания непрерывного слитка. Решение этой системы позволяет определить температурное поле непрерывного слитка в любой момент времени от начала формирования оболочки слитка на уровне металла в кристаллизаторе и другие параметры, а также исследовать влияние внешних условий на тепловой режим формирования непрерывного слитка.

Эффективность работы МНЛЗ и бездефектность получаемых заготовок в значительной степени зависят от оптимизации управления технологическим процессом и соблюдения заданных режимов процесса. Одной из основных проблем, встречающихся при разливке металла на МНЛЗ радиально-криволинейного типа, считается наличие трещин и ликвационных зон во внутренней структуре металла, а также на поверхности заготовок. Главной причиной появления дефектов в непрерывнолитых заготовках являются термические напряжения.

Поведение тел, находящихся в напряжённом состоянии, зависит как от условий охлаждения, так и от механических и пластических свойств вещества. При исследовании термонапряжений [2, 3] было установлено, что при температуре 500 – 600 °С углеродистая сталь переходит в пластическое состояние, в котором указанные выше напряжения снижаются и рассеиваются. Следовательно, температурные напряжения следует учитывать лишь при температурах, меньших 600 °С.

В соответствии с законом Гука распределение термонапряжений в непрерывнолитой заготовке определяется зависимостью [2]:

$$\sigma = \frac{\beta \cdot E \cdot f\left(\frac{a \cdot \tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right)}{(1 - \nu)} (t_{\text{ноб}} - t(x)), \quad (7)$$

где σ – термонапряжение, МПа; β – коэффициент линейного температурного расширения, (°С)⁻¹; E – модуль упругости данной марки стали, МПа; ν – Пуассоново отношение (для стали $\nu = 0,3$); a – коэффициент температуропроводности стали, мм²/с; x – координата точки, соответствующей толщине корочки твёрдого металла, мм; $t_{\text{ноб}}$ – температура поверхности, °С; $t(x)$ – температура металла в точке x по сечению заготовки,

°С; τ – время охлаждения, с; S – половина толщины (ширины) нагреваемой заготовки, мм; $f\left(\frac{a \cdot \tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right)$ – функция, зависящая от отношений $\frac{a \cdot \tau}{S^2}$ и $\frac{x}{S}$.

Так как термонапряжение прямопропорционально зависит от $(t_{\text{ное}} - t(x))$, то можно сделать вывод, что максимальное термонапряжение будет наблюдаться в сечении с максимальным градиентом $(t_{\text{ное}} - t(x))$. Наибольший перепад температур наблюдается на выходе из кристаллизатора из-за того, что коэффициент теплоотдачи в кристаллизаторе более чем в пять раз превышает значения коэффициентов теплоотдачи в каждой из секций ЗВО, т. е. на протяжении всех зон вторичного охлаждения ребро слитка (как наиболее охлаждаемая часть) начинает нагреваться за счёт тепла центра до температур выше 600 °С, снижая тем самым температурный градиент. Поэтому предлагается производить расчёт суммарных термонапряжений в сечении заготовки, которое соответствует окончанию длины кристаллизатора.

Результирующее температурное напряжение определяется как сумма векторов растягивающих термонапряжений по осям y и z (рис. 1) в точке X с координатами (y', z') :

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_z^2}. \quad (8)$$

Данная точка X соответствует температуре солидус, а координаты y' и z' соответствуют толщине корочки твёрдого металла в осях y и z соответственно.

Рассчитанное суммарное температурное напряжение σ_{Σ} сравнивается с максимально допустимым, определяемым по формуле:

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{\sigma_{\text{нр}}}{\eta_{\text{нч}}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{нр}}$ – предел прочности на растяжение для данной марки стали, МПа; $\eta_{\text{нч}}$ – коэффициент запаса по пределу прочности (принят равным 1,1 по аналогии с работой [3]).

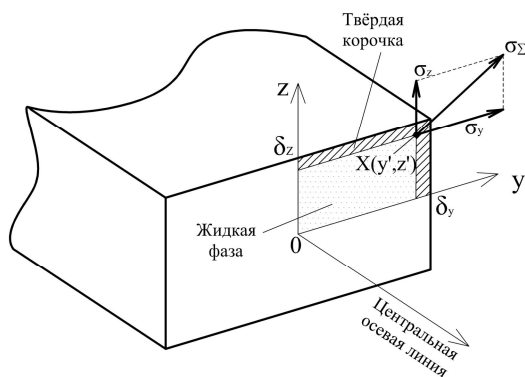


Рис. 1. Расчёт температурного напряжения в заготовке

Для рассматриваемой стали Ст3 были приняты постоянными следующие величины: $\beta = 13,14 \cdot 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$, $E = 2,07 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $a = 6,1 \text{ мм}^2/\text{с}$; $\sigma_{np} = 313,6 \text{ МПа}$, тогда в соответствии с формулой (9) $\sigma_{np} = 285,1 \text{ МПа}$. При расчёте σ_y S из формулы (7) соответствует половине ширины заготовки ($\delta_y = 625 \text{ мм}$), а при расчёте σ_z – половине высоты ($\delta_z = 125 \text{ мм}$).

С использованием разработанной модели произведено моделирование процесса охлаждения непрерывнолитой слябовой заготовки при скорости разливки 0,7 м/мин. При расчёте температурного поля было принято, что МНЛЗ – криволинейного типа с радиальным кристаллизатором. Зона вторичного охлаждения состоит из семи секций, причём в первых двух осуществляется водяное, а начиная с третьей – водовоздушное охлаждение. Также в расчёте учитывался участок воздушного охлаждения от окончания последней зоны до машины газовой резки (МГР). Параметры секций взяты по аналогии с МНЛЗ № 3 кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Разливаемая сталь – Ст3, размеры заготовки: толщина – 250 мм, ширина – 1250 мм.

График изменения расчётных температур изображён на рис. 2. Таким образом, конечная температура центра составила

1192 °С, а разность между температурой центра и ребра $\Delta = 322$ °С.

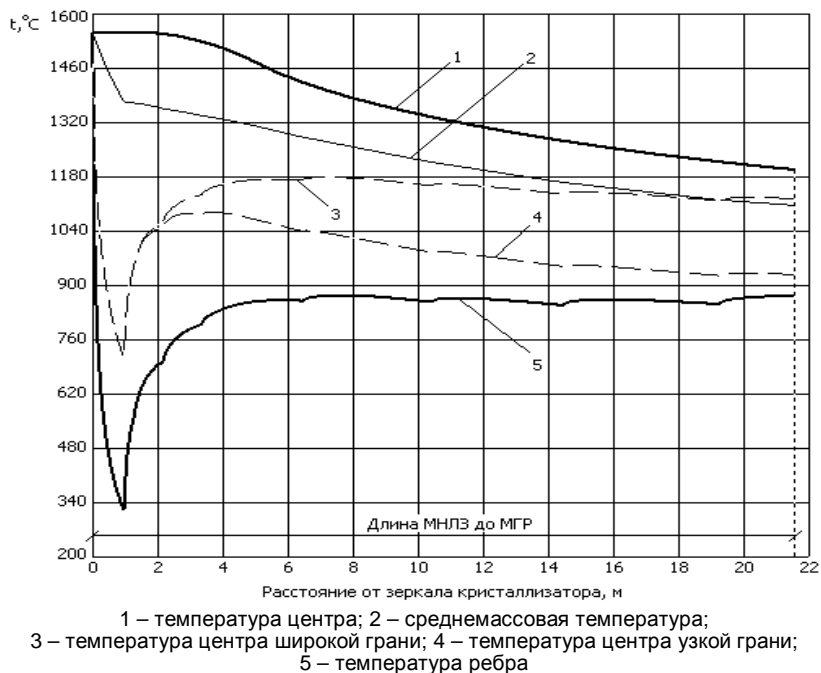


Рис. 2. Изменение температуры вдоль оси МНЛЗ и температурный профиль конечного сечения

На выходе из кристаллизатора толщина корочки по оси y составляет 115 мм, а по оси z – 45 мм; при этом температура поверхности по оси y составляет 329,1 °С, а по оси z – 386,3 °С. Тогда по формуле (7) $\sigma_y = 184,6$ МПа, а $\sigma_z = 148,2$ МПа, тогда по формуле (8) $\sigma_{\Sigma} = 236,7$ МПа. Так как полученное суммарное термонапряжения σ_{Σ} меньше максимального $\sigma_{\Sigma} = 285,1$ МПа, то разрушения корочки не произойдет.

Температурное поле поперечного сечения заготовки перед машиной газовой резки изображено на рис. 3. Данный график нагляден и удобен для отображения температурного поля по сечению. Видно, что в центре заготовка имеет максимальную температуру, а на рёбрах – минимальную.

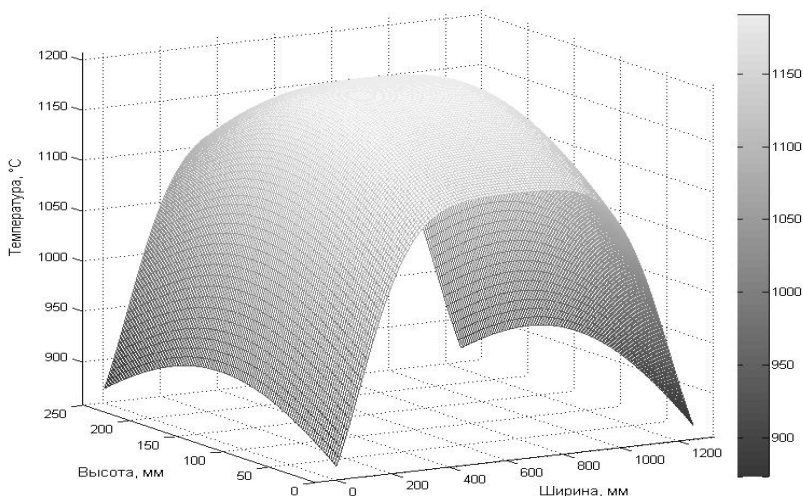


Рисунок 3 – Температурное поле по сечению заготовки перед МГР

Таким образом, разработанная модель описывает тепловое состояние непрерывнолитых заготовок и позволяет выполнять расчёт температур заготовок по всему объёму с учётом движения межфазной границы контроля критических температурных напряжений.

Данная модель предназначена для использования при реализации системы автоматического управления охлаждением заготовок с целью снижения негативного влияния термонапряжений, повышения и стабилизации качества непрерывнолитых заготовок при изменении входных параметров разливки (температуры, химического состава стали, скорости разливки).

Список литературы

1. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. – М.: Metallurgy, 1988. – 143 с.
2. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 557 с.
3. Учёт ограничений по термонапряжению при энергосберегающем нагреве непрерывно литых заготовок / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 4. – С. 58-62.

УДК 519.24

М.Ю. Рябчиков

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

СПОСОБ МНОГОУРОВНЕВОГО ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ОБЛАСТИ РАССЕЯНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Введение

Современные производственные процессы отличаются высокой энергоемкостью и информационной насыщенностью. Технологические датчики производят измерение и контроль не только параметров, напрямую связанных с технологическим процессом, но и параметров, которые обеспечивают функционирование второстепенных систем, в том числе систем безопасности и безаварийности.

Автоматизация процесса сбора и хранения данных позволяет создавать сложные модели технологических процессов. В качестве основы для создания таких моделей хорошо зарекомендовали себя искусственные нейронные сети (ИНС). Модели с их применением позволяют в ряде случаев отказаться от использования детерминированных моделей.

Расчеты с использованием современных пакетов комплексного моделирования, таких как FlowVision [1], позволяют

получить достоверные и точные модели, однако их использование требует значительных временных затрат, так как они основаны на использовании конечно-объемного подхода для аппроксимации уравнений математической модели и численных решений. Подобные детерминированные модели могут служить наряду с данными реального процесса основой для создания ИНС, расчеты по которым производятся быстро и которые удобно применять при решении разного рода задач оптимального управления.

Несмотря на теоретическую возможность создания подобных статистических моделей, практическое решение задачи их построения осложняется рядом факторов.

В установившихся режимах технологического процесса объем информации, поступающий с объекта, как правило, избыточен. Возникает ситуация, когда существуют большие массивы информации о ходе технологического процесса в каком-то одном установившемся режиме и значения технологических параметров изменяются в очень узком диапазоне, а информация о характере процессов в других режимах составляет очень небольшую долю.

Отсутствие данных приводит к тому, что созданные модели могут быть не точны при попытках прогноза отдельных режимов работы объекта, данных по которым мало относительно других режимов. Экстраполяция с помощью ИНС моделей также может привести к ошибочному результату, так как по мере удаления от области рассеяния исходных данных результаты работы ИНС, как правило, заметно ухудшаются.

В работе [2] для экстраполяции предлагается динамически дополнять выборку данными и доучивать или перенастраивать ИНС, постепенно увеличивая пределы прогноза. Ошибка в таком случае будет нарастать постепенно на каждом этапе дополнения выборки новыми данными. Учитывая незначительные пределы отдельного прогноза, при котором сохраняется высокая точность, для решения отдельных задач может потребоваться много этапов по модификации выборки и донастройке ИНС, снижая эффективность такого решения.

В то же время, может возникнуть ситуация, когда есть неполная информация о поведении объекта моделирования в области за пределами рассеяния исходных данных. Часто в таких случаях выборку дополняют результатами расчетов, заполняя интервалы с низкой плотностью данных.

В этой работе ставится задача показать, что в таких ситуациях в ряде случаев возможно создание модели без дополнения выборки расчетными данными.

Предлагаемый способ создания модели

Для создания системы моделирования, способной к проведению расчетов за пределами области рассеяния исходных данных, предлагается использовать многоуровневое построение ИНС модели, показанное на рис. 1.

Значение выходного прогнозируемого параметра определяется как

$$y = (y^1)^a, \quad (1)$$

где y - прогнозируемый выходной параметр; y^1 - результат расчета выходного параметра по ИНС1; a - результат расчета ИНС2.

Принцип работы способа заключается в осознанном увеличении регрессионных остатков ИНС1 за счет уменьшения размеров ИНС1 и длительности процесса ее обучения. Полученные остатки представляются в логарифмической форме и ИНС2 обучается их прогнозу:

$$a = \log_{y^1}(y) \cdot \quad (2)$$

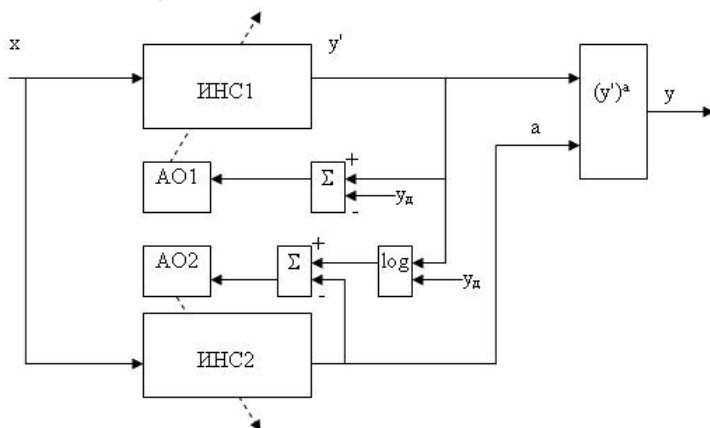


Рис 1. Структура модели из ИНС1 и ИНС2

Применение логарифма позволяет снизить уровень необходимого для решения задачи экстраполяции выброса выходно-

го сигнала за область исходных данных и дать прогноз по области, значительно удаленной от данных исходной выборки.

В качестве первого примера рассмотрим задачу прогнозирования значения функции $y = 2x^2$. Создана обучающая выборка размером в 100 наборов. Параметр x распределен по нормальному закону, плотность распределения которого показана на рис. 2.

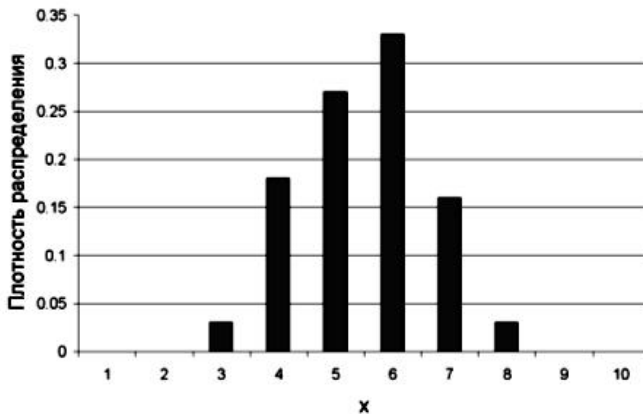


Рис. 2. Функция плотности распределения x

Рассмотрим результаты настройки обычных ИНС моделей различной структуры по созданной обучающей выборке. Обучение проводилось с избыточным для подобной модели числом эпох, равным 10 тыс. При обучении использовался пакетный способ обработки экземпляров выборки с динамической коррекцией скорости обучения [3]. Функция активации – гиперболический тангенс.

В табл. 1 показаны результаты тестирования ИНС при равномерном распределении данных для теста на различных интервалах. Рассмотрены результаты для ИНС без скрытых слоев (x - y), с одним нейроном в единственном скрытом слое (x -1- y) и т.д. Приведено значение средней ошибки – MAE, среднеквадратичной ошибки – MSE и максимальной ошибки – MAX.

Таблица 1

ИНС	Пределы изменения X в тестовой выборке								
	$x \in [3;7]$			$x \in [0;10]$			$x \in [0;20]$		
	MAE	MSE	MAX	MAE	MSE	MAX	MAE	MSE	MAX
$x-y$	1.95	5.44	5.36	14.94	432.8	45.53	108.9	30934	463.4
$x-1-y$	0.67	0.65	1.85	6.21	84.0	27.02	103.1	33064	503.8
$x-10-y$	1.79	4.60	4.92	13.79	369.6	43.94	111.7	33593	489.2
$x-10-5-y$	0.60	0.519	1.69	5.32	58.14	19.2	81.0	21022	415
$x-20-10-5-y$	0.096	0.012	0.21	2.23	17.54	16.17	98.0	32749	511

Пределы масштабирования входных и выходных сигналов ИНС были установлены согласно пределам изменения аргумента при проведении прогноза, т.е.:

$$X \in [-0.9; 0.9] \text{ при } x \in [0; 20], Y \in [-0.9; 0.9] \text{ при } y \in [0; 800],$$

где X, Y - масштабированные значения входа и выхода ИНС.

Верхний предел Y получен как: $2x^2 = 2 \cdot 20^2 = 800$.

Из табл. 1 видно, что с задачей аппроксимации функции $y = 2x^2$ может справиться ИНС без скрытых слоев ($x-y$). С увеличением пределов изменения аргумента x в тестовой выборке у всех ИНС снижается точность прогноза, несмотря на то, что пределы масштабирования y заданы точно в соответствии с функцией $y = 2x^2$.

График изменения y для части тестовой выборки при $x \in [0; 20]$ показан на рис. 3. Из графика видно, что по мере удаления от области исходных данных ошибка нарастает.

Рассмотрим результаты настройки и тестирования системы, состоящей из ИНС1 и ИНС2, соединенных согласно схеме на рис. 1.

$$X \in [-0.9; 0.9] \text{ при } x \in [0; 20],$$

$$Y \in [-0.9; 0.9] \text{ при } y \in [y_{\min} - k(y_{\max} - y_{\min}); y_{\max} + k(y_{\max} - y_{\min})],$$

где X, Y - масштабированные значения входа и выхода ИНС; y_{\max}, y_{\min} - максимальное и минимальное значение y по обучающей выборке; k - коэффициент, значение которого задается приближенно, исходя из предполагаемого выхода x и y за об-

ласть данных обучающей выборки, а также исходя из наличия предварительной информации о характере зависимости.

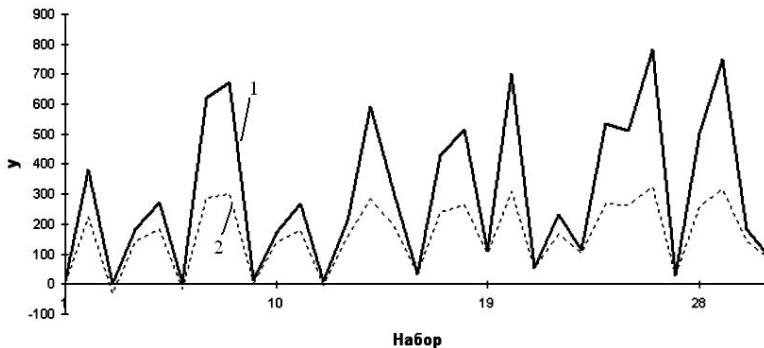


Рис 3. Результаты теста ИНС1 структуры x - y по тестовой выборке при $x \in [0;20]$: 1 – желаемое значение y ; 2 – выход ИНС

Для увеличения регрессионных остатков ИНС1 (вида x - y) обучение было сокращено до 5 эпох. Коэффициент $k = 8$, что достаточно точно соответствует необходимому уровню выходного сигнала ИНС2 для решения задачи расчета y при $x \in [0;20]$.

Результаты настройки ИНС1 показаны на рис. 4.

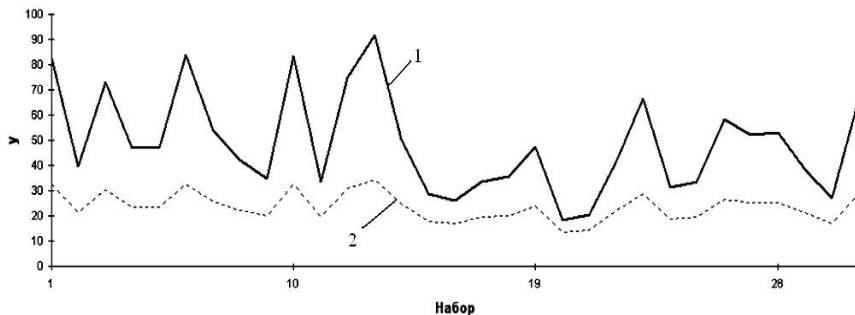


Рис. 4. Результаты теста ИНС1 на части обучающего множества: 1 – значение y в обучающей выборке; 2 – выход ИНС

Результаты тестирования ИНС1 на обучающем множестве наборов показывают высокий коэффициент корреляции 0.989 одновременно с появлением существенных регрессионных остатков.

С использованием результатов теста по обучающей выборке ИНС1, обработанных с применением (2), формируется выборка для настройки ИНС2, которая, так же как и ИНС1, не содержит скрытых слоев, т.е. имеет структуру x-y. При обучении в 10 тыс. эпох ошибка обучения снижена до минимума. Пределы масштабирования входного сигнала ИНС2 установлены аналогично ИНС1. Пределы масштабирования выходного сигнала ИНС2 определены следующим образом:

$Y \in [-0.9; 0.9]$ при $y \in [a_{\min} - k(a_{\max} - a_{\min}); a_{\max} + k(a_{\max} - a_{\min})]$,
 где Y - масштабированные значения выхода ИНС2; a_{\min} , a_{\max} - минимальное и максимальное значение a , полученное по обучающей выборке с учетом расчета по ИНС1.

В табл. 2 показаны результаты тестирования системы на рис.1.

Точность расчетов для системы из ИНС1 и ИНС2 при $x \in [0; 20]$ выросла по сравнению с отдельной ИНС, но остается относительно невысокой.

Таблица 2

Вид ИНС1 и ИНС2, k	Пределы изменения x								
	$x \in [3; 7]$			$x \in [0; 10]$			$x \in [0; 20]$		
	MAE	MSE	MAX	MAE	MSE	MAX	MAE	MSE	MAX
ИНС1: x-y, k = 8 ИНС2: x-y, k = 4	1.126	2.451	4.631	4.142	57.508	21.907	14.373	519.41	74.225

Однако возможно и дальнейшее повышение точности системы расчета y за счет масштабирования предложенной на рис.1 схемы. Для этого точность настройки ИНС2 должна быть

снижена до появления регрессионных остатков, для расчета логарифма которых добавляется ИНС3.

Срок обучения ИНС2 был снижен до 10 эпох. Результаты тестирования на обучающем множестве показаны на рис. 5.

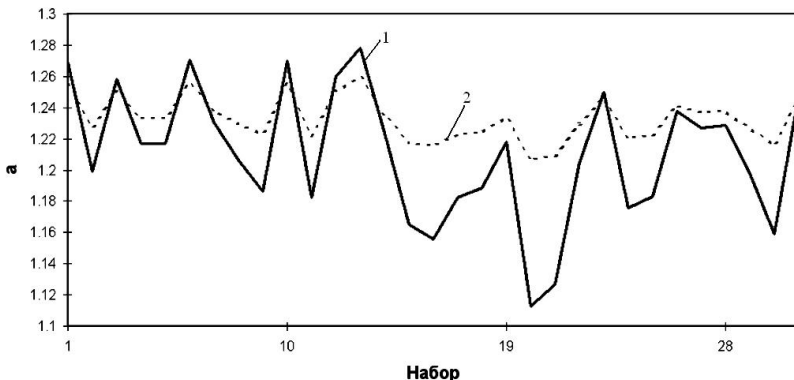


Рис. 5. Результаты теста ИНС2 на части обучающего множества. 1 – значение a в обучающей выборке; 2 – выход ИНС2

Полученная система показана на рис.6. ИНС3 представляет собой сеть вида $x-5-y$, которая настраивалась 10 тыс. эпох. На вход подается значение x , а выходом является $\log_{a'}(a)$.

В таблице 3 показаны результаты тестирования системы на рис.6.

Таблица 3

Система из ИНС1, ИНС2, ИНС3	Пределы изменения x								
	$x \in [3;7]$			$x \in [0;10]$			$x \in [0;20]$		
	MAE	MSE	MAX	MAE	MSE	MAX	MAE	MSE	MAX
ИНС1,2: $x-y$ ИНС3: $x-5-y, k = 1$	0.055	0.008	0.351	0.614	1.205	3.315	2.56	16.45	12.82

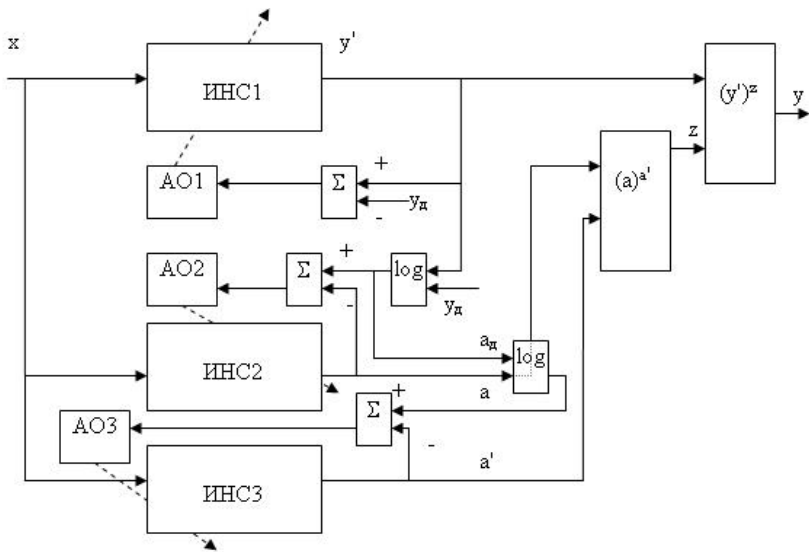


Рис 6. Структура модели из ИНС1 и ИНС2

Полученная система из ИНС1, ИНС2 и ИНС3 достаточно точно воспроизводит функцию $y = 2x^2$ на интервале $x \in [0;20]$ при обучении на данных $x \in [3;8]$.

В качестве второго примера рассмотрим задачу моделирования с помощью ИНС функции $y = x_1^{0.4} + x_2^{0.6}$. Параметры плотности распределения x_1 и x_2 аналогичны первому примеру, x_1 и x_2 – независимые параметры.

При настройке использовались два варианта расчета логарифма. Первый по (2), второй по обратной формуле:

$$a = \log_y(y^a). \quad (3)$$

Результаты тестирования для систем вида рис. 1 и 6, а также для обычной ИНС (с соответствующим прогнозу масштабированием входных и выходных сигналов) показаны в табл. 4.

Таблица 4

Система моделирования	$x \in [0;20]$		
	MAE	MSE	MAX
ИНС	1,054	1,558	2,44
ИНС1, ИНС2 – по (2)	0,723	0,782	1,839
ИНС1, ИНС2 – по (3)	0,659	0,649	1,695
ИНС1, ИНС2 – по (3), ИНС3 – по (3)	0,181	0,072	0,761

Из табл. 4 видно, что из систем вида ИНС1, ИНС2 лучше с задачей расчета справляется вариант с расчетом логарифма по формуле (3), что, предположительно, характерно для функций вида $y = x^b$ при $b < 1$.

На рис. 7 показаны результаты теста системы из ИНС1, ИНС2 и ИНС3 для части тестовой выборки.

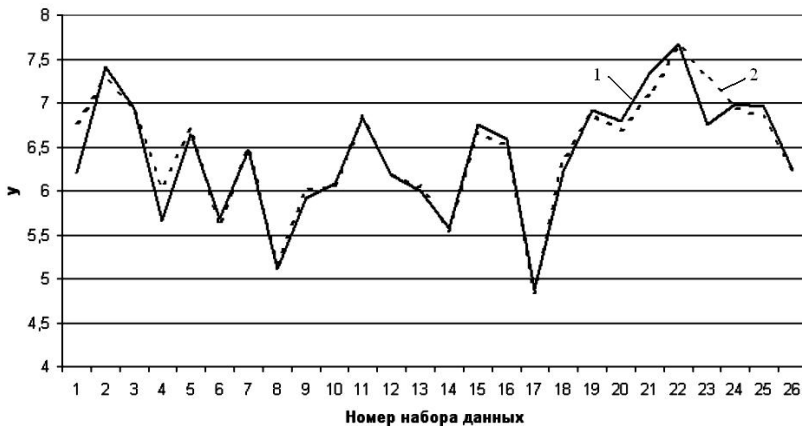


Рис. 7. Результаты теста системы из ИНС1, ИНС2 и ИНС3 при $x_1, x_2 \in [0;20]$: 1 – желаемое значение y ; 2 – выход ИНС

Следует отметить, что с увеличением необходимой сложности модели процесс настройки ИНС3 существенно затрудняется. Если для модели функции $y = 2x^2$ достаточно 10 тыс. эпох обучения, то для модели $y = x_1^{0.4} + x_2^{0.6}$ потребовалось несколько циклов обучения по 30 тыс. эпох.

Кроме того, с увеличением необходимой сложности модели успешное получение “недообученной” ИНС1 с высоким коэффициентом корреляции и существенными регрессионными остатками носит вероятностный характер. То есть для ее получения, возможно, придется повторить процесс настройки несколько раз.

Заключение

Предложенный способ позволяет создавать модели, способные давать достаточно точные результаты при значительном выходе за область рассеяния исходных данных в том случае, если есть дополнительная информация о пределах изменения выходного параметра в области изменения входных параметров при последующем использовании модели. Такого рода информация может быть получена, например, с помощью детерминированных моделей.

Список литературы

1. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. <http://www.thesis.com.ru/software/flowvision/>
2. Максимова О.М. Использование нейросетевых технологий для повышения точности в задачах экстраполяции и интерполяции // Научная сессия МИФИ-2004. 6 Всероссийская научно-техническая конференция. Ч.1 Нейроинформатика-2004. Теория нейронных сетей. Т 1. Нейробиология. Применение нейронных сетей: сб.тр. – М., 2004. – С. 190-200.
3. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Рябчиков М.Ю. Алгоритм обучения искусственных нейронных сетей на примере создания имитационной модели работы доменного воздухонагревателя // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: межвуз. сб.тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. Вып. 4. – С. 181-187.

М.Ю. Рябчиков, С.Н. Рахманов, А.А. Беляков
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАГРЕВА ПОЛОСЫ В ПРОТЯЖНОЙ ПЕЧИ БАШЕННОГО ТИПА АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ОЦИНКОВАНИЯ

В современных условиях практически на любом крупном производстве востребованы модели используемых технологических процессов. Значительную часть продуктов, использующих такие модели, составляют системы обучения персонала предприятия; системы управления технологическими процессами; системы выявления дефектов и прогнозирования высокой вероятности их возникновения.

Современные сложные агрегаты и процессы металлургического производства отличаются высокой энергоемкостью и информационной насыщенностью. Технологические датчики производят измерение и контроль не только параметров, напрямую связанных с технологическим процессом, но и параметров, которые обеспечивают функционирование второстепенных систем, в том числе систем безопасности и обеспечения безаварийности.

Как правило, период опроса датчиков технологического процесса выбирается достаточно малым, чтобы иметь возможность оценить ход процесса при действии разного рода возмущений. В установившихся режимах технологического процесса объем информации, поступающей с агрегата, как правило, избыточен. Поэтому такие базы данных технологических параметров из-за своих объемов часто имеют ограниченный срок хранения.

В то же время развитие технологий сбора и хранения технологической информации наряду с развитием вычислительной техники позволяет без значительных материально-технических затрат уже сейчас поддерживать базы данных, хранящие значительные объемы информации о работе технологических агрегатов. Если 5-10 лет назад подобные объемы данных можно было получить в основном в финансовой сфере, то сейчас собранная

информация дает надежду на надежное статистическое описание технологических процессов в пространстве десятков измерений.

Так, в цехе покрытий металлургического гиганта ОАО «ММК» ведется база данных значений основных и вспомогательных технологических параметров работы агрегата непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ). За последние два года собрана информация объемом порядка 10 млн. записей по более чем 300 параметрам, характеризующим работу указанного агрегата.

В ходе создания имитационной обучающей модели системы управления АНГЦ возникли проблемы, связанные с созданием математического описания процесса нагрева полосы в башенной печи АНГЦ и, учитывая значительный объем накопленной информации, было принято решение о создании статистической модели нагрева.

Визуальная часть обучающей системы содержит копию экрана системы диспетчерского управления (SCADA Intouch), в которой работает оператор, управляющий этим процессом, содержит мнемосхему и элементы диалога – интерфейса взаимодействия системы управления и контроля с оператором.

Цели создания моделей, необходимых для успешного функционирования обучающей системы, и задачи, решаемые с их применением, определяются технологией процесса и возможностями в области контроля и управления, предоставляемыми SCADA системой оператору.

Рабочее пространство протяжной печи башенного типа разбито на семь зон, каждая из которых включает по 23 радиантных трубы отапливаемых природным газом. Основным технологический параметр – температура поверхности полосы контролируется оптическим пирометром на выходе отделения нагрева.

Весь сортамент обрабатываемых марок стали разбит на 5 групп, для которых скорость нагрева до температуры выдержки (от 720 до 840 °С) различна.

Система управления нагревом полосы, как правило, работающая в режиме дистанционного управления, предусматривает поддержание требуемой температуры рабочего пространства в каждой зоне путем изменения расхода воздуха в горелки радиантных труб инжекционного типа (рис. 1).

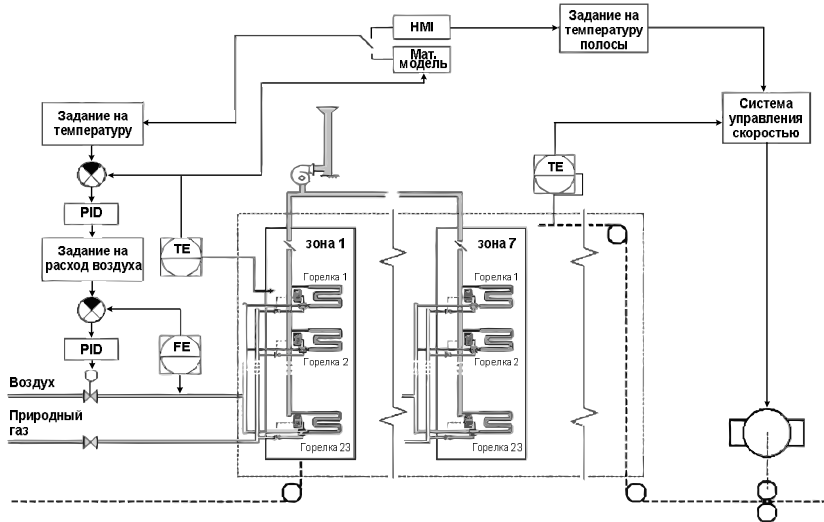


Рис. 1. Структурная схема системы управления процессом нагрева

Расположение зон в рабочем пространстве носит сложный непоследовательный характер, и за время прохождения через отделение нагрева полоса многократно поступает в одни и те же зоны (рис. 2).

В каждой зоне контролируется пять температур. Управление тепловым режимом в зоне ведется по данным двух зональных термопар ($t_{\text{Зона}}^1$ и $t_{\text{Зона}}^2$), установленных поблизости друг от друга в отмеченных на рис. 2 местах. Также в каждой зоне контролируется температура первой и последней трубы ($t_{\text{Зона}}^{\text{last}}$, $t_{\text{Зона}}^{\text{first}}$), а также температуры отходящих дымовых газов ($t_{\text{Зона}}^{\text{WG}}$).

Всего с работой отделения нагрева связано 142 параметра, которые характеризуют температурный, скоростной, топливный режим работы, а также состояние защитной атмосферы и закодированные в слова-состояния (16 бит) статусы включения горелок. Указанные параметры охватывают все значимые аспекты работы отделения нагрева и могут использоваться в задачах моделирования.

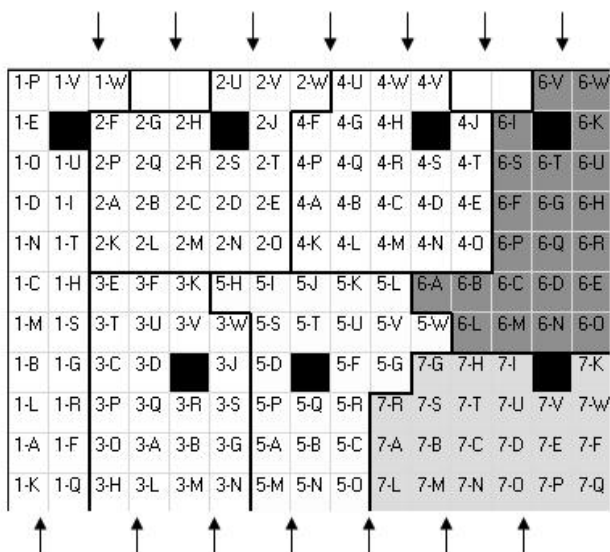


Рис. 2. Расположение зон в рабочем пространстве отделения нагрева. Черным отмечены места установки зональных термостатов

Структурирование модельной среды обучающей системы целесообразно провести исходя из особенностей существующей многоуровневой системы управления работой агрегата. Можно выделить следующие отдельные задачи:

- расчет температур в рабочем пространстве каждой зоны отделения нагрева;
- расчет температуры полосы на выходе отделения нагрева;
- моделирование работы системы управления тепловым режимом и схемами включения горелок.

В ходе уточнения задач, связанных с обучением, было установлено, что наиболее критичными для оператора являются навыки управления температурой полосы на выходе отделения нагрева путем выбора заданных значений температур в каждой зоне и обеспечения рационального скоростного режима обработки полосы.

Нарушение технологических пределов нагрева полосы может привести к возникновению дефектов. Так, за первое полугодие 2009 года доля некондиционных рулонов составила 7.3 %. Распределение некондиционной продукции по типам дефектов,

предположительно не связанных с механической обработкой полосы, показано на рис. 3.

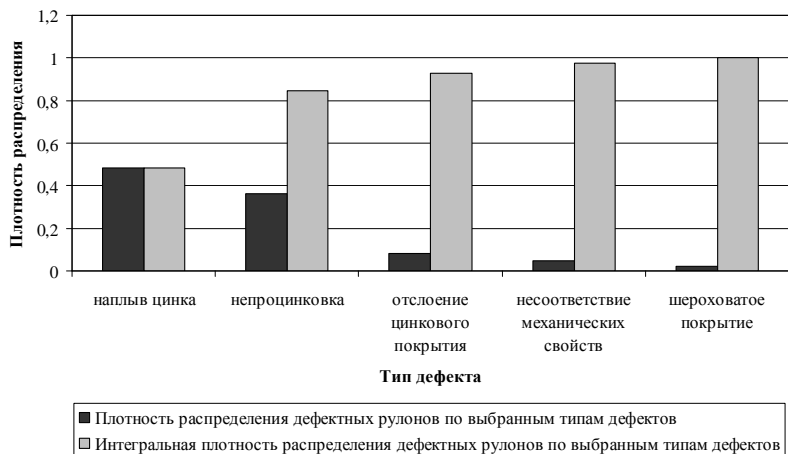


Рис. 3. Распределение некондиционной продукции по выбранным для анализа типам дефектов

Проведенный анализ показал, что порядка 82% всех дефектов связаны с нарушением условий оцинковки, а наиболее значимым фактором при появлении дефектов является недостаточный нагрев полосы.

Были определены параметры плотности распределения для рулонов с дефектами и без дефектов от минимальной за время обработки рулона температуры полосы на выходе отделения нагрева (рис. 4).

Для 49% рулонов с дефектами характерно снижение температуры полосы на выходе отделения нагрева ниже 700 °С. Это характерно и для 23% недефектных рулонов, что, как было установлено, вызвано последующим нагревом в отделении выдержки.

Таким образом, основной задачей при создании обучающей системы является достоверное представление процессов, связанных с нагревом полосы.

Локальные контуры управления температурой каждой зоны отделения нагрева эффективно работают в автоматическом режиме и не требуют частого вмешательства оператора. Их мо-

дели не требуют высокого уровня правдоподобия и могут быть реализованы в упрощенной форме.

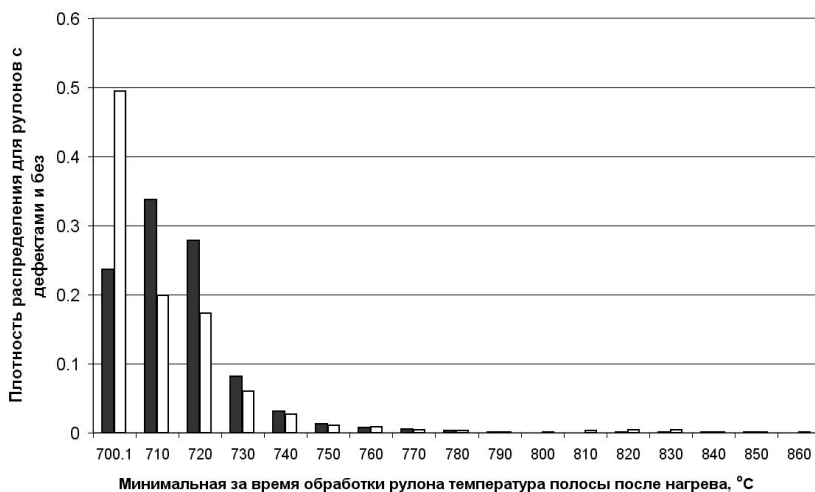


Рис. 4. Плотности распределения дефектных (светлый) и недефектных (темный) рулонов от минимальной за время обработки рулона температуры полосы на выходе отделения нагрева

Очевидными важнейшими факторами, влияющими на нагрев полосы, являются: температурное состояние отделения нагрева, скорость и толщина полосы.

В табл. 1 выборочно показаны результаты ранговой корреляции между факторами и выходным параметром – температурой нагрева полосы на выходе отделения нагрева.

Таблица 1

R	Параметр	R	Параметр	R	Параметр
0,582	$t_{Зона(6)}^{first}$	0,283	$t_{Зона(4)}^{first}$	0,169	$t_{Зона(2)}^{WGT}$
0,560	$t_{Зона(4)}^2$	0,280	Номер месяца	0,161	Точка росы (низ)
0,524	$t_{Зона(4)}^1$	0,277	$t_{Зона(7)}^{last}$	0,153	$t_{Зона(4)}^{WGT}$
0,494	$t_{Зона(7)}^1$	0,271	$t_{Зона(5)}^{first}$	0,128	$t_{Зона(6)}^{last}$

Окончание таблицы 1

R	Параметр	R	Параметр	R	Параметр
0,474	$t_{Зона(6)}^2$	0,267	$t_{Зона(2)}^{last}$	0,125	H ₂ (низ)
0,438	$t_{Зона(5)}^1$	0,242	Δ Скорость 2	0,118	H ₂ (верх)
0,435	$t_{Зона(5)}^{last}$	0,239	$t_{Зона(5)}^{WGT}$	-0,109	$t_{Зона(3)}^{last}$
0,418	$t_{Зона(5)}^2$	0,205	$t_{Зона(4)}^{last}$	0,105	$t_{Зона(2)}^{first}$
0,384	$t_{Зона(2)}^2$	0,202	$t_{Зона(3)}^1$	0,098	$t_{Зона(6)}^1$
-0,373	Скорость	0,192	Толщина	-0,095	$t_{Зона(7)}^2$
0,348	$t_{Зона(2)}^1$	0,183	$t_{Зона(3)}^{WGT}$	0,072	Точка росы (верх)
0,326	$t_{Зона(3)}^2$	0,179	$t_{Зона(6)}^{WGT}$	0,036	$t_{Зона(7)}^{WGT}$
0,296	$t_{Зона(3)}^{first}$	0,173	Время нагрева		
0,283	$t_{Зона(7)}^{first}$	0,170	Δ Скорость 1		

Здесь: Номер месяца – сквозной, начиная с момента сбора данных, номер месяца; Время нагрева – время пребывания сегмента полосы в отделении нагрева; Δ Скорость 1 – рассчитывается как разница между текущей скоростью и средней за 75 с скоростью; Δ Скорость 2 – рассчитывается как разница между текущей скоростью и средней за 150 с скоростью; H₂ – содержание водорода в защитной атмосфере.

Аномальным, исходя из данных табл. 1, является низкая корреляция по параметрам $t_{Зона(6)}^1$ и $t_{Зона(7)}^2$. При последующей проверке выяснилось, что данные точки контроля температуры практически все время эксплуатации неисправны и дают неверные показания.

Достаточно интересным является относительно высокое значение корреляции параметра [Номер месяца], что по первоначальным предположениям могло быть связано с перенастройкой или изменением пределов масштабирования данных с пирометра, контролирующего температуру нагрева полосы. Однако в дальнейшем данное предположение не подтвердилось, так как включение данного параметра в модели не позволило значимо увеличить долю объясненной дисперсии. Вероятно, корре-

ляция связана с периодическим изменением долей различной продукции в общем производстве.

Относительно низкое и аномально направленное значение корреляции с толщиной полосы объясняется большей долей толстых полос, обрабатываемых при высоких температурах.

Толщина взаимосвязана со скоростью обработки полосы ($R = -0,335$). Это объяснимо, так как для поддержания баланса притока и оттока тепла в течение продолжительного времени необходимо снижать скорость для толстых полос и по возможности увеличивать для тонких. Невыполнение этого условия может привести к тому, что даже при максимальном расходе топлива на нагрев температуры в зонах и соответственно температура полосы начнут снижаться. Принятая область изменения скоростного режима для полос с различной толщиной и шириной для условий АНГЦ ОАО «ММК» показана на рис. 5.

Несмотря на то, что в продолжительной перспективе процесс должен находиться в границах рабочей зоны, нередко возникают ситуации, когда кратковременно тонкие полосы обрабатываются при низких скоростях, а толстые при высоких. Учитывая, что при максимальной скорости обработки 180 м/мин время нахождения металла в печи составляет порядка 90 с, диапазон, в котором возможно функционирование модели, предположительно будет шире отмеченной на рис. 5 рабочей зоны.

Так как время нахождения металла в мочи мало по сравнению с постоянными времени, характеризующими инерцию нагрева, то при создании модели решено пренебречь динамикой изменения температурных параметров в зонах.

В то же время любые изменения скорости, которые происходят особенно часто за пределами рабочей зоны, могут приводить к значимым и быстрым изменениям температуры полосы на выходе отделения. По результатам анализа данных процесса такое изменение может достигать 30-40 °С.

Для эффективного использования данных вне рабочей зоны, предотвращения их вынужденной фильтрации при непостоянстве скоростного режима, данные были дополнены расчетными показателями средней по времени скорости за период 75 и 150 с.

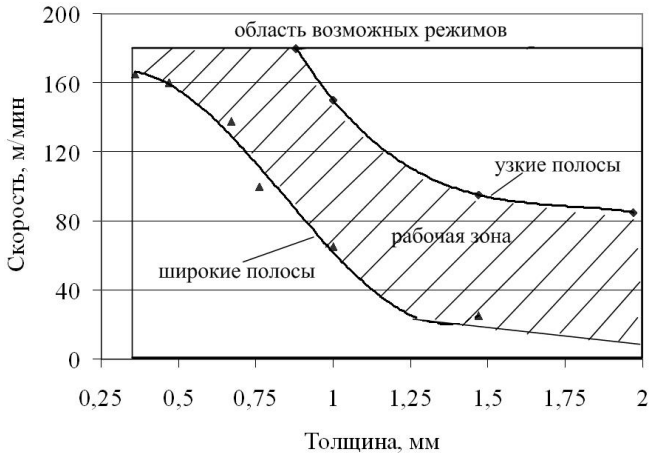


Рис. 5. Скоростной режим для полос с различной толщиной и шириной

Значения представленных в табл. 1 параметров распределены неравномерно. Часто на производстве возникает ситуация, когда существуют большие массивы информации о ходе технологического процесса в каком-то одном установившемся режиме, и значения технологических параметров изменяются в очень узком диапазоне, а информация о переходных процессах в других режимах составляет очень небольшую долю. Рассматриваемый технологический процесс не является исключением.

Построенный на таких данных классификатор может оказаться абсолютно неэффективным, например, вследствие сильно выраженной гетероскедастичности.

Одним из методов, позволяющих в таких условиях сформировать ограниченную по размеру выборку для последующего создания модели, является применимый в рамках решаемой задачи стратифицированный сэмплинг, при котором генеральная совокупность сначала делится на подгруппы, а затем элементы случайным образом выбираются из каждой группы.

Однако при значительном числе измерений число групп становится слишком велико и приходится жертвовать числом интервалов разбиения диапазона изменения всех или ряда факторов. В свою очередь, малое число диапазонов разбиения снижает эффективность стратифицированного сэмплинга.

Для решения задачи сэмплирования, а также для последующего оперативного получения однофакторных условных

распределений ограничивающих действия обучающего на модели сотрудника областью доступных режимов, была поставлена задача создания модели совместной плотности распределения данных процесса по восьми параметрам (табл. 2):

Таблица 2

N	Параметр	N	Параметр
1	Скорость	5	t_7
2	Δ Скорость 1	6	$t_7 - t_6$
3	Δ Скорость 2	7	$(t_6 + t_7) / 2 - (t_4 + t_5) / 2$
4	Толщина	8	$(t_4 + t_5) / 2 - (t_2 + t_3) / 2$

Здесь: $t_7 = t_{\text{Зона}(7)}^1$; $t_6 = t_{\text{Зона}(6)}^2$; $t_5 = (t_{\text{Зона}(5)}^1 + t_{\text{Зона}(5)}^2) / 2$;

$t_4 = (t_{\text{Зона}(4)}^1 + t_{\text{Зона}(4)}^2) / 2$; $t_3 = (t_{\text{Зона}(3)}^1 + t_{\text{Зона}(3)}^2) / 2$.

Так как нет необходимости в решении обратных задач, связанных с поиском значений факторов, при которых наиболее вероятной температурой полосы будет заданная, выходной параметр не участвовал в качестве параметра функции плотности распределения.

Для каждого параметра было принято 6 интервалов разбиения диапазона изменения. Параметры «толщина», «скорость» и «температура t_7 » представлены собственными значениями. Остальные величины представляют собой различные приращения. Приятная форма представления параметров должна по возможности сократить число пустых незаполненных интервалов при подсчете плотности за счет соответствия технологии, так как для протяжной башенной печи перепады температур между отдельными ее зонами достаточно ограничены.

В процессе расчета числа наборов, попавших в различные интервалы, получено, что все данные разместились на 38 979 комбинациях интервалов. При этом 1 640 637 комбинаций интервалов не содержат наборов, то есть заполненными оказались 2,4 % общего числа ячеек массива данных восьмимерного гиперкуба.

Полученный многомерный массив данных может использоваться в качестве модели совместной плотности в задачах

сэмплирования, но не позволяет создать статистический классификатор плотности распределения, который может быть полезен при ограничении действий обучающего на модели сотрудника в силу двух причин:

- 1) низкая доля интервалов, содержащих не нулевые данные плотности;
- 2) значительные пиковые значения в отдельных элементах массива.

Для устранения несбалансированности классов [есть данные] / [нет данных] был произведен поиск пустых комбинаций интервалов различных возможных гиперкубов более низкой размерности факторного пространства.

Например, при восьми факторах можно выделить 28 различных комбинаций по 2 фактора. Для каждой комбинации двух факторов имеется $6 \cdot 6 = 36$ комбинаций диапазонов, что дает в общем 1008 комбинаций факторов-диапазонов. Из них не заполнены данными 17 комбинаций (1,68 %). Удаление из восьмимерного массива элементов, которые образуют найденные проекции, позволяет удалить 585360 (36 %) пустых интервалов.

Если дополнительно принять ограничение, что комбинация диапазонов двух факторов не может содержать менее 500 наборов, то будет удалено 1275652 (77,8 %) пустых и 2600 (6,7 %) заполненных интервалов.

Хранение информации только по заполненным интервалам эффективно с точки зрения затрат памяти, но требует реализации дополнительных временнзатратных поисковых процедур для определения допустимости использования той или иной комбинации значений факторов табл. 2 или применения специализированных технологий обработки и представления многомерных массивов информации.

Было получено, что для баланса классов [есть данные] / [нет данных] без потери заполненных интервалов можно использовать отсеивание проекций пустых диапазонов комбинаций пяти факторов. Соотношение непустых комбинаций интервалов к пустым при этом составляет 1,57 (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что уже при отбраковке пустых интервалов комбинаций трех и четырех факторов можно добиться баланса классов выборки модели совместной плотности распределения данных, хотя и при некоторых потерях информации о полезных интервалах.

Таблица 3

Число факторов в комбинации	Минимум данных на комбинации факторов-измерений	Удалено полезных комбинаций, %	Сохранено пустых комбинаций, %	Отношение числа полезных к пустым	Относительные затраты памяти, %
2	0	0,00	64,32	0,04	0,061
2	500	6,67	22,25	0,10	
2	1000	16,56	13,57	0,15	
2	2500	41,93	4,17	0,33	
2	5000	63,14	1,29	0,68	
2	10000	86,46	0,15	2,14	
3	0	0,00	27,14	0,09	0,737
3	50	8,61	9,40	0,23	
3	100	18,24	5,38	0,36	
3	250	38,35	2,23	0,66	
3	500	58,27	0,70	1,42	
4	0	0,00	6,63	0,36	5,530
4	10	13,11	3,13	0,66	
4	25	27,25	1,61	1,07	
4	50	42,88	0,77	1,76	
4	100	60,54	0,28	3,34	
5	0	0,00	1,51	1,57	25,926
5	5	24,68	0,67	2,67	
5	10	38,60	0,38	3,88	
6	0	0,00	0,28	8,58	79,626
7	0	0,00	0,03	91,72	$136,501 = 8 \cdot (6^7) / (6^8)$

Для ликвидации в выборке значительных пиковых значений совместной плотности было проведено ее логарифмирование.

По результатам отсеивания проекций пустых диапазонов комбинаций пяти факторов была создана модель на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) расчета логарифма совместной плотности распределения факторов табл. 2. Модель име-

ет восемь входов, которыми являются порядковые номера диапазонов по каждому фактору.

При проектировании структуры многослойной ИНС производилась многократная ее настройка при случайно отобранных для теста выборках. Наилучшие результаты при равенстве ошибок обучения и обобщения позволили создать ИНС, обеспечивающую при расчете логарифма плотности распределения коэффициент корреляции 0,86.

Таким образом, созданы фактически две модели совместной плотности, первая из которых представляет восьмимерный массив $M_{i,j..n}$ с данными, который удобно использовать для решения задач сэмплирования, но который из-за больших объемов занимаемой памяти неэффективен при работе имитационной среды. Вторая модель является статистическим классификатором плотности, дополненным массивом меньшей размерности для хранения информации о слабо заполненных комбинациях факторов-диапазонов. Эту модель можно использовать при работе имитационной среды.

Для решения задачи сэмплирования [1-3] приблизительно определяется объем выборки для обучения ИНС путем варьирования заданного максимального количества наборов k , принадлежащих одному элементу массива $M_{i,j..n}$, которое может быть помещено в выборку.

После уточнения k система переходит к формированию выборки. Происходит однократный перебор данных и для каждого набора рассчитывается вероятность его добавления P [0..1] как:

$$P = \begin{cases} 1, & \text{если } M_{i,j..z} \leq k; \\ k / M_{i,j..z}, & \text{если } M_{i,j..z} > k, \end{cases} \quad (1)$$

где $k \in (0, \infty)$. Так как процедура формирования выборки носит вероятностный характер, могут быть заданы любые положительные значения k , включая $k < 1$.

Созданная при $k = 1$ выборка позволила создать ИНС модель расчета температуры полосы, обеспечивающую коэффициент корреляции 0,83. Средняя ошибка расчета температуры составляет 12 °С при диапазоне изменения 180 °С (от 700 до

880 °С), что дает 6,7 % приведенной погрешности. Среднее значение ошибки можно снизить до 7 °С, если отказаться от учета редких режимов, когда обработка производится при температурах более 780 °С.

Созданная модель обладает достаточно высокой степенью гетероскедастичности. Причем, если влияние неравномерности распределения по температуре полосы на непостоянство дисперсии остатков можно снизить проведением специального масштабирования значений выходного параметра (см. рис. 6-8), то проблемы, связанные с неравномерностью распределения по толщине полосы (рис. 9), таким путем трудно устранимы.

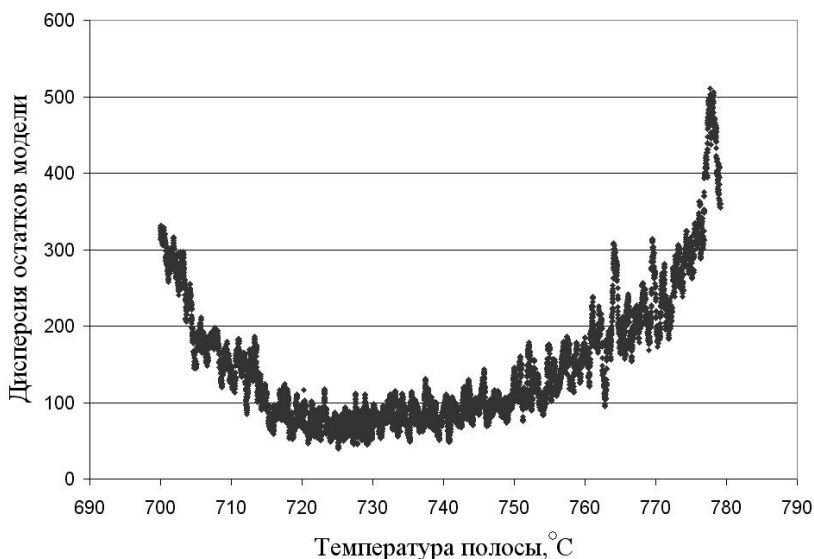


Рис. 6. Дисперсия остатков модели, рассчитанная по результатам сортировки остатков по возрастанию температуры полосы (каждая точка результат расчета дисперсии по 100 наборам)

Из рис. 6 видно, что диапазон изменения дисперсии остатков $D_{\max} / D_{\min} \approx 10$. Используя информацию об одномерной плотности распределения температуры полосы в сформированной выборке, можно реализовать масштабирование выходного параметра модели, относительно значения 728,82 °С, при котором плотность максимальна.

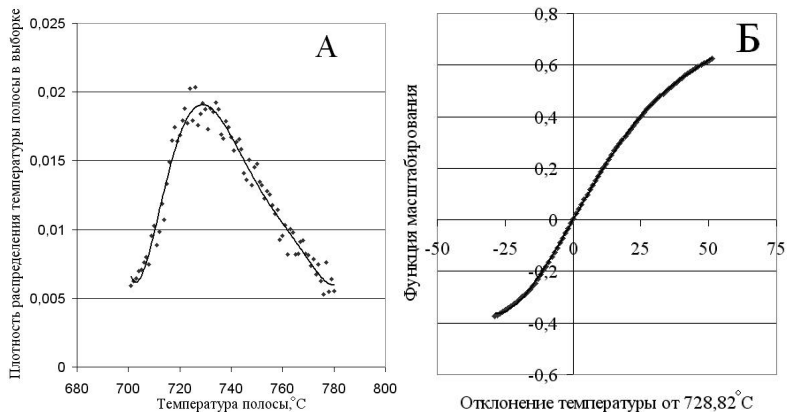


Рис. 7. Организация масштабирования значений температуры полосы в выборке на основе функции плотности распределения (А) и полученной на ее основе функции масштабирования (Б)

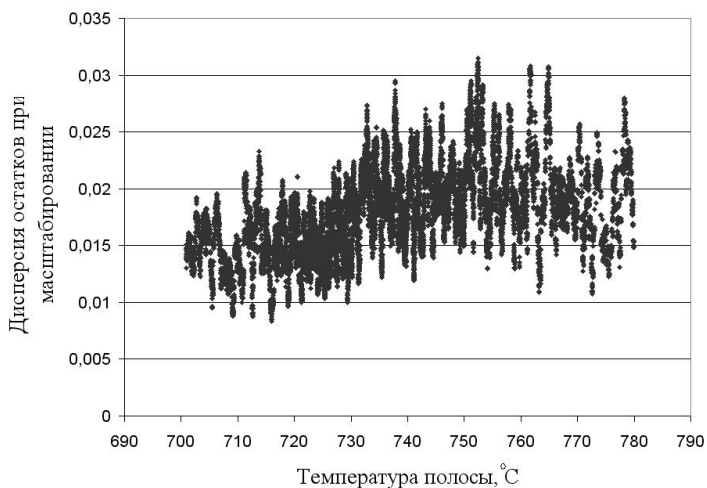


Рис. 8. Дисперсия остатков модели с ремасштабированием выходного параметра, рассчитанная по результатам сортировки остатков по возрастанию температуры полосы (каждая точка – результат расчета дисперсии по 100 наборам)

Видно, что после ремасштабирования выходного параметра удалось в значительной степени снизить непостоянство дисперсий, связанное с неравномерностью распределения выходного параметра.

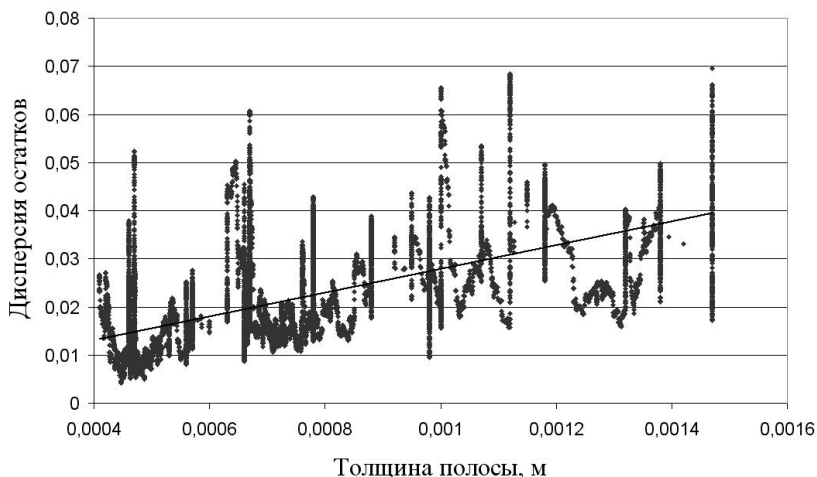


Рис. 9. Дисперсия остатков модели с ремасштабированием выходного параметра, рассчитанная по результатам сортировки остатков по возрастанию толщины полосы (каждая точка – результат расчета дисперсии по 100 наборам)

Из рис. 9 видно, что в точках типового сортамента по толщине полосы диапазон изменения дисперсии достаточно высок ($D_{\max} / D_{\min} \approx 6$).

Сложная структура изменения дисперсии остатков, при сортировке по толщине полосы объясняется двумя тенденциями. Общий возрастающий тренд связан с уменьшением доли данных со значительной толщиной полосы. Влияние этой неравномерности поддается корректировке.

Также можно наблюдать значительные выбросы дисперсии при определенных толщинах. Причем места выбросов соответствуют наиболее часто встречающимся “типovým” толщинам. Эти выбросы объясняются тем, что на эти типы полос приходятся разные нестандартные режимы, данных по которым мало (это происходит только в силу того, что эти полосы составляют основную часть сортамента и вероятность того что, например аварийный или просто незапланированный режим выпадет на них больше).

Какую-либо одномерную корректировку здесь предложить сложно. Необходимо оперировать полученными значениями совокупной плотности распределения данных либо, что может быть менее затратно, использовать гиперкубы меньшей раз-

мерности, чем все факторное пространство для отбраковки интервалов, где точность модели не гарантируется.

В заключение необходимо отметить, что факторы, представленные в табл. 3 совместно способны объяснить 92% всей дисперсии (коэффициент корреляции порядка 0.96). Однако неясно, как оперировать таким 38-мерным факторным пространством и как интегрировать подобную модель в существующую систему управления. В то же время рассмотренная восьмифакторная модель при относительно скромных показателях точности все же может использоваться в качестве имитационной и позволяет, пусть и только в отдельных режимах, но сделать выводы о некоторых статических характеристиках отделения нагреха.

Список литературы

1. Garcia S., Herrera F. Evolutionary Undersampling for Classification with Imbalanced Datasets: Proposals and Taxonomy // *Evolutionary Computation* 17(3), 2009. – P. 275-306.
2. Chawla N., Bowyer, K., Hall, L., Kegelmeyer, W. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique // *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2002, 16. – P. 341-378.
3. Терехов С.А. Нейросетевые аппроксимации плотности распределения вероятности в задачах информационного моделирования // Научная сессия МИФИ-2002. IV Всерос. науч.-техн. конференция “Нейроинформатика-2002”: лекции по нейроинформатике. Ч. 2. – М.: МИФИ, 2002. – 172 с.

УДК 621.74.045:621.742.001.57

А.С. Савинов

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ПОСТОЯННОЙ ЖЕСТКОСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОТЛИВКИ

Расчет напряженного состояния литой детали в процессе ее охлаждения не возможен без определения возникающих при этом деформаций системы отливка-форма. Вопрос о деформационной способности сырых и сухих песчано-глинистых литейных форм в различных температурных условиях подробно опи-

сан в источниках [1, 2]. В данной работе рассмотрен процесс деформирования однородной среды (формы) под воздействием усадочных процессов осесимметричной отливки (см. рисунок).

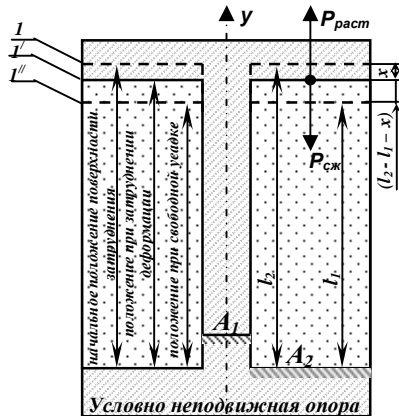


Схема к расчету деформации системы "отливка-форма" при затрудненной усадке

Постановку задачи о силовом взаимодействии системы "отливка-форма" осуществим следующим образом.

Пусть l_2 - слой деформируемой смеси постоянной жесткости в начальный момент охлаждения. Тогда при перепаде температур ΔT , под воздействием затрудненной усадки, произойдет перемещение плоскости 1 в положение 1' на величину x . При условии отсутствия затруднения усадочного процесса плоскость 1 должна переместиться в положение 1'', при этом расстояние между плоскостями 1' и 1'' составит $(l_2 - x - l_1)$, а длина сжимаемого объекта изменится с l_2 до l_1 . Значение l_2 не трудно найти по следующей формуле [3]:

$$l_1 = l_2 - \Delta T \alpha l_2, \quad (1)$$

где α - коэффициент линейного расширения сплава.

При решении данной задачи рассматриваем два объекта – отливку, работающую на растяжение, и слой смеси, работающий на сжатие. Учитывая симметричность отливки, рассмотрим силовое взаимодействие только половины системы (на рисунке

правее оси y). При условии упругих деформаций в системе, растяжение отливки и сжатие смеси может быть найдено исходя из закона Гука [4].

$$(\ell_2 - \ell_1 - x) = \frac{P_{\text{раст}} \ell_1}{E_1 A_1 / 2}, \quad (2)$$

откуда

$$x = \frac{P_{\text{сж}} \ell_2}{E_2 A_2}, \quad (3)$$

где $P_{\text{раст}}$ - растягивающее усилие, действующее на отливку;
 $P_{\text{сж}}$ - сжимающее смесь усилие;
 E_1, E_2 - модуль упругости отливки и смеси;
 A_1, A_2 - площади поперечного сечения отливки и плоскости внедрения затрудняющего усадку элемента.

В работе индексом 1 отмечаются параметры отливки, 2 - смеси.

Так как система находится в равновесии, то усилия растяжения и сжатия равны, т.е. выполняется следующее условие:

$$P_{\text{раст}} = P_{\text{сж}}. \quad (4)$$

Откуда из выражений (2) – (4) получим

$$\frac{x E_2 A_2}{\ell_2} = \frac{(\ell_2 - \ell_1 - x) E_1 A_1}{\ell_1}. \quad (5)$$

Откуда

$$x = \frac{E_1 A_1 \ell_2 (\ell_2 - \ell_1)}{E_1 A_1 \ell_2 + 2 E_2 A_2 \ell_1}. \quad (6)$$

Определив величину деформации системы x , при наличии диаграмм растяжения материала, не трудно определить напряжения, возникающие в изделии.

Однако представленное решение не учитывает пластического деформирования элементов в системе, усилий трения и изменения механических характеристик литейной формы под воздействием теплового потока отливки. Поэтому данное реше-

ние в первом приближении может быть применено только для расчета начального момента затвердевания изделия, когда свойства сжимаемой смеси могут считаться постоянными.

Список литературы

1. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Сеницкий Е.В., Исследование деформационной способности песчано-глинистых смесей // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. №1. – С. 29-32.
2. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Расчет миграции влаги в сырой песчано-глинистой литейной форме. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2011. – 98 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики – М.: Высш. шк., 1997. – 542 с.
4. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов - М.: Высш. шк., 1975. – 653 с.

УДК 621.742.08

А.С. Тубольцева

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

УСТАНОВКА ПО ИЗУЧЕНИЮ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЫРЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ

Расчет силового взаимодействия литой детали с отливкой в процессе ее охлаждения не возможен без изучения реологических свойств среды, в которой происходит формообразование изделия.

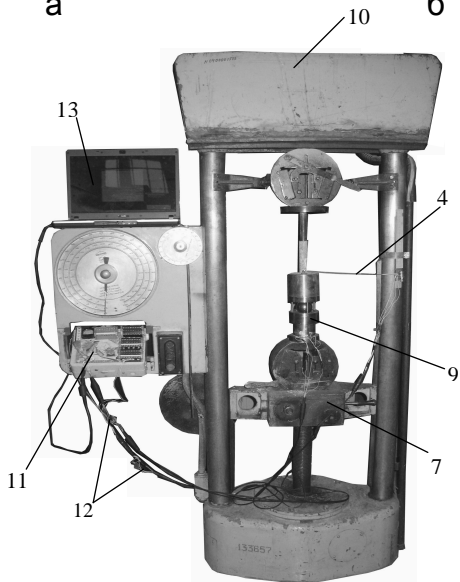
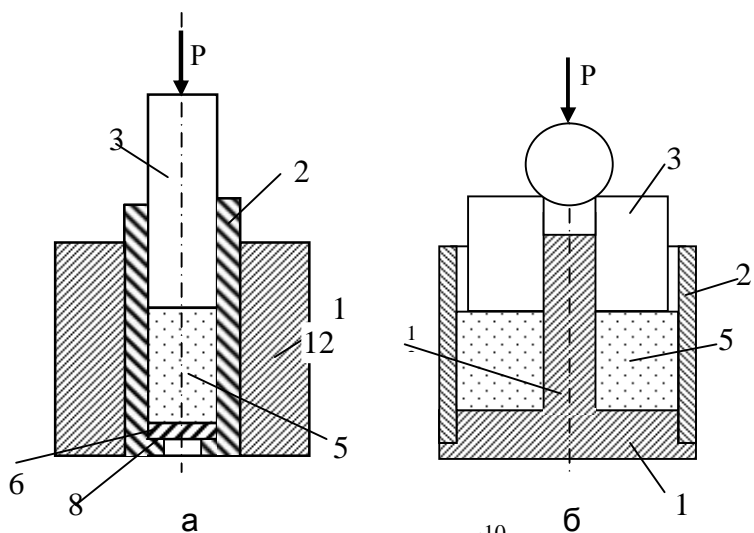
Для изучения механических свойств песчано-глинистых смесей была разработана установка, обеспечивающая центральное сжатие образца, а следовательно, равномерное распределение нормальных напряжений по всему сечению изучаемого объекта [1]. Испытания проводились на лабораторном стенде, который представляет собой комплекс технических средств, в основу которого входит многоканальный внешний аналого-цифровой преобразователь Е-14-140 фирмы L-CARD (Россия), подключаемый к персональному компьютеру через USB-интерфейс [2]. Для измерения усилий сжатия применялась мсдоза [3], в качестве датчика измерения перемещений использовали стальную пластину, способную работать без пластических деформаций в достаточно большом интервале пере-

мещений. Работа установки происходит следующим образом (рис. 1, а). В обойму 2, представляющую собой стальную трубу с вваренными ограничителями 8 вставляется шайба 6, исключающая просыпание формовочной смеси 5. Затем производится засыпка и уплотнение штоком 3 формовочной смеси заданного компонентного состава. Путем взвешивания пустой обоймы и обоймы с образцом и измерения длины образца получим первоначальную плотность смеси. С целью обеспечения устойчивости обойма 2 вставляется в корпус 1 и сверху образец прижимается штоком 3.

Проведенные испытания на смесях с начальной влажностью 0-8% показали удовлетворительную работу устройства [4, 5]. Однако испытания данным прибором сырых смесей с большим содержанием избыточной влажности 8-21% показали, что такая конструкция прибора приводит к тому, что при нагружении и сжатию образца избыточная химически несвязанная влага, полностью заполняя свободные поры системы, начинает работать как несжимаемый объект, в результате чего образцы с повышенным содержанием влажности как бы имеют низкую деформационную способность, что не соответствует данным источников [6, 7], а также практическим наблюдениям. Во избежание данной погрешности был разработан прибор (рис. 1, б), представляющий собой основание 1, в центр которого установлен направляющий стержень 12, по которому перемещается шток 3, обеспечивающий центральное сжатие образца 5, расположенного в обойме 2.

Зазор между штоком 3 и обоймой 2 позволяет свободно выходить избыточной влаге, не влияя на результаты эксперимента. Для снижения возможности внецентренного нагружения штока 3 усилие на конструкцию передается через шаровой силоводящий элемент. Нагружение данной конструкции производится в испытательной машине УММ-5 (рис.1,в) ГОСТ 7855-61 с усилием нагружения 50 кН.

Структурная схема комплекса технических средств измерительного стенда для исследования параметров процесса получения литых изделий показана на рис. 2.



в

Рис.1. Установка для определения податливости формовочной смеси:

- 1- корпус; 2- обойма; 3- шток; 4- датчик; 5-образец; 6- шайба;
 7- траверса; 8- ограничитель; 9- мездоза; 10- машина; блок АЦП;
 12- усилитель; 13- регистрирующее устройство

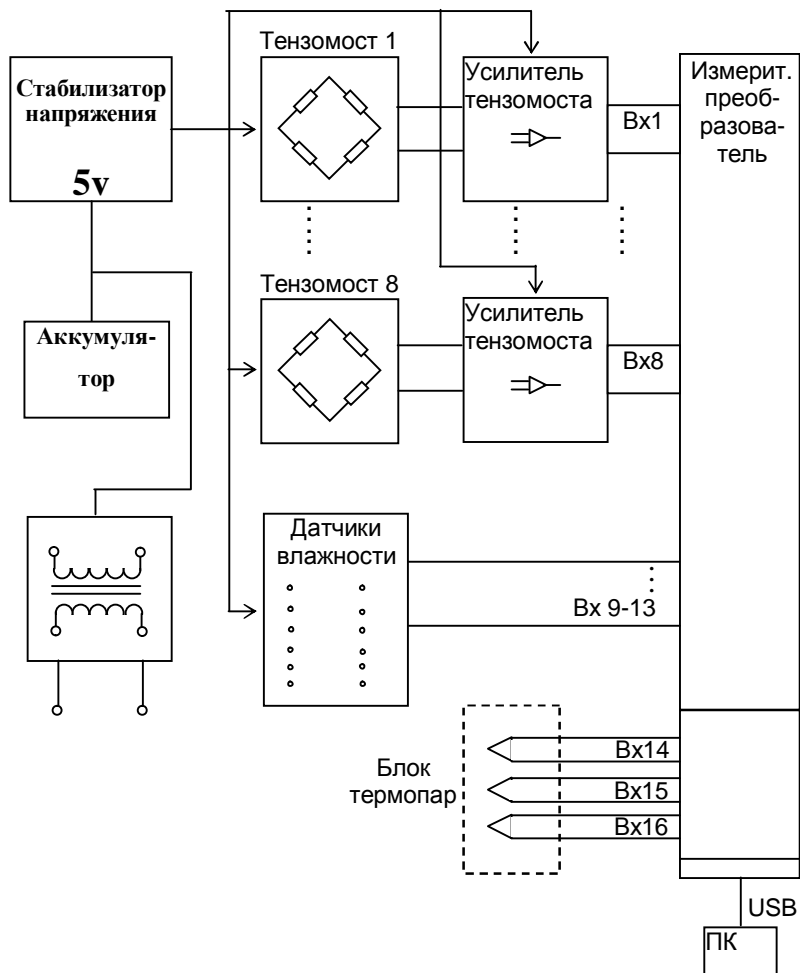


Рис. 2. Структурная схема комплекса технических средств измерительного стенда для исследования параметров процесса получения литых изделий

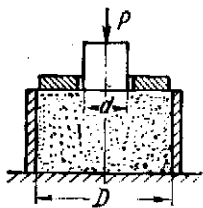


Рис.3. Исследуемая система

В отличие от аналогичных приборов, применяемых для исследования реологических свойств формовочных смесей Труховым А.П., Баландиным Г.Ф. и Степановым Ю.А. (рис. 3) [7, 8], разработанное нами устройство позволяет проводить центральное сжатие образца, сводя к минимуму возможность перекоса внедряемого штока.

Таким образом, разработанная установка, позволяющая изучать реологию сырых ПГФ с высокой начальной влажностью в условиях осевого сжатия.

Список литературы

1. Установка для исследования податливости формовочных смесей/ А.С.Савинов, А.С Тубольцева //Литейные процессы: межрегион. сб. науч. трудов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – С. 139-144
2. Информационно-измерительный комплекс для определения параметров процессов при изготовлении литой детали/А.С.Савинов, С.М.Андреев, А.С Тубольцева //Современные технологии в машиностроении: сб. статей XII Междунар. науч.-практ. конференции.- Пенза: Приволжский Дом знаний, 2009.- С.39-41.
3. Разработка регистрирующих элементов установки по исследованию податливости формовочной смеси/ А.С.Савинов, А.С Тубольцева // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. трудов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – С. 148-154
4. Моделирование деформационной способности сухой песчано-глинистой формы/ А.С.Савинов, А.С Тубольцева // Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сб. статей VI Междунар. науч.-техн. конференции.- Пенза: Приволжский дом знаний, 2010. – С. 66-70.
5. Определение граничных условий при постановке задачи о силовом взаимодействии литой детали с формой/ А.С.Савинов, А.С Тубольцева // Механики XXI века: VIII Всерос.

науч.-техн. конференция с международным участием. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – С.57-60.

6. Ле-Конг-Ха. Распределение влажности в сырой форме при заливке // Литейное производство, – 1970. – №5. – С.37-38.

7. Аксенов П.Н., Трухов А.П. Аналитический расчет зоны конденсации в литевой форме // Литейное производство. – 1972. – №5. – С.19-21.

8. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. – М.: Машиностроение, 1979. – 335с.

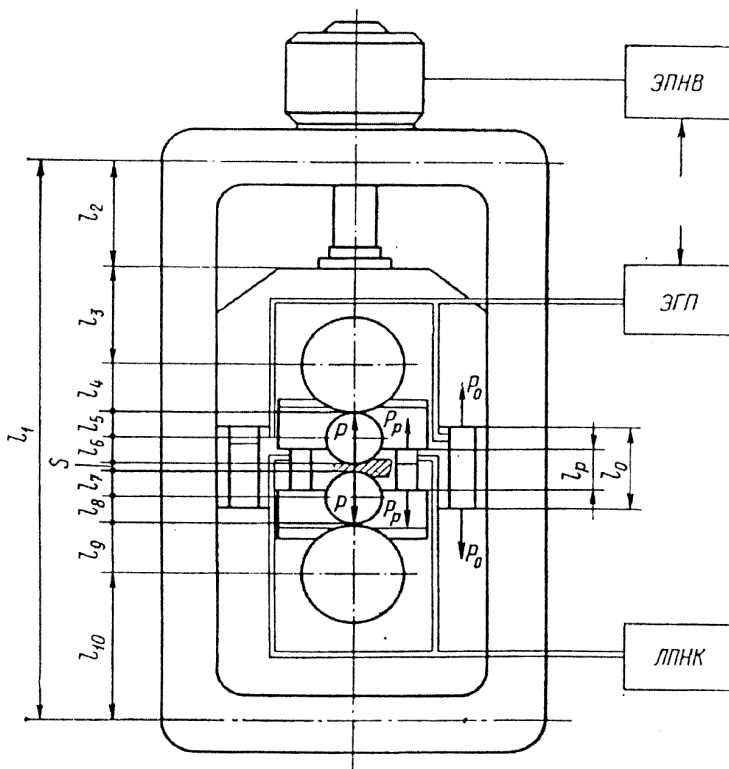
УДК 621.771:65.011:62-82

В.М. Москвин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ СРЕДСТВАМИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ

Для уменьшения продольной разнотолщинности проката наряду с технологическими мероприятиями широкое распространение получили системы автоматического управления толщиной и натяжением полосы (САУТ и Н). Применение двухканального управления (см. рисунок) – по каналам гидропривода нажимного механизма (ГПНМ) и электрогидравлического привода (ЭГП) распора опорных валков позволяет значительно повысить точность работы одноканальной САУТ и Н с ГПНМ. Для правильного формирования сигналов управления исполнительными механизмами следует определить аналитические зависимости взаимодействия каждого канала и основных возмущений на толщину и её измеримость. В связи с этим необходимо установить определённую систему уравнений, которая связывает основные перемещения и деформации элементов клетки с управляющими воздействиями и возмущениями. Для клетки имеют место следующие зависимости: уравнения геометрии, связывающие деформацию отдельных элементов клетки, уравнения упругой деформации отдельных элементов клетки и уравнения пластической деформации прокатываемой полосы.



Прокатная клетка кварто

Согласно обозначениям размеров элементов клетки, принятых на рисунке, уравнения геометрии имеет следующий вид:

$$l_1 = l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 + h + l_7 + l_8 + l_9 + l_{10}. \quad (1)$$

Вопросы распределения деформаций между элементами клетки достаточно полно изложены в работе [1]. Обозначим недеформированное состояние элемента символом «звёздочка». Тогда уравнения деформации элементов клетки l_1 - l_{10} примут вид:

$$\begin{aligned}
l_1 &= l_1^* + \varphi_1 (P + P_p + P_o); \\
l_2 &= l_2^* - \varphi_2 (P + P_p + P_o); \\
l_3 &= l_3^* - \varphi_{31} (P + P_p) - \varphi_{32} (P_o); \\
l_4 &= l_4^* - \varphi_4 (P + P_p) + \eta_4 (\Omega_o); \\
l_5 &= l_5^* - \varphi_5 (P + P_p) + \eta_5 (\Omega_p); \\
l_6 &= l_6^* - \varphi_6 (P); \\
l_7 &= l_7^* - \varphi_7 (P); \\
l_8 &= l_8^* - \varphi_8 (P + P_p) + \eta_8 (\Omega_p); \\
l_9 &= l_9^* - \varphi_9 (P + P_p) + \eta_9 (\Omega_o); \\
l_{10} &= l_{10}^* - \varphi_{10,1} (P + P_p) - \varphi_{10,2} (P_o).
\end{aligned} \tag{2}$$

Здесь φ_i – функция деформации l_i элемента от усилий прокатки P , гидрораспора опорных P_o и рабочих P_p валков; η_i – эксцентриситеты валков, определяемые отклонением фактического радиуса от его среднего значения и зависящие от скорости вращения рабочих Ω_p и опорных валков Ω_o . Уравнение пластической деформации полосы имеет вид [2]

$$P=f(S,T), \tag{3}$$

где T – технологические параметры, определяющие процесс прокатки металла в клети (входная толщина, переднее и заднее удельные натяжения, сопротивление деформации, трение), вызывающие изменение давления прокатки P . Давления в гидроцилиндрах P_o и P_p являются функцией положения их опор l_o и l_p (см. рисунок):

$$P_o=f_o(l_o), P_p=f_p(l_p). \tag{4}$$

Таким образом, получена система четырнадцати нелинейных уравнений (1) – (4) с неизвестными $l_1 - l_{10}$, P , P_o , P_p , h .

На установившейся скорости прокатки при небольших отклонениях неизвестных параметров от установившихся значе-

ний систему (1) – (4) можно линеаризовать, оставив только линейные приращения. Введём следующие обозначения: $\mathbf{P}_1=\mathbf{P}+\mathbf{P}_o+\mathbf{P}_p$ и $\mathbf{P}_2=\mathbf{P}+\mathbf{P}_p$. Линеаризованная система уравнений (2) примет вид

$$\begin{aligned}
 \Delta l_1 &= k_1 \cdot \Delta P_1; \\
 \Delta l_2 &= -\Delta k_2 \cdot \Delta P_1 + \Delta u; \\
 \Delta l_3 &= -k_3 \cdot \Delta P_2 - k_4 \cdot \Delta P_o; \\
 \Delta l_4 &= -k_5 \Delta P_2 + \eta_4(\Omega_o); \\
 \Delta l_5 &= -k_6 \cdot \Delta P_2 + \eta_5(\Omega_p); \\
 \Delta l_6 &= -k_7 \cdot \Delta P; \\
 \Delta l_7 &= -k_8 \cdot \Delta P; \\
 \Delta l_8 &= -k_9 \cdot \Delta P_2 + \eta_8(\Omega_p); \\
 \Delta l_9 &= -k_{10} \cdot \Delta P_2 + \eta_9(\Omega_o); \\
 \Delta l_{10} &= -k_{11} \cdot \Delta P_2 - k_{12} \cdot \Delta P_o,
 \end{aligned} \tag{5}$$

где $\eta_4(\Omega_o)$, $\eta_9(\Omega_o)$ – периодические функции-возмущения, порождённые эксцентриситетом опорных валков, $\eta_5(\Omega_p)$, $\eta_8(\Omega_p)$ – периодические функции-возмущения, порождённые эксцентриситетом рабочих валков.

В литературе даны подробные методики [3,4] для расчёта коэффициентов \mathbf{k}_1 – \mathbf{k}_{12} и приведены примеры расчётов. К системе уравнений (5) следует добавить линеаризованное уравнение геометрии (1)

$$\Delta l_1 = \Delta l_2 + \Delta l_3 + \Delta l_4 + \Delta l_5 + \Delta l_6 + \Delta h + \Delta l_7 + \Delta l_8 + \Delta l_9 + \Delta l_{10} \tag{6}$$

и линеаризованное уравнение очага деформации (3)

$$\Delta P = \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial f}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial f}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial f}{\partial T_1} \Delta T_1, \tag{7}$$

Величины $\Delta \mathbf{h}_o$, $\Delta \mathbf{T}_o$, $\Delta \mathbf{T}_1$ являются внешними возмущениями. Введём для параметров, входящих в уравнение (7) следующие обозначения: $-\frac{\partial f}{\partial h} = K_5$, $\frac{\partial f}{\partial h_0} = K_6$. Так как величины $\Delta \mathbf{h}_o$,

ΔT_0 , ΔT_1 входят в уравнение однородно, то введём для них одно обозначение ΔT и один коэффициент пропорциональности K_6 . В зависимости от рассматриваемого возмущения, ΔT принимает разные значения: Δh_0 , ΔT_0 или ΔT_1 , соответственно и коэффициент K_6 также будет принимать разные значения. В принятых обозначениях уравнение (7) запишется так

$$\Delta P = -K_5 \cdot \Delta h + K_6 \cdot \Delta T \quad (8)$$

Система уравнений (5) с добавленными уравнениями (6) и (8) образуют систему из 12 уравнений с 12 неизвестными величинами: Δl_{1-10} , ΔP и Δh . В системах управления толщиной полосы используются датчики, которые фиксируют геометрические величины – расстояние между подушками опорных валков и расстояние между подушками рабочих валков. В соответствии с рисунком, изменение расстояние между подушками опорных валков

$$\Delta L_o = \Delta l_4 + \Delta l_5 + \Delta l_6 + \Delta h + \Delta l_7 + \Delta l_8 + \Delta l_9,$$

а изменение расстояния между подушками рабочих валков

$$\Delta L_p = \Delta l_6 + \Delta h + \Delta l_7.$$

Считая ΔL_o и ΔL_p неизвестными величинами, добавим два последних уравнения к ранее указанной системе из 12 уравнений. Получим полную систему из 14 уравнений с 14 неизвестными: Δl_{1-10} , ΔP , Δh , ΔL_o , ΔL_p .

Система уравнений – линейная. Её можно решить методом исключения промежуточных переменных. СКМ **Matlab** [5] позволяет работать с символьными переменными и решать линейные системы уравнений в символьной форме. Чтобы воспользоваться этой возможностью, введём новое обозначение для неизвестных переменных, управляющих воздействий и внешних возмущений (в обозначениях имён переменных не допускаются греческие символы):

$$DL1 \approx \Delta l_1, DL2 \approx \Delta l_2, DL3 \approx \Delta l_3, DL4 \approx \Delta l_4, DL5 \approx \Delta l_5, DL6 \approx \Delta l_6, DL7 \approx \Delta l_7,$$

$$DL8 \approx \Delta l_8, DL9 \approx \Delta l_9, DL10 \approx \Delta l_{10};$$

$$DP \approx \Delta P, DPo \approx \Delta P_o, DPp \approx \Delta P_p, Dh \approx \Delta h, Nu1 \approx \eta_1, Nu2 \approx \eta_2, DS \approx \Delta S,$$

$$DLo \approx \Delta L_o, DLp \approx \Delta L_p.$$

Для остальных переменных, внешних воздействий и коэффициентов вводить новых обозначений не потребовалось, т. к. в их идентификаторы не входят греческие буквы.

Программа, которая решает систему линейных алгебраических уравнений, имеет вид:

% Определение передаточных коэффициентов клетки

```

syms DL1 DL2 DL3 DL4 DL5 DL6 DL7 DL8 DL9 DL10
syms k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7 k8 k9 k10 k11 k12
syms DP DPo DPp Dh T Nu1 Nu2 DS DLo DLp
syms K5 K6
eq1=DL1-k1*DP-k1*DPo-k1*DPp;
eq2=DL2+k2*DP+k2*DPo+k2*DPp-DS;
eq3=DL3+k3*DP+k3*DPp+k4*DPo;
eq4=DL4+k5*DP+k5*DPp-Nu1;
eq5=DL5+k6*DP+k6*DPp;
eq6=DL6+k7*DP;
eq7=DL7+k8*DP;
eq8=DL8+k9*DP+k9*DPp;
eq9=DL9+k10*DP+k10*DPp-Nu2;
eq10=DL10+k11*DP+k11*DPp+k12*DPo;
eq11=DL2+DL3+DL4+DL5+DL6+DL7+DL8+DL9+DL10+Dh-DL1;
eq12=DP+K5*Dh-K6*T;
eq13=DL4+DL5+DL6+Dh+DL7+DL8+DL9-DLo;
eq14=DL6+Dh+DL7-DLp;
s=solve(eq1,eq2,eq3,eq4,eq5,eq6,eq7,eq8,eq9,eq10,eq11,eq12,eq13,eq14,...
    Dh,DP,DLo,DLp,DL1,DL2,DL3,DL4,DL5,DL6,DL7,DL8,DL9,DL10);

```

Команда **syms** указывает, что объявленные далее переменные символьного типа. Переменные eq(1-14) – обозначение уравнений с группировкой всех членов в одной его части (левой или правой). Решатель **solver** возвращает структуру **s**, поля которой - символьные выражения для неизвестных переменных. Нас интересуют четыре переменные – **Δh**, **ΔP**, **ΔLo**, **ΔLp**, т.е. зазор между рабочими валками (выходная толщина полосы), давление прокатки, раствор между подушками опорных и рабочих валков. Ниже приведены поля **Dh** и **DP** структуры **s**:

pretty(s.Dh)

```

(k8 K6 T + k10 K6 T + k2 K6 T + k6 K6 T + k9 K6 T + k7 K6 T + k1 K6 T
+ k5 K6 T + k11 K6 T + k3 K6 T - DS - Nu1 + k1 DPo + k1 DPp + k2 DPo
+ k2 DPp + k3 DPp + k4 DPo + k5 DPp + k6 DPp + k9 DPp + k10 DPp
+ k11 DPp - Nu2 + k12 DPo)/(k5 K5 + k10 K5 + k3 K5 + k6 K5 + k8 K5
+ k11 K5 + k2 K5 + k9 K5 + k7 K5 + k1 K5 + 1)

```

pretty(s.DP)

```

-(K5 k4 DPo + K5 k5 DPp + K5 k10 DPp + K5 k3 DPp + K5 k6 DPp + K5 k11 DPp
+ K5 k2 DPp + K5 k12 DPo + K5 k1 DPo + K5 k2 DPo + K5 k1 DPp
+ K5 k9 DPp - K6 T - K5 DS - K5 Nu1 - K5 Nu2)/(k5 K5 + k10 K5 + k3 K5
+ k6 K5 + k8 K5 + k11 K5 + k2 K5 + k9 K5 + k7 K5 + k1 K5 + 1).

```

Поля **DL_o** и **DL_p** не выписаны в силу их большого размера. Функция **pretty** выводит символьное выражения для переменной в виде дроби. На первый взгляд, выражения кажутся очень громозкими. После приведения подобных членов и введения новых обозначений они примут значительно более простой вид.

Прокатная клеть является многосвязным объектом управления. Она имеет вектор выходных переменных $X_y = (\Delta h, \Delta P, \Delta L_a, \Delta L_p)'$, вектор внешних возмущений $F = (\Delta h_0, \Delta T_0, \Delta T_1, \eta_1, \eta_2)'$ и вектор управляющих воздействий $U = (\Delta S, \Delta P_o, \Delta P_p)'$. Найдём передаточные коэффициенты, связывающие входные и выходные параметры. Следует, прежде всего, обратить внимание на то, что вид знаменателя у всех символьных выражений одинаков. Его можно записать так:

$1 + (k_1 + k_2 + k_3 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11}) * K_5$, где сумма коэффициентов $(k_1 + k_2 + k_3 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11})$ называется податливостью клетки, а величина ей обратная – жёсткостью прокатной клетки и обычно обозначается $M_{кл}$ [4], а коэффициент $K_5 = \left| \frac{\partial f}{\partial h} \right|$

- жёсткостью полосы и, обычно, обозначается M_p . После введённых обозначений, знаменатель запишется так: $1 + M_p / M_{кл}$.

Найдём передаточные коэффициенты клетки по наиболее важным управляющим и возмущающим каналам. Прежде всего, это зависимость выходной толщины полосы Δh от управляющего воздействия ΔS и возмущений ΔT . Из выражения для Δh (вывод **pretty(s.Dh)**) находим отношение $\Delta h / \Delta S$, обозначив его как $K_{\Delta h, \Delta S}$:

$$K_{\Delta h, \Delta S} = \frac{-1}{1 + \frac{M_p}{M_{кл}}} = \frac{-M_{кл}}{M_{кл} + M_p}.$$

В исходных уравнениях $\Delta S \geq 0$ означает увеличение I_2 и уменьшение толщины полосы. Однако в теории прокатки принято подъём нажимного устройства ΔS считать величиной положительной, что означает уменьшение I_2 и увеличение толщины полосы. Выражение для $K_{\Delta h, \Delta S}$ без учёта знака в числителе совпадает с ранее установленными формулами [3,6] для его

вычисления. Из выражения для Δh находим остальные передаточные коэффициенты:

$$K_{\Delta h, \Delta P_0} = \frac{(k_1 + k_2 + k_4 + k_{12})}{1 + \frac{M_n}{M_{кл}}} = \frac{1}{M_{ст}' \cdot (1 + \frac{M_n}{M_{кл}})};$$

$$K_{\Delta h, \Delta T} = \frac{K_6}{M_{кл} + M_n};$$

$$K_{\Delta h, \eta} = \frac{-M_{кл}}{M_{кл} + M_n},$$

где $K_{ст}' = k_1 + k_2 + k_4 + k_{12} = 1/M_{ст}'$ – податливость станины по каналу распора подушек опорных валков, а коэффициент K_6 определяется видом возмущения ($\Delta h_0, \Delta T_0, \Delta T_1$).

Из выражения для ΔP (вывод pretty(s.DP) находим [2]:

$$K_{\Delta P, \Delta S} = \frac{K_5}{1 + \frac{M_n}{M_{кл}}}; K_{\Delta P, \Delta T} = \frac{K_6}{1 + \frac{M_n}{M_{кл}}}; K_{\Delta P, \Delta \eta} = \frac{M_n}{1 + \frac{M_n}{M_{кл}}};$$

$$K_{\Delta P, \Delta P_0} = -\frac{M_n}{M_{ст}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{M_n}{M_{кл}}}.$$

В ряде систем управления используется косвенный замер отклонения толщины полосы от заданного значения путём замера деформации некоторых элементов клетки. В частности, используется изменение зазора между подушками опорных или рабочих валков. Из выражения для ΔL_0 (вывод pretty(s.DLo)) были определены передаточные коэффициенты, которые связывают изменение зазора между подушками опорных валков с управляющими воздействиями $\Delta S, \Delta P_0$ и возмущениями ΔT .

Список литературы

1. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчёт на ЭВМ листовых прокатных станов. – М.: Металлургия, 1972. – 512 с.

2. Повышение точности листового проката / Меерович И.М., Герцев А.И., Горелик В.С., Классен Э.Я. – М.: Metallurgy, 1969. – 269 с.
3. Филатов А.С. Электропривод и автоматизация реверсивных станов холодной прокатки. – М.: Metallurgy, 1973. – 375 с.
4. Филатов А.С., Зайцев А.П., Смирнов А.А. Автоматические системы стабилизации толщины полосы при прокатке. – М.: Metallurgy, 1982. – 126 с.
5. Потёмкин В. МАТЛАБ: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001, – 560 с.
6. Модель прокатной клетки как объекта управления и косвенного измерения двухканальной системы / Осмоловский И.Ф., Кузнецов Б.И., Голубь А.П. и др. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. 1981. №2. С. 62-66.

УДК 620.179.14

М.Б. Аркулис, Ю.И. Савченко, Н.И. Мишенева

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ УПРУГО- ДЕФОРМИРОВАННОГО ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА

Металлоконструкции, выполненные из ферромагнитных материалов, в процессе эксплуатации подвержены действию циклических упругих напряжений и внешних магнитных полей. В результате происходит изменение магнитного состояния объекта. Причиной изменения является магнитоупругий эффект [4]. При попытке теоретического описания изменения намагниченности ферромагнетика возникают определенные сложности из-за необходимости учета таких факторов, как уровень внутренних напряжений и внутренних полей рассеяния, определяющих величину потенциальных барьеров 90- и 180-градусных доменных границ, текстура, анизотропия зерен, механизм давления на доменные границы, скачкообразный характер перестройки доменной структуры и т.д.

В работе [1] предложена феноменологическая модель описания магнитоупругих изменений намагниченности ферромагнетиках при тензорном характере нагружения в слабых магнитных полях. В образце из стали 3 в форме стержня, подвер-

женного циклическим нагрузкам, наблюдается рост намагниченности насыщения при увеличении нагрузки. Аналогичная зависимость получена для тонкой пластины из стали 3 и других марок стали [2]. В [3] проводились исследования на ферромагнитной трубе. Магнитоупругие изменения аналогичны. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о возможности создания модели зависимости упругих напряжений от намагниченности. На основании полученной экспериментальной зависимости прироста намагниченности $\Delta M_{\sigma}^{\pm}[H_0, t, \sigma_b(x, \alpha, r)]$ (где H_0 – поле Земли, t – время, $\sigma(x, \alpha, r)$ – упругие напряжения, x, α, r – параметры трубы), определено распределение поля рассеяния H_x и H_r [3]. Результаты согласуются с замерами полей рассеяния трубы.

На основании теории магнитоупругого эффекта и явления остаточной намагниченности при циклических нагрузках, а также опираясь на ряд работ по созданию феноменологических моделей, был разработан и внедрен «Метод магнитной памяти». Бесспорно, данный метод имеет серьезную теоретическую и экспериментальную основу, однако на наш взгляд, его использование имеет весьма ограниченный характер. Выводы на основе результатов измерений магнитных полей рассеяния объектов контроля не носят однозначный характер.

С целью установления корреляционной зависимости напряженности магнитного поля рассеяния и величины упругих напряжений нами проведены замеры полей рассеяния предварительно размагниченного швеллера №6 длиной 1,5 м в процессе нагружения от $\sigma = 0$ до σ , превышающего предел упругости. Швеллер горячекатаный, изготовленный из Ст.3. Измерения проводились в магнитном поле Земли, вдоль трех направляющих (рис. 1). Измерялись нормальная H_n и тангенциальная H_t составляющие магнитного поля рассеяния вдоль швеллера. Швеллер опирался концами на неферромагнитные опоры и подвергался вертикальной центральной нагрузке 3 и 5 кН. Упругие

напряжения, возникающие при этом $\sigma = \frac{M}{W}$ (где M – момент

силы, W – момент сопротивления). Далее нагрузка увеличилась до значения, превышающего предел упругости. Результаты измерений H_n и H_t представлены на рис. 2 и 4. При дальнейшем увеличении нагрузки, швеллер пластически деформируется. Затем, путем прикладывания обратной нагрузки, восстанавливает-

ся исходная форма швеллера. Измерения величины магнитного поля, после восстановления формы, представлены на рис. 3 и 5.

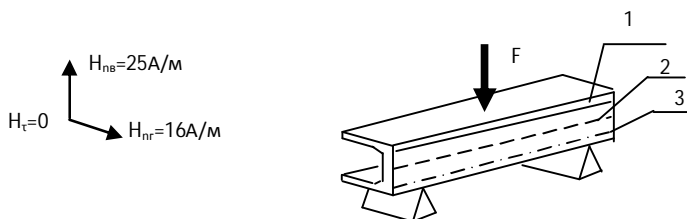


Рис. 1. Швеллер горячекатаный:

1 – первая направляющая; 2 – вторая направляющая; 3 – третья направляющая

Качественный анализ результатов показывает, что наблюдается изменение как нормальной H_n , так и тангенциальной H_t составляющих магнитного поля рассеяния. Однако при изменении нагрузки от 3 до 5 кН значения H_n и H_t не меняются. Причем тангенциальная компонента никакой информации о характере механического напряжения не несет. По нормальной компоненте, а вернее по отличию графика для каждой направляющей, можно судить о наличии нагрузки и о ее характере. Однако о величине нагрузки по ней судить не представляется возможным.

При упругой деформации, поле рассеяния H_n вдоль направляющих не зависит от величины упругих напряжений вдоль данной образующей. Однако наблюдается уменьшение поля H_n на концах образца. В точке приложения максимальной нагрузки нет никаких характерных изменений.

Тангенциальная компонента поля рассеяния также практически не изменяется. При любом режиме из вышеперечисленных отличия между величинами H_t в некоторой точке отсутствуют. Точка приложения максимальной нагрузки также не имеет характерных признаков.

Установление корреляционной зависимости оказывается затруднительным. Внесение поправки на величину исходного поля до нагружения предполагает получение зависимости близкой к линейной, поскольку момент силы от края до центра возрастает прямо пропорционально длине. Обработка данных не дает предполагаемых результатов.

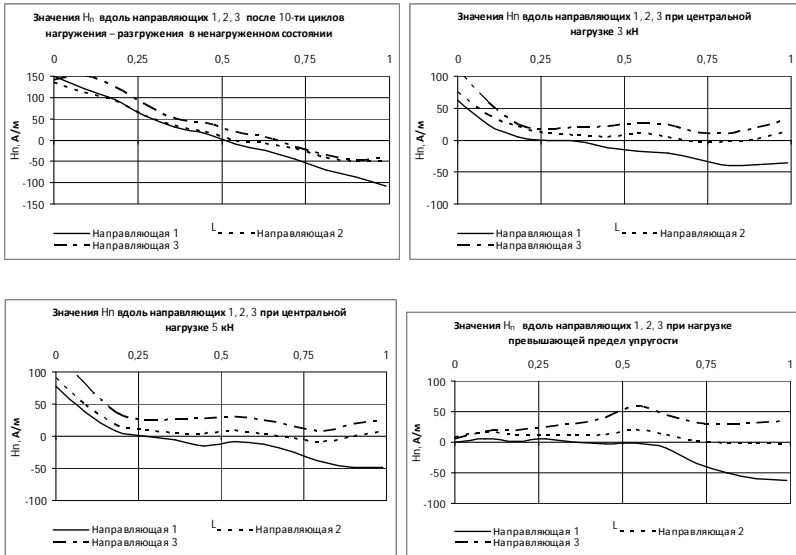


Рис. 2. Распределение нормальной компоненты H_n магнитного поля рассеяния по длине образца

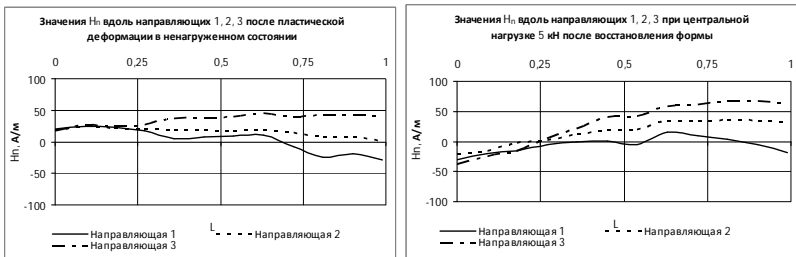


Рис. 3. Распределение нормальной компоненты H_n магнитного поля рассеяния по длине образца после пластической деформации

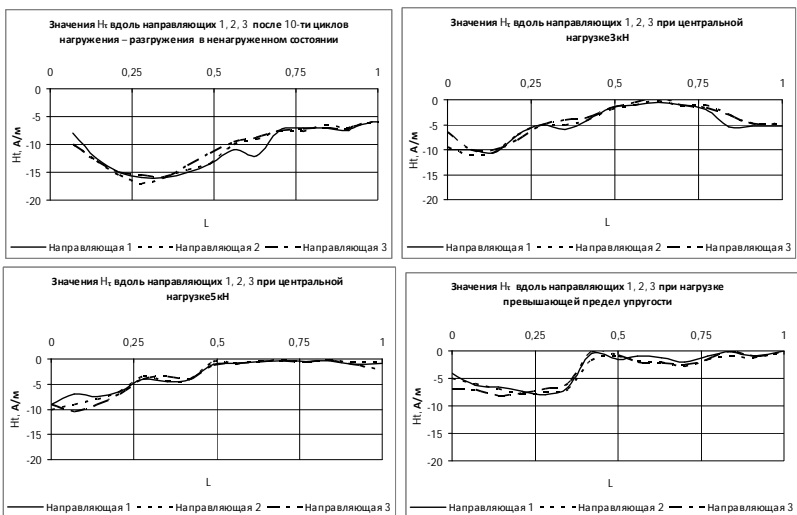


Рис. 4. Распределение тангенциальной компоненты H_t магнитного поля рассеяния по длине образца

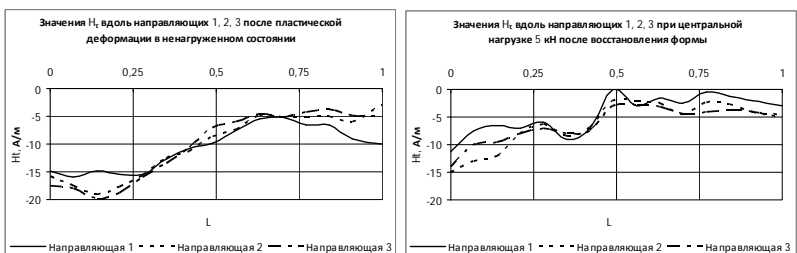


Рис. 5. Распределение тангенциальной компоненты H_t магнитного поля рассеяния по длине образца после пластической деформации

Швеллер был сориентирован таким образом, что продольная составляющая магнитного поля Земли равна нулю. Такая ориентация исключает магнитный гистерезис при циклических нагрузках в области упругих деформаций. Распределение тангенциальной компоненты H_t магнитного поля рассеяния по длине образца по трем составляющим не зависит от величины нагрузки. Следовательно, при ориентации объекта контроля (балка, труба, ферма и т.д.) вдоль нулевой компоненты поля

Земли эффект магнитной памяти отсутствует. Аналогичная независимость наблюдается и при пластической деформации.

Незначительное изменение величины магнитного поля нормальной компоненты H_n магнитного поля рассеяния по длине образца, вероятно, можно объяснить влиянием размагничивающего фактора, а точнее фактора формы.

Вывод. Используя метод контроля, основанный на намагниченности ОК в магнитном поле Земли в результате циклических нагрузок, можно судить лишь о наличии нагрузок, превышающих пределы упругости. Однако при этом нужно знать топографию поля до нагружения. Также необходимо учитывать такие факторы, как ориентация объекта контроля в магнитном поле Земли, влияние размагничивающего фактора.

Список литературы

1. Кулеев В.Г., Ригмант М.Б. //Дефектоскопия. – 1994. № 9. – С. 79-91.
2. Кулеев В.Г., Ригмант М.Б.// ФММ. – 1995. – Т.79. – Вып.1. – С. 120-129.
3. Кулеев В.Г., Лопатин В.В. // Журнал технической физики. – 2003. – Т.73. – Вып.12.
4. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические применения. – М.: Наука, 1987. – 160 с.

УДК 621.783.223:65.011.56

С.М. Андреев, М.С. Галдин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Математическое моделирование процессов нагрева и охлаждения изделий из сталей разных марок широко распространено при исследовании процессов в металлургической теплотехнике. Учет зависимости теплофизических свойств стали от температуры позволяет повысить точность расчета тепловых полей в массивных телах. К основным свойствам, требующим учета при моделировании процессов, относятся: теплопровод-

ность λ , истинная теплоемкость C , коэффициент линейного расширения - α_t и плотность стали ρ .

В [1] Маковским В.А. предложен вид аналитических зависимостей для определения основных теплофизических характеристик различных групп сталей от температуры, коэффициенты которых варьировались в зависимости от группы сталей.

Зависимости истинной теплоёмкости, $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right]$, теплопроводности, $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \right]$ и коэффициента линейного расширения от температуры, $\left[\frac{1}{\text{град}} \right]$ выражается регрессионными уравнениями соответственно (1-3):

$$C(t) = C_0 + A_1 \left(\frac{t}{1000} \right)^n + A_2 \exp(-A_3 \cdot |t - t_c|), \quad (1)$$

где t – температура, °С; $C_0, A_1, A_2, A_3, t_c, n$ – постоянные коэффициенты, зависящие от марки стали;

$$\lambda(t) = \lambda_0 + B_1 \left(\frac{t}{100} \right) - \frac{B_2}{\text{ch}(B_3 \cdot [(t - t_\lambda) / 100])}, \quad (2)$$

где $\lambda_0, B_1, B_2, B_3, t_\lambda$ – постоянные коэффициенты;

$$\alpha_t(t) \cdot 10^{-6} = \alpha_0 + Z_1 \left(\frac{t}{1000} \right) - \frac{Z_2}{\text{ch}[Z_3 \cdot ((t - t_\alpha) / 100)^2]}, \quad (3)$$

где °С; $\alpha_0, Z_1, Z_2, Z_3, t_\alpha$ – постоянные коэффициенты.

В некоторых случаях при моделировании процессов нагрева и охлаждения требуется определить коэффициенты этих уравнений для конкретной марки стали, для которой известны экспериментальные данные теплофизических коэффициентов для разных температур, например приведенные в [2 – 5].

Для определения коэффициентов уравнений (1) – (3) был сформирован квадратичный функционал общего вида:

$$I = \sum_{i=1}^n \left[R_i^*(t) - R_i(t) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $R_i^*(t)$ - экспериментальное значение теплофизического значения при температуре t ; $R_i(t)$ – расчетное значение теплофизи-

ческого коэффициента при температуре t ; n – число экспериментальных значений.

Задача определения коэффициентов уравнений (1) – (3) сводится к поиску таких значений коэффициентов этих уравнений, чтобы функционал (4) принимал наименьшее значение.

Данная задача может быть представлена функционалом, значения которого зависят только от величины коэффициентов входящих в уравнения (1) – (3):

$$J = f(K_1 \dots K_m) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $K_1 \dots K_m$ – общее представление коэффициентов, входящих в уравнения (1-3); m – количество неизвестных коэффициентов в уравнении.

В качестве метода поиска коэффициентов уравнений можно использовать один из методов прямого поиска нескольких переменных [6], например симплекс метод Нелдера – Мида, в котором в качестве искомым переменных будут выступать коэффициенты $K_1 \dots K_m$.

Расчет коэффициентов уравнения зависимости величины теплоемкости стали от температуры в связи со значительной нелинейностью производился для двух участков – до и после температуры фазового перехода.

В табл. 1 представлены величины коэффициентов C_0 , A_1 , A_2 , A_3 , t_0 , n для сталей нескольких марок, причем при $t < t_0$ значение соответствует величине в числителе, при $t > t_0$ – в знаменателе дроби.

На рис. 1, 2 представлены кривые (сплошные линии) для различных марок сталей и железа, построенные по регрессионному уравнению (1), для сравнения точками на графиках показаны действительные значения теплоёмкостей [3, 4].

В табл. 2 приведены коэффициенты уравнения (2), рассчитанные для нескольких групп марок стали.

Таблица 1

Коэффициенты регрессионного уравнения для расчёта теплоёмкости для различных сталей и железа

Сталь	C_0	A_1	n	A_2	A_3	t_c
Ст20	0,49	0,744	1,94	6,13	0,081	755
	0,835	-0,167	0,12	6,25	0,156	
Ст40	0,478	0,544	1,58	6,52	0,11	745
	-3,965	4,57	0,075	9,647	0,15	

Окончание таблицы 1

Сталь	C_0	A_1	n	A_2	A_3	t_c
30Г	$\frac{0,529}{0,61}$	$\frac{9,79}{0,05}$	$\frac{5,4}{0,56}$	$\frac{5,26}{6,41}$	$\frac{0,061}{0,261}$	630
	Fe	0,42	0,36	0,61	–	

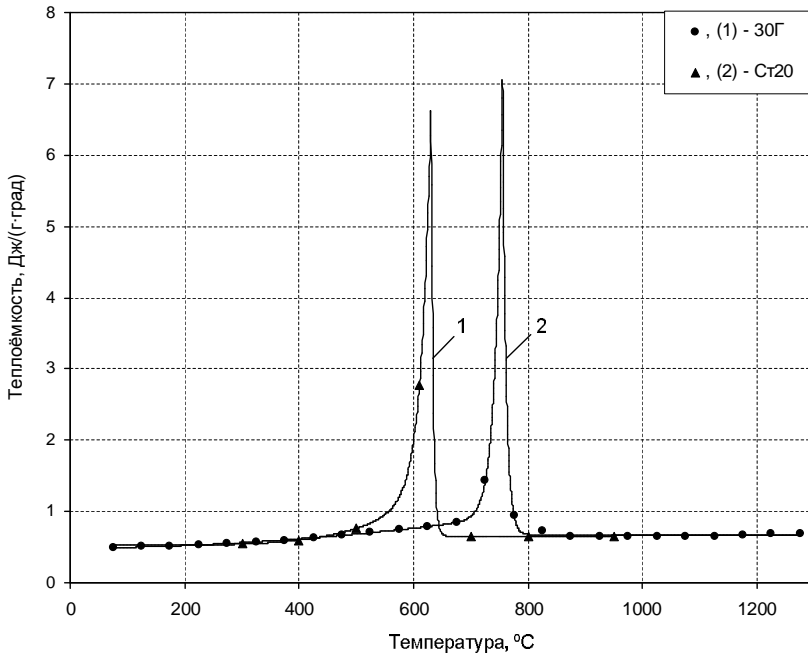


Рис. 1. Зависимость величины истинной теплоёмкости сталей Ст20 и 30Г от температуры (точками показаны экспериментальные значения)

Таблица 2

Коэффициенты регрессионного уравнения для расчёта теплопроводности для различных групп марок сталей

Группа марок стали	λ_0	B_1	B_2	B_3	t_λ
Малоуглеродистые 0,05-0,2% [C]	67,38	-0,758	32,49	0,21	943
Среднеуглеродистые 0,2-0,6% [C]	51,63	-1,463	13,07	0,483	852,12

Группа марок стали	λ_0	B_1	B_2	B_3	t_λ
Высокоуглеродистые 0,6-1,3% [C]	49,47	-0,975	16	0,34	827,67
Низколегированные 0,7-1,1% [Cr]	55,06	0,493	37,96	0,189	1078,19
Хромоникелевые 15-22% [Cr], 8-15% [Ni]	14,54	1,698	3,74	0,713	1225,53

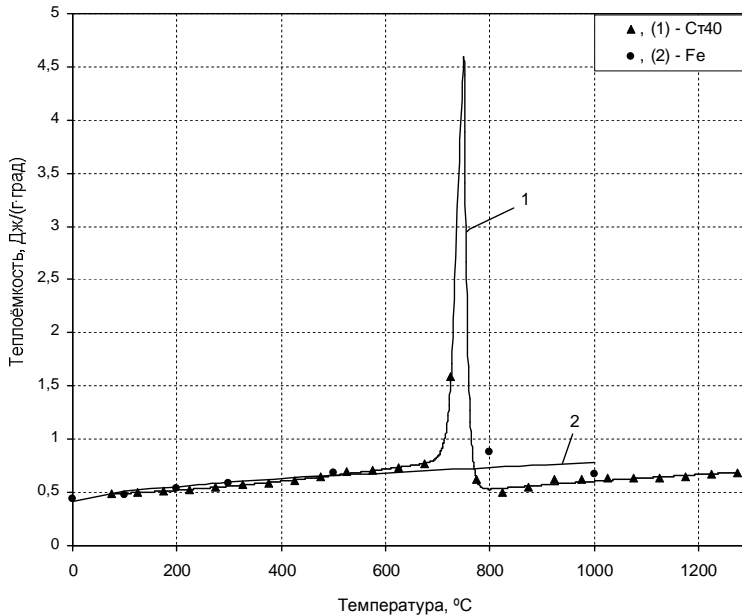


Рис. 2. Зависимость величины истинной теплоёмкости стали Ст40 и железа от температуры (точками показаны экспериментальные значения)

На рис. 3 показано сравнение результатов регрессионной модели расчета величины теплопроводности (сплошные линии) с экспериментальными данными [2].

В табл. 3 представлены величины коэффициентов уравнения (3) для различных групп марок сталей.

На рис.4 изображены зависимости величины линейного расширения для различных групп марок сталей, рассчитанные по формуле (3) (точками показаны экспериментальные данные [5]).

Для тепловых полей также удобно пользоваться другим теплофизическим параметром – коэффициентом температуропроводности, $\left[\frac{10^{-6} \cdot \text{м}^2}{\text{град}} \right]$, который определяется по формуле:

$$a(t) = \frac{\lambda(t)}{C(t) \cdot \rho(t)}, \quad (6)$$

где $\rho(t)$ – плотность стали, кг/м^3 ; $C(t)$, $\lambda(t)$ – теплоёмкость и теплопроводность металла, которые определяются по формулам (1) и (2) соответственно.

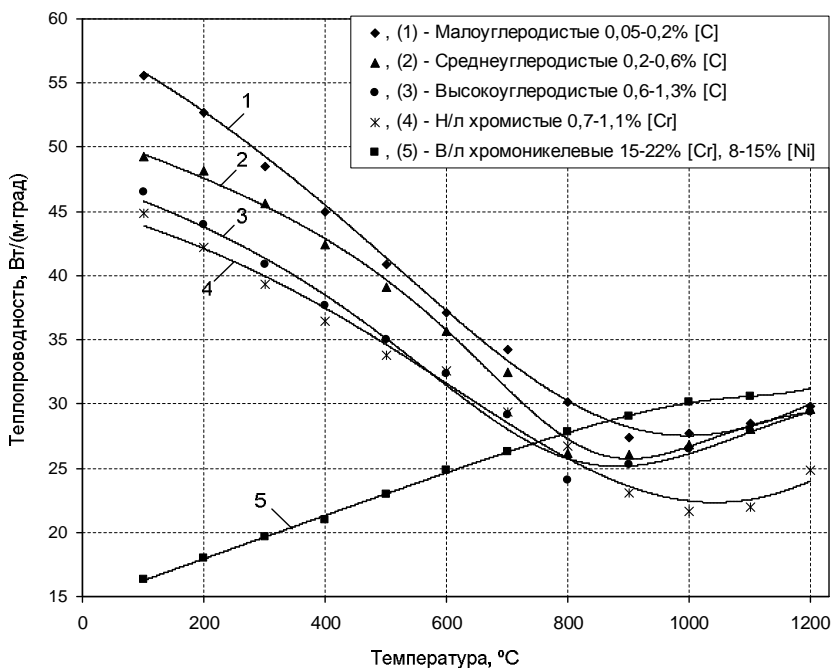


Рис. 3. Зависимость величины теплопроводности сталей от температуры (экспериментальные значения показаны точками)

Таблица 3

Коэффициенты регрессионного уравнения для расчёта величины линейного расширения для различных групп марок сталей

Группа марок стали	α_0	Z_1	Z_2	Z_3	t_α
Малоуглеродистые 0,05-0,2% [C]	10,91	6,355	4,2	0,52	928,3
Среднеуглеродистые 0,2-0,6% [C]	10,58	6,68	4,58	0,596	900,82
Высокоуглеродистые 0,6-1,3% [C]	10,24	7,1	3,12	0,57	889,4

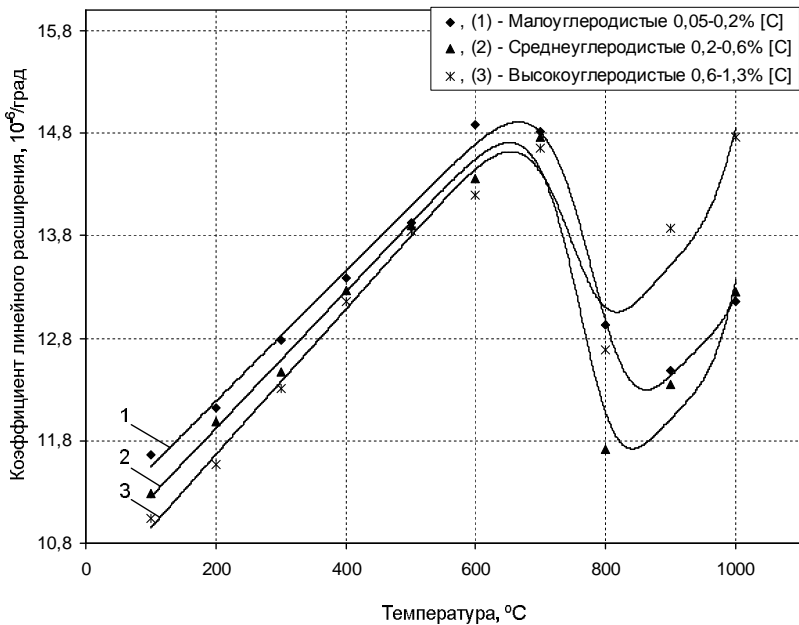


Рис. 4. Зависимость величины линейного расширения разных групп сталей в зависимости от температуры (точками показаны экспериментальные значения)

На рис. 5 построены графики расчетных зависимостей величины температуропроводности для сталей марок: Ст20, Ст40,

30Г. Для сравнения на этом же рисунке приведены экспериментальные величины коэффициента температуропроводности при разных температурах для стали Ст20 [5]. При вычислениях $\rho(t)$ значения плотностей стали при $t=20^{\circ}\text{C}$ были приняты из [5].

Плотность стали определялась по формуле [1], $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$:

$$\rho(t) = \rho_{20} \frac{1}{1 + 3 \cdot \alpha_t \cdot (t - 20)}, \quad (7)$$

где ρ_{20} – плотность стали при $t=20^{\circ}\text{C}$.

Из графиков рис. 1-5 видно, что для большинства марок стали зависимость теплофизических параметров от температуры имеет существенно нелинейный вид. Точка перегиба находится в диапазоне температур от 700 до 900 °С. В этом диапазоне температур происходит резкое изменение свойств стали в связи с перестройкой кристаллической решетки.

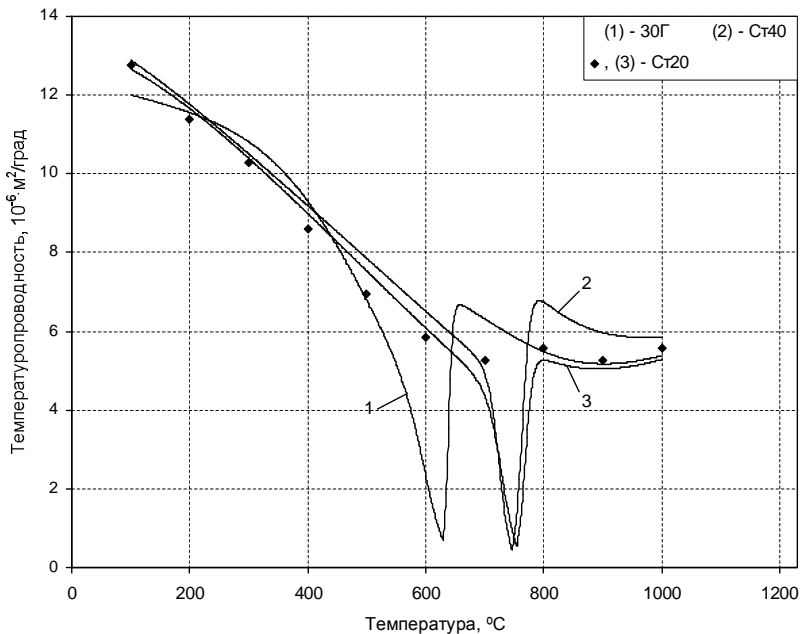


Рис. 5. Коэффициент температуропроводности для различных марок сталей (точками показаны экспериментальные значения для стали Ст20)

Также при значениях температуры выше этой величины резко повышается пластичность стали. Это позволяет, в частности, при проведении вычислительных экспериментов по термообработке стальных изделий не учитывать термонапряжения возникающие в процессе нагрева или охлаждения при температурах выше температуры фазового перехода [7] и возникновения разрушающих напряжений, появляющихся в результате температурного перепада по сечению тела.

Список литературы

1. Маковский В.А., Лаврентик И.И. Алгоритмы управления нагревательными печами. – М.:Металлургия, 1977. –184 с.
2. Справочник конструктора печей прокатного производства / А.Л. Бергауз, В.Л. Гусовский, Н.И. Иванова. Т. I. М.: Металлургия, 1970. С. 204-205.
3. Шмыков А.А. Справочник термиста. – М.: Машгиз, 1961. С. 14.
4. Теплофизические свойства веществ: справочник / под ред. Н.Б.Варгафтика. – Л.: гос. энерг. изд-во, 1956.
5. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Металлургия, 1962. – С. 549, 552-553.
6. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. - М.:Радио и связь, 1988. – С.76.
7. Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Учет ограничений по термонапряжению при энергосберегающем нагреве непрерывно литых заготовок // Изв. вузов. Черная металлургия – 2003. – №4. – С.58-62.

УДК 621.778.01

Гасияров В.Р., Усатый Д.Ю.
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ ПРОКАТА ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА 5000

Регулирование толщины листа в процессе прокатки является одной из важнейших задач управления электрическими и гидравлическими приводами нажимных устройств станов горячей прокатки. Этот процесс приобретает особое значение при прокатке толстого и широкого листа, в том числе в условиях введенного в эксплуатацию на промплощадке ОАО «ММК» стана 5000. В настоящей статье проводится описание системы автоматического регулирования толщины (САРТ) полосы этого стана.

Все известные и применяемые в настоящее время САРТ [1-3] строятся по принципу косвенного регулирования толщины на основе известного уравнения Головина-Симса [4]:

$$h = S + \frac{P}{M_K}, \quad (1)$$

где h – толщина полосы на выходе из клетки; S – величина межвалкового зазора; P – давление металла на валки; M_K – модуль жесткости клетки.

В общем случае принцип работы САРТ косвенного типа может быть пояснен рис. 1 [5]. Толщина металла в процессе прокатки изменяется от величины H , на входе в клетку, до h_S , на выходе из нее. Прямая 1 соответствует упругой деформации клетки (составляющая P/M_K в уравнении (1)). Зависимость давления от толщины характеризуется кривой 2. В точке «А» соблюдается условие равновесия. Если под влиянием технологических факторов давление металла на валки возрастает от величины P_A до $P_{B<$, возникает приращение толщины полосы δh . Для компенсации отклонения толщины δh первоначальный межвалковый зазор S_0 должен быть изменен на величину ΔS_0 за счет действия САРТ. Теперь условие равновесия будет выполняться

в точке “B” и характеризоваться зависимостью

$$\Delta S_0 = \frac{\Delta P_0}{M_K}, \quad (2)$$

которая и является основным законом регулирования в САРТ.

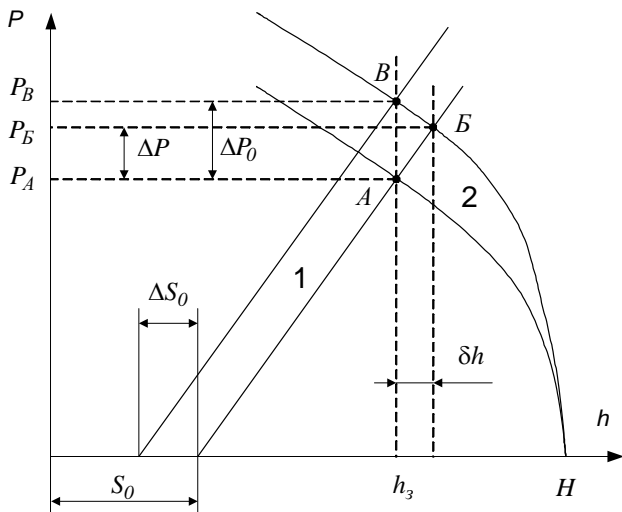


Рис. 1. Принцип действия САРТ косвенного типа, реализующая зависимость Головина – Симса:
1 – линия упругой деформации клетки; 2 – кривая упруго-пластической деформации металла

САРТ стана 5000 горячей прокатки имеет в своем составе высокоточные датчики положения нажимных устройств, усилия прокатки и давления металла на валки, что обеспечивает точность поддержания толщины полосы в пределах ± 4 мкм. Большинство систем, реализующих косвенное регулирование толщины полосы, обеспечивает компенсацию упругого растяжения клетки за счет перемещения поршня гидравлического нажимного устройства, прокатная клетка при этом ведет себя как бесконечно жесткая. Для оптимального использования точности цифровых датчиков и высоких динамических характеристик сервоклапанов нового поколения в основных контурах давления и положения используется непосредственное цифровое управление. Управление нажимными устройствами реализуется с помощью многопроцессорного контроллера.

Схема регулятора толщины показана на рис. 2. На вход регулятора толщины поступает задание на толщину и обратная связь, полученная с датчиков положения нажимных устройств и датчика усилия прокатки. Регулятор толщины (РТ) имеет переменные коэффициенты усиления, зависящие от упругой деформации клетки и полосы. Коэффициенты усиления интегральной и пропорциональной составляющих определяются по зависимостям:

$$K_i = \left(\frac{M_{\Pi}}{M_K} + 1 \right) \cdot \frac{1}{T_{РТ}}; \quad (3)$$

$$K_p = \left(\frac{M_{\Pi}}{M_K} + 1 \right) \cdot \frac{T_{Г}}{T_{РТ}}, \quad (4)$$

где $T_{Г}$ – постоянная времени замкнутого контура положения гидронажимного устройства, $T_{Г} = 0,01$ с; $T_{РТ}$ – желаемая постоянная времени регулятора толщины, $T_{РТ} = 0,045$ с; M_{Π} – модуль жесткости полосы, M_K – модуль жесткости клетки.

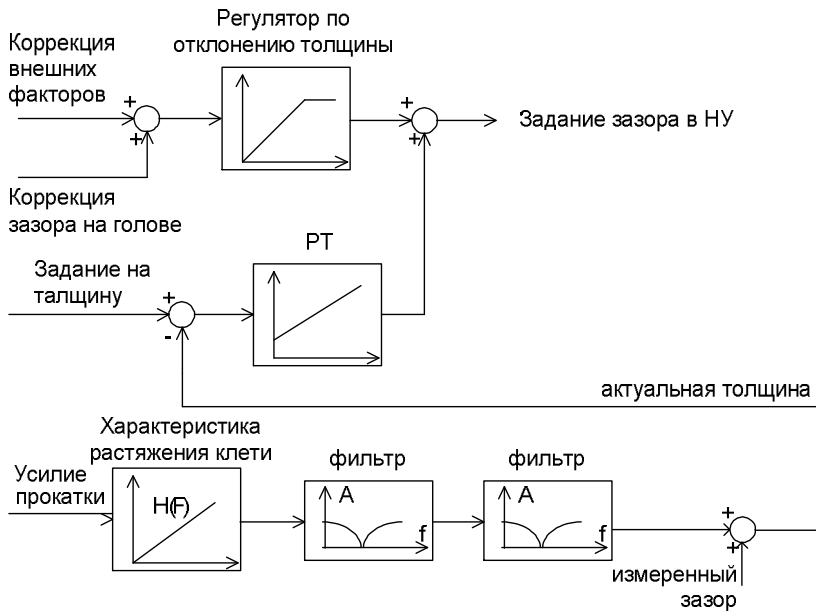


Рис. 2. Структурная схема регулятора толщины на стане 5000 ОАО “ММК”

Модуль жесткости полосы рассчитывается по выражению (6), в зависимости от ожидаемого усилия прокатки и обжатий (рассчитываемого математической моделью прокатки). Модуль жесткости клетки рассчитывается исходя из кривой растяжения клетки.

Для решения вопроса об определении кривой растяжения клетки был проведен ряд экспериментов на толстолистовом стане 5000 ОАО “ММК”. В результате чего была снята кривая растяжения клетки, приведенная на рис. 3. Экспериментально полученная линейная зависимость отражает общую тенденцию изменения растяжения клетки Δh . Величина достоверности аппроксимации R^2 показывает, какое число точек из представленной выборки находится на данной кривой: чем больше R^2 , тем полнее отражается динамика изменения параметра аппроксимации. В данном случае достоверность составляет 99,9%. Зависимость $\Delta h = f(P)$ примет вид:

$$\Delta h = 0,0001 \cdot P - 2,763. \quad (5)$$

Модуль полосы рассчитывается по формуле:

$$M_{\Gamma} = 1,75 \cdot \frac{P}{h_0 - h_1}, \quad (6)$$

где P – ожидаемое усилие прокатки; h_0 – толщина листа до прокатки; h_1 – толщина после прокатки.

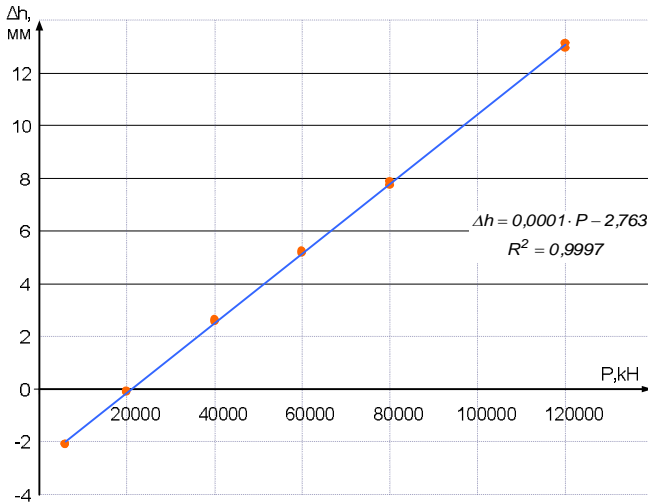


Рис. 3. Зависимость растяжения клетки от усилия

Для фильтрации эксцентриситета валков применяются режекторные фильтры с частотой фильтрации, зависящей от скорости вращения рабочих и опорных валков. Сумма сигнала регулятора и компенсации различных возмущений подается в качестве дополнительного задания на зазор. Для точной настройки межвалкового зазора в САРТ используется компенсация различных внешних факторов, влияющих на толщину, таких как масляная пленка в подшипнике, тепловое расширение вала, износ вала и др.

Список литературы

1. Hydraulic automatic gauge control // Davy McKee (Sheffield) Ltd. 1987. P.9 (англ.).
2. Системы прецизионного регулирования геометрических параметров горячеполосового проката / Русаев В.И., Гринчук П.С., Чабанов А.И. и др. // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. – 1975. – Вып. 9 (44). – С. 27-37.
3. High accuracy in the plate mill / Masao T., Yasuyuki N., Kazuo O., Sunao T. // Int. Conf. of Steel, 1980. P.331-343 (англ).
4. Фомин Г.Г., Дубейковский А.В., Гринчук П.С. Механизация и автоматизация широкополосных станов горячей прокатки. – М.: Металлургия, 1979. – 232 с.
5. Повышение точности листового проката / Меерович И.М., Герцев А.И., Горелик В.С. и др. – М.: Металлургия, 1969. – 264 с.

УДК 681.3

**В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов,
Т.В. Гладких, О.В. Пилипенко**
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Разработка систем управления сложными технологическими процессами часто связана с решением трудоемких задач обработки поступающей измерительной информации и синтеза на ее основе законов управления

технологическими агрегатами. Современное направление развития таких систем – создание интеллектуальных систем управления, которые являются, по своей сути, экспертными системами мониторинга, управления и диагностики на основе проблемно ориентированных программно-аппаратных комплексов. Наиболее эффективны эти комплексы при разработке специализированных аппаратных средств. В настоящее время при проектировании таких аппаратных средств широко используются различные системы автоматизированного проектирования. Каждая из таких систем имеет свои преимущества и недостатки. При этом все они решают свои конкретные задачи, свойственные данной системе. В связи с тем, что современные проектируемые системы имеют достаточно сложную структуру и большие функциональные возможности, то для их разработки необходимо применять и соответствующие системы. Однако часто даже универсальные системы не могут охватить все стороны работы проектируемых блоков. Кроме того, такие системы достаточно сложны в эксплуатации. В связи с этим целесообразно в имеющиеся системы автоматизированного проектирования встраивать отдельные подсистемы, которые целенаправленно расширяют их функциональные возможности и позволяют более полно учитывать особенности проектируемых на современной элементной базе устройств.

Одной из современных систем, которая может быть успешно использована при проектировании устройств, выполненных на быстродействующей элементной базе, является система на основе K -значного дифференциального исчисления [1, 2], где K – простое число. Она позволяет при выполнении проектирования моделировать структуру с K -значным представлением сигналов, основанном на квантовании по амплитуде и времени логических сигналов и процессов их переключения из одного устойчивого состояния в другое. При этом имеется возможность выявлять риски сбоев, например, связанные с некорректным переходом из уровня логического "нуля" в состояние логической "единицы" и наоборот, и т.д. Однако в разработанной системе процесс выявления рисков сбоев не автоматизирован. В связи с этим предлагается усовершенствовать рассматриваемую систему с помощью отдельного модуля, который автоматизирует выполнение диагностики переключательных процессов с использованием K -значной нейронной сети.

Эта сеть представляет собой модификацию нейронной сети Хебба (рис. 1), которая имеет n входных и m выходных биполярных или бинарных нейронов.

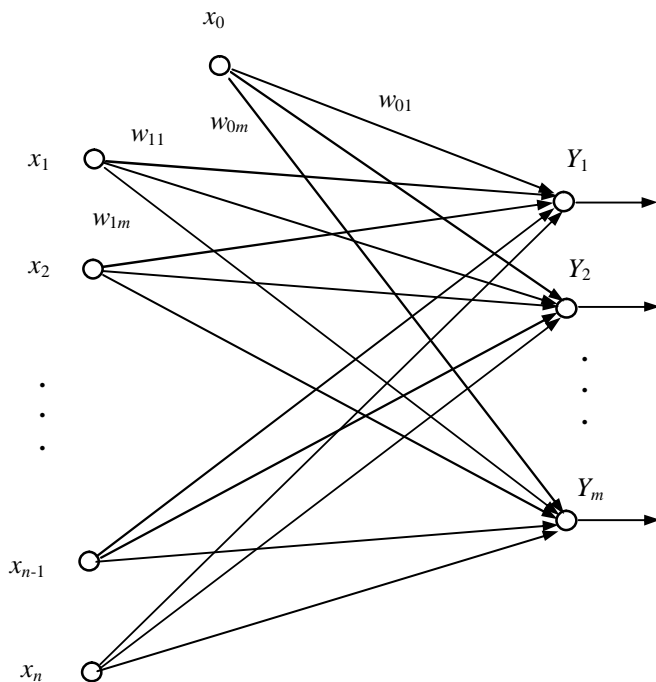


Рис. 1. Нейронная сеть Хебба

При биполярном представлении сигналов обучение нейронной сети выполняется с помощью следующего алгоритма [3, 4]:

Шаг 1. Задается множество $M = \{(S^1, Y^1), \dots, (S^p, Y^p)\}$, состоящее из пар: входное изображение $S^l = (S_1^l, \dots, S_n^l)$, требуемый вектор $Y^l = \{y_1^{l \text{ треб}}, \dots, y_m^{l \text{ треб}}\}$ выходных сигналов нейронов Y_1, \dots, Y_m , где p – число входных изображений; n – число биполярных компонент входных изображений; $l = \overline{1, p}$. Иницируются веса связей нейронной

сети: $w_{ji} = 0$, $j = \overline{0, n}$, $i = \overline{1, m}$, где w_{0i} – вес связи смещения нейрона Y_i , $i = \overline{1, m}$.

Шаг 2. Каждая пара $\{S^l, Y^l\}$ множества M проверяется на правильность реакции нейронной сети на предъявленное изображение. Если полученный вектор выходных сигналов (y_1^l, \dots, y_m^l) нейронов Y_i ($i = \overline{1, m}$) отличается от требуемого $(y_1^{l \text{ треб}}, \dots, y_m^{l \text{ треб}})$, то происходит коррекция весов связей сети с помощью шагов 3 и 4 алгоритма.

Шаг 3. Иницируется множество входов и выходов нейросети:

$$x_0 = 1, x_j = S_j^l, j = \overline{1, n}; U_{\text{вых } Y_i} = y_i^{l \text{ треб}}, i = \overline{1, m}.$$

Шаг 4. Корректируются веса связей сети по правилу

$$w_{ji}(\text{new}) = w_{ji}(\text{old}) + x_j \cdot U_{\text{вых } Y_i}, j = \overline{0, n}; i = \overline{1, m}.$$

Шаг 5. Проверяются условия останова. Обычно их задают два. Первое – правильность функционирования нейронной сети при предъявлении каждого обучающего изображения. Второе – достижение заданного числа эпох обучения сети. При выполнении первого условия обучение сети выполнено. Во втором случае обучение сети выполнить не удалось и требуется анализ причин неудачного обучения. Если не выполняется первое условие, то переход к шагу 2 алгоритма. Если выполняется первое или второе условие, то вычисления прекращаются (переход к шагу 6 алгоритма).

Шаг 6. Останов.

В предлагаемой нейронной сети используются не двоичные, а K -значные нейроны, выходные сигналы которых могут принимать значения из следующего множества: $\{0, 1, 2, \dots, K-2, K-1\}$. Очевидно, значность нейронов в K -значной нейронной сети должна соответствовать значности системы моделирования. В этом случае сеть позволяет автоматизировать процесс выявления рисков сбоев, которые могут возникать при функционировании вычислительных устройств. Обучаемая таким образом K -значная нейронная сеть

применялась для выявления "узких" мест в проектируемых вычислительных устройствах, в которых при неблагоприятных условиях могут возникнуть сбои.

При исследовании работоспособности цифровых вычислительных устройств часто используют тринадцать видов сигналов [5]: сигнал вида "_0" соответствует статическому сигналу нулевого уровня, значение "_1" – значению уровня статической "единицы". Далее "_A" соответствует переходу из нуля в неопределенность, "_B" – переходу из единицы в неопределенность, "_E" – гладкому переходу из нуля в единицу, "_F" – динамическому риску сбоя при переключении из нуля в единицу, "_H" – гладкому переходу из единицы в нуль, "_I" – переходу из неопределенности в единицу, "_L" – динамическому риску сбоя при переключении из единицы в нуль, "_P" – статическому риску сбоя в нуле, "_O" – переходу из неопределенности в нуль, "_V" – статическому риску сбоя в единице, "_X" – неопределенности. При K -значном представлении сигналов цифровых устройств получим следующие 13 видов сигналов и сбоев: сигнал вида "_0 $_K$ " – соответствует статическому бинарному сигналу нулевого уровня, значение "_ $K - 1$ " – значению уровня статической бинарной "единицы", "_ $(K - 1)/2$ " – значению неопределенности "_X $_K$ " при бинарном представлении сигналов, "_A $_K$ " – соответствует переходу из нуля в неопределенность "_ $(K - 1)/2$ ", "_B $_K$ " – переходу из "_ $(K - 1)$ " в неопределенность "_ $(K - 1)/2$ ", "_E $_K$ " – переходу из нуля в "_ $(K - 1)$ ", "_F $_K$ " – динамическому риску сбоя при переключении из нуля в "_ $(K - 1)$ ", "_H $_K$ " – нормальному переходу из $(K - 1)$ в нуль, "_I $_K$ " – переходу из неопределенности "_ $(K - 1)/2$ " в $(K - 1)$, "_L $_K$ " – динамическому риску сбоя при переключении из $(K - 1)$ в нуль, "_P $_K$ " – статическому риску сбоя в нуле, "_O $_K$ " – переходу из неопределенности "_ $(K - 1)/2$ " в нуль, "_V $_K$ " – статическому риску сбоя в $(K - 1)$.

Каждый из процессов переключения из одного устойчивого состояния в другое характеризуется формой кривой переключения и ее длительностью. Кроме того, эта кривая переключения может сдвигаться во времени в зависимости от времени задержки на логическом элементе. Сбойный процесс переключения заключается в искажении кривой переходного процесса за счет дополнительных всплесков или провалов в процессе переключения и за счет увеличения длительности переходного процесса. Для распознавания сигналов и процессов,

возникающих в процессе моделирования цифровых устройств, было предложено использовать сеть с архитектурой сети Хебба, но с K -значными нейронами, т.е. с нейронами, выходные сигналы которых принимают значения из множества $\{0, 1, 2, \dots, K-2, K-1\}$, а функция активации имеет вид, приведенный на рис. 2.

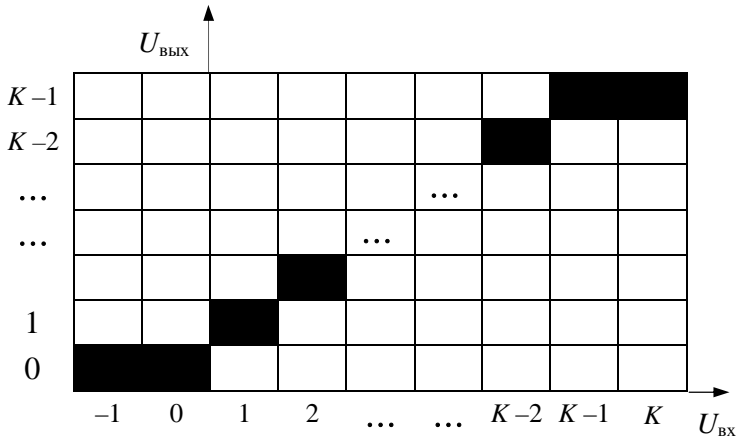


Рис. 2. K -значная функция активации нейронов сети

Поскольку выражение (1) непосредственно невозможно использовать для обучения рассматриваемой K -значной нейронной сети из-за того, что сигналы x_j и $U_{\text{ВЫХ}} Y_i$ не принимают отрицательных значений, то было предложено модифицированное правило Хебба:

$$w_{ji}(\text{new}) = w_{ji}(\text{old}) + \eta f(y_j^{\text{треб}} - y_j^{\text{тек}}),$$

В приведенных соотношениях $w_{ji}(\text{new})$, $w_{ji}(\text{old})$ – соответственно новые и текущие веса связей сети; $y_j^{\text{треб}}$, $y_j^{\text{тек}}$, ($j = \overline{1, m}$) – соответственно требуемые и текущие сигналы на выходах нейронов; η – коэффициент, в общем случае отличный от единицы.

При этом

$$f(y_j^{\text{треб}} - y_j^{\text{тек}}) = \begin{cases} 1, & \text{если } y_j^{\text{треб}} > y_j^{\text{тек}} \text{ и } x_i > 0; \\ 0, & \text{если } y_j^{\text{треб}} = y_j^{\text{тек}} \text{ или } x_i = 0; \\ -1, & \text{если } y_j^{\text{треб}} < y_j^{\text{тек}} \text{ и } x_i > 0. \end{cases}$$

Целесообразно, чтобы каждому j -му ($j = \overline{1, 13}$) рассматриваемому входному процессу на выходе нейронной сети соответствовали выходные K -значные сигналы $U_{\text{вых}Y_j} = (K-1)$, $U_{\text{вых}Y_k} = 0$, $k = \overline{1, 13}$, $k \neq j$. K -значная нейронная сеть Хебба в этом случае должна иметь на выходе тринадцать K -значных Y -нейронов, каждый из которых может иметь выходной сигнал от нуля до $K-1$. В зависимости от длительности T интервала времени, на котором анализируется последовательность переключения сигналов вычислительного устройства, на входе такой сети может быть различное число нейронов. При тринадцати видах распознаваемых сигналов и $T = 12$ имеем $n = 12$, $m = 13$.

Сеть может быть обучена распознаванию сигналов и процессов переключения при любом K . Рассмотрим обучение сети распознаванию тринадцати классов семизначных сигналов. Для каждого класса были сформированы обучающие множества изображений. На рис. 3 приведено два изображения нормального переключения из единицы в нуль в семизначном алфавите.

На рис. 4 – изображения переключений из единицы в нуль при динамическом риске сбоя. В таблице приведены процессы для обучения нейронной сети распознаванию процессов, которые порождают риски сбоев при переключении сигнала из логической единицы ($K-1$) в нуль (при $K = 7$).

Каждый класс сбоев задается множеством обучающих процессов на заданном временном интервале.

Обучение K -значной нейронной сети выполнялось с помощью модифицированного алгоритма Хебба. Последующая проверка результатов обучения на новых данных показала, что нейронная сеть правильно распознает свыше 90% сигналов, которые могут приводить к сбоям последующих элементов цифрового устройства.

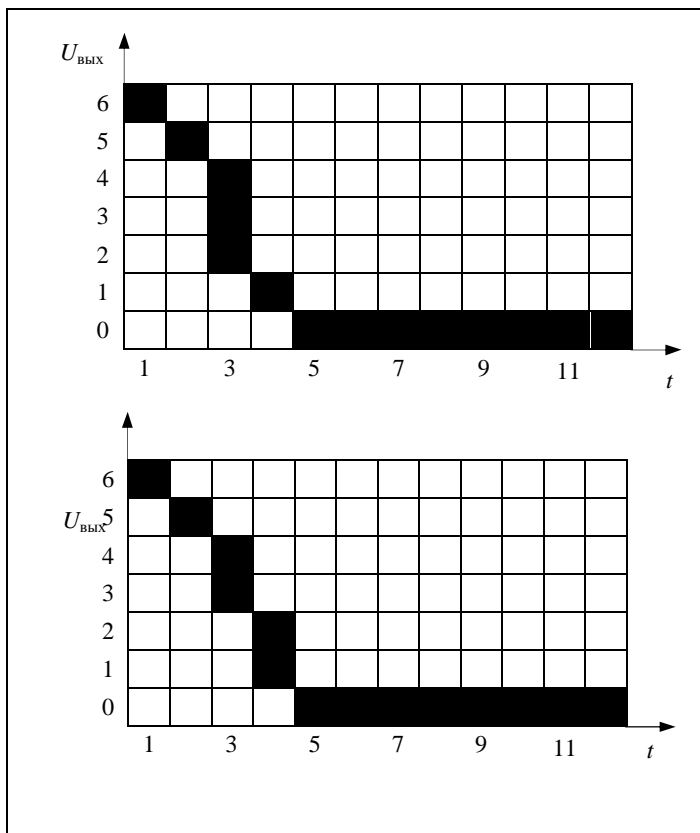


Рис. 3. Примеры процессов нормального переключения сигналов из $K-1$ (логической единицы) в нуль

Выводы. Таким образом, для системы проектирования цифровых устройств на основе K -значного дифференциального исчисления разработан модуль, автоматизирующий процесс выявления сигналов, приводящих к появлению рисков сбоев в моделируемых вычислительных устройствах. Модуль реализован на K -значной однослойной нейронной сети, обучаемой с помощью модифицированного алгоритма Хебба. Его использование в системе проектирования повысит надежность вычислительных средств для управления технологическими процессами.

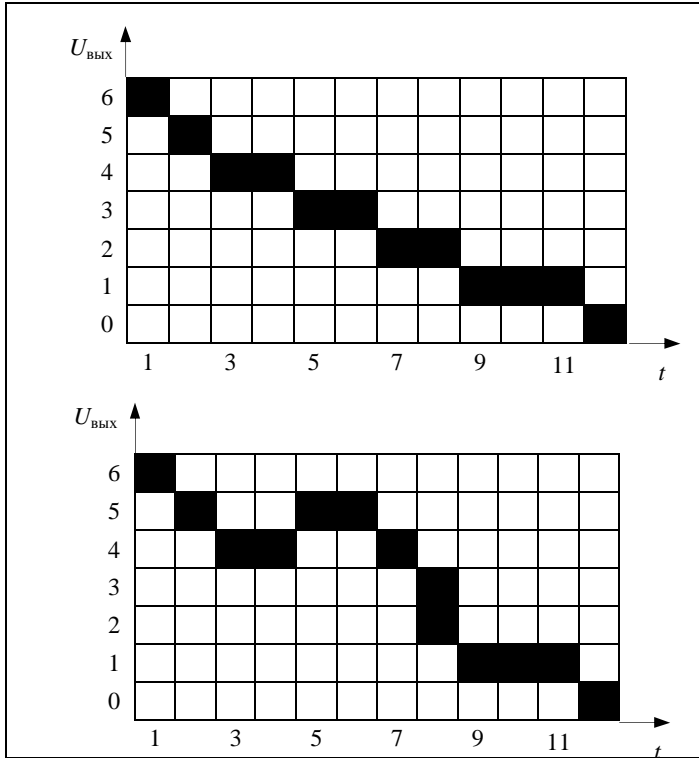


Рис. 4. Примеры процессов переключения сигналов из $K-1$ (логической единицы) в нуль, которые могут приводить к сбоям

$t \backslash V$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V1	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0
V2	6	5	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0
V3	6	5	4	3	4	4	3	2	1	0	0	0
V4	6	5	5	4	4	3	3	2	2	1	1	0
...												
V_k	6	5	4	4	3	3	4	4	3	2	1	0

Список литературы

1. К-значное дифференциальное исчисление и моделирование цифровых устройств / В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов. – Харьков: "Транспорт Украины", 1999. – 223 с.
2. Гладких Т.В. Верификация динамических параметров электронных устройств на основе К-значного дифференциального исчисления: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Харьков, 2007. – 341 с.
3. Fausett I. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications. – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 P.
4. Основы теории нейронных сетей: учеб. пособие / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов. – Белгород: БИИММАП, 2001. – 159 с.
5. Aktouf C. A complete strategy for testing an on-chip multiprocessor architecture // IEEE Design & Test of Computers. – 2002. – Issue:1. – P. 18 – 28.

УДК 662.869: 65.011.056

О.А. Брайчук

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ АО «ССГПО»

Обеспечение оптимальной — наилучшей в некотором смысле — работы объекта регулирования становится в настоящее время одной из центральных задач при автоматизации производственных процессов.

САР не может решить задачу оптимизации. Это происходит потому, что в обычной САР всегда известно заданное значение регулируемого параметра и, следовательно, всегда известно, в каком направлении необходимо изменять регулирующее воздействие, чтобы ликвидировать ошибку системы: разность между заданным и текущим значением регулируемого параметра [1].

Задача оптимизации возникает при автоматизации работы в замкнутом цикле шаровой мельницы типа МШЦ 3600х5000

производительностью 260 т/ч в АО «Соколовско-Сарбайское горно-производственное объединение» (АО «ССГПО») Республики Казахстан. Технологическая схема замкнутого цикла шаровой мельницы представлена на рис. 1.

Актуальность оптимизации заключается в увеличении производительности и снижении трудоемкости работы.

Экспериментальная статическая характеристика процесса измельчения железной руды в АО ССГПО представлена на рис. 2 в координатах «производительность-соотношение руда/вода».

Управляемой величиной является производительность мельницы, которая при оптимальных условиях достигает 260 т/ч, управляющей – плотность пульпы, регулируемая контуром стабилизации по расходу воды, расход руды постоянен.

При дальнейшем увеличении питания производительность цикла снижается и процесс измельчения ухудшается, вызывая рост циркулирующей нагрузки в агрегате, работающем в замкнутом цикле.

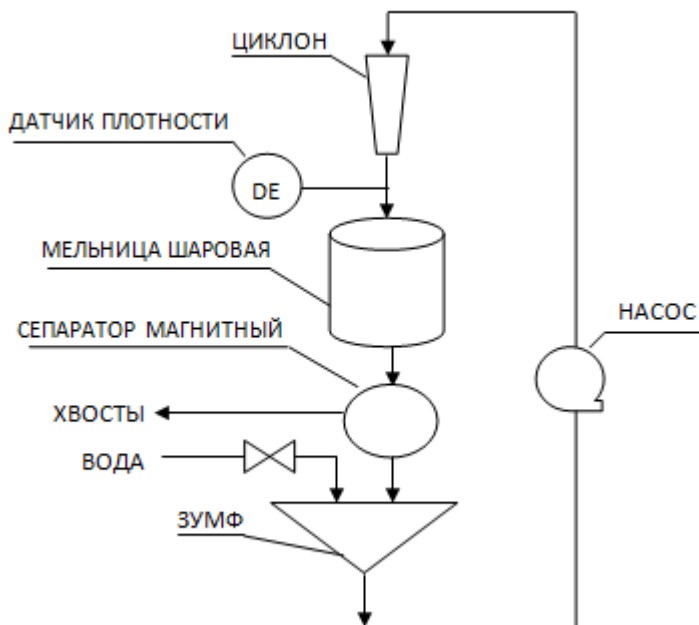


Рис. 1. Технологическая схема замкнутого цикла измельчения

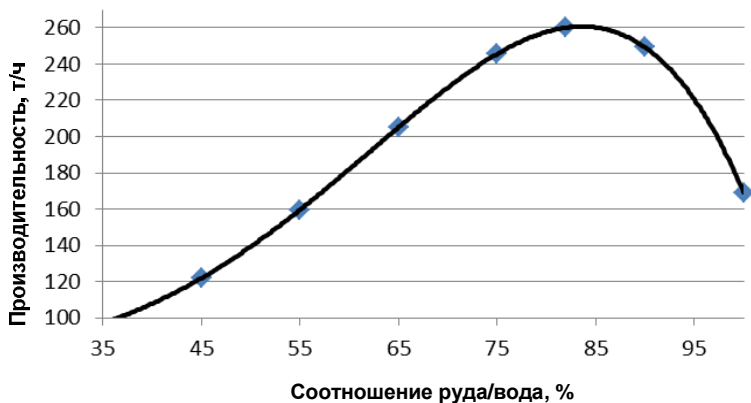


Рис. 2. Экспериментальная статическая характеристика процесса измельчения руды на мельнице шарового типа

Для того чтобы СЭР могла решать задачу оптимизации, в ней непрерывно должен осуществляться поиск экстремального значения производительности с помощью экстремального регулятора с запоминанием экстремума. В экстремальных регуляторах с запоминанием экстремума на сигнум-реле подается разность между текущим значением выхода у объекта и его значением в предыдущий момент времени.

Структурная схема СЭР с запоминанием экстремума представлена на рис. 3. Выходная величина объекта ОУ со статической характеристикой $Y=f(X)$ подается на запоминающее устройство ЗУ экстремального регулятора. Запоминающее устройство такой системы должно фиксировать только увеличение входного сигнала, т. е. запоминание происходит только при увеличении выхода у объекта [2].

На уменьшение Y запоминающее устройство не реагирует. Сигнал с запоминающего устройства непрерывно подается на элемент сравнения ЭС, где сравнивается с текущим значением выхода Y объекта. Сигнал разности $Y - Y_{\text{макс}}$ с элемента сравнения поступает на сигнум-реле СР. Когда разность $Y - Y_{\text{макс}}$ достигает зоны нечувствительности Y_n сигнум-реле, с помощью триггера реверса, производит реверс исполнительного механизма ИМ, который воздействует на входную координату X объекта. После срабатывания сигнум-реле запомненное ЗУ значение $Y_{\text{макс}}$ сбрасывается и запоминание сигнала Y начинается снова.

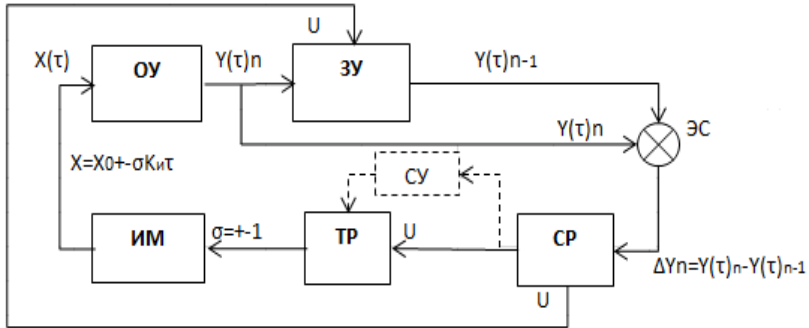


Рис. 3. Структурная схема СЭР с запоминанием экстремума

Системы с запоминанием экстремума обычно имеют исполнительные механизмы с постоянной скоростью перемещения, т.е. $dx/dt = \pm K_i$ (где $K_i = \text{const}$). В зависимости от сигнала U сигнал-реле исполнительный механизм меняет направление перемещения.

Динамика работы СЭР с запоминанием экстремума приведена в [3]:

Значение скорости изменения выходного параметра в любой τ_i момент времени при $X(\tau_i) = X_i$ можно определить в соответствии с выражением

$$\frac{dZ}{dx_1} = \frac{1}{T_0 K_H} [f(x_i) - Z(x_i)].$$

Значение выходного параметра Z_{i+1} в каждый последующий момент времени τ_{i+1} определяется в соответствии с условием

$$Z_{i+1} = Z_i + \frac{dZ_i}{dX_i}.$$

Начальное состояние оптимизируемого процесса характеризуется $Y(\tau_0) = Z(\tau_0) = 89$ т/ч при $x(\tau_0) = 30\%$. Принимаем $\Delta Z = 0,002$ т/ч, $K_H = 2\%$.

Статическая характеристика процесса аппроксимирована полиномом

$$Y(x) = -0,1525 + 9,228x - 0,363x^2 + 0,00065x^3 - 0,000037x^4 .$$

При $X(\tau)=96\%$ выходная величина $Z(x)$ достигает максимального значения, равного $Y(x)$, и дальнейшее увеличение $X(\tau)$ приведет к уменьшению $Z(x)$ и последующему реверсу после выполнения условия $Z(\tau)-Z(\tau)_{\max}+Z_n \leq 0$. После реверса входная величина начнет уменьшаться. Работоспособность системы оценивается отысканием и поддержанием оптимального значения [4] и показана на рис. 4.

Система экстремального регулирования замкнутого цикла измельчения рудных материалов позволяет определить оптимальное соотношение руда-вода. Как следствие, повышается производительность цикла измельчения, в особенности это важно при дрейфе статической характеристики.

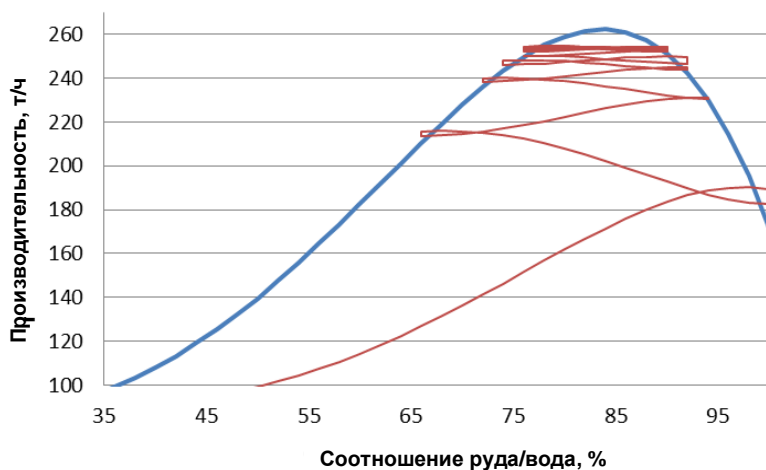


Рис. 4. Расчетная траектория переходного процесса

Список литературы

1. Либерзон Л. М., Родов А. Б. Системы экстремального регулирования / под ред. проф. В. В. Казакевича. – М., 1965.
2. Парсункин Б.Н., Бушманова М.В. Расчет переходных процессов в системах экстремального регулирования запоминанием экстремума. – Магнитогорск, 2001.

3. Парсункин Б.Н., Бушманова М.В., Андреев С.М. Расчеты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии. – Магнитогорск, 2003.

4. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии. – Магнитогорск, 2006.

УДК 621.778.2:669.187

Е.Ю. Мухина, В.В. Гребенникова
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова»

УПРАВЛЕНИЕ ОБРЕЗКОЙ КРОМКИ ПОЛОСЫ

Установка дисковых ножниц с кромкокрошителем предназначена для обрезки кромки с обеих сторон полосы с последующим ее измельчением.

Конструкция механической части и асинхронный электропривод устройства для перемещения и точной установки ножей для обрезки кромки полосы позволяет осуществлять автоматическую и точную установку, если на базе этого электропривода создать релейную систему.

Релейные системы автоматического управления широко используются при решении самых разнообразных технических задач. Простота, компактность и высокий КПД релейных усилителей делают желательным их использование в следующих системах. Теория и практика [1] показывает, что на основе релейных методов управления можно создать системы с весьма высокими динамическими свойствами.

Имеющееся в наличии механическое, электрическое оборудование, датчики раствора между ножами и регулирующая аппаратура позволяют создать следящую систему без использования дополнительного оборудования. При этом необходимы некоторые изменения в программную конфигурацию контроллера Simatic S7-300.

Структура релейной следящей системы показана на рис.1.

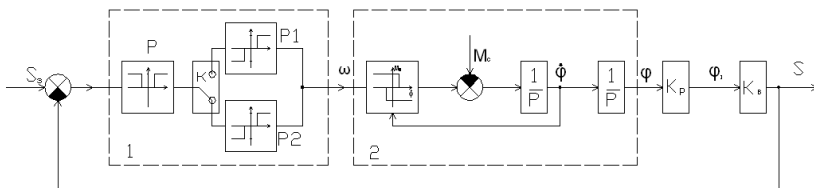


Рис.1. Структура релейной следящей системы

Она состоит из элементов сравнения, релейного регулятора (1), двигателя (2), редуктора с передаточным коэффициентом K_p ; винтовой пары с импульсным датчиком с передаточным коэффициентом K_s .

Релейный регулятор включает в себя два релейных элемента: P1 и P2. Элемент P1 имеет зону нечувствительности 3 мм, а элемент P2 0,5 мм.

С помощью реле P1 включается обмотка двигателя с числом пар полюсов, равным 3, что позволяет двигателю работать с частотой вращения 900 об./мин. С помощью реле P2 включается обмотка двигателя с числом пар полюсов, равным 10, что позволяет двигателю работать с частотой вращения 230 об./мин [2].

Ключ K коммутирует сигналы с выхода реле P1 и P2 и подаёт напряжение на вход двигателя. Переключение ключа K осуществляется элементом пороговым P.

Работает система следующим образом. Заданный зазор (раствор) S_3 сравнивается с фактическим значением зазора S и формируется ошибка. Она подаётся на вход релейных элементов P1 и P2 и на вход элемента P. Если сигнал рассогласования более 3 мм, то подключается выход реле P1 на вход двигателя и он разгоняется до рабочей скорости. Если рассогласование $|\Delta S|$ станет меньше 3 мм, то ключ K подключает выход реле P2 на вход двигателя и он перемещается на пониженную скорость.

Если ΔS меньше 0,5 мм, то оба реле отключены, двигатель отключается от сети и включается электромагнит торможения.

Для создания модели нужно иметь математическое описание всех элементов, входящих в систему.

Уравнение релейного регулятора:

$$U = f(|\Delta s|). \quad (1)$$

Уравнение электропривода:

$$I\varphi'' = M_d - M_c \pm [M_f]. \quad (2)$$

Момент двигателя есть сложная нелинейная зависимость, которая определяется управляющим сигналом u и частотой вращения w :

$$M_d = M(w; u), \quad (3)$$

где M_c – момент статических сопротивлений;

$\pm M_t$ – дополнительный тормозной момент, он включается, когда двигатель отключается от сети.

Уравнение редуктора:

$$\varphi_i = K_p \cdot y. \quad (4)$$

Уравнение вала с датчиком:

$$S = K_v \cdot \varphi 1. \quad (5)$$

Момент на валу двигателя определяется через полезную мощность и скорость вращения [3], [4] (Нм) :

На рабочей скорости:

$$M_n = 975(p/n) = 975(-16/900) = 17,33 \text{ кг*см} = 170.$$

На пониженной скорости:

$$M_n = 975(p/n) = 975(-16/230) = 14,41 \text{ кг*см} = 141,24.$$

Пусковой момент: $M_m/M_n = 2,3$.

На рабочей скорости: $M_m = 2,3 \cdot 170 = 391$.

На пониженной скорости: $M_m = 2,3 \cdot 14,41 = 324,97$.

Максимальный момент : $M_{max}/M_n = 2,3$.

На рабочей скорости: $M_m = 2,9 \cdot 170 = 493$.

На пониженной скорости: $M_m = 2,9 \cdot 14,41 = 324$.

Момент инерции двигателя: $I = GD^2/4 = 2,4/4$.

Скорость холостого хода двигателя (рад/с):

На рабочей скорости: $w_{xx} = \Pi \cdot n / 30 = \Pi \cdot 1000 / 30 = 104,72$.

На пониженной скорости: $w_{xx} = \Pi \cdot n / 30 = \Pi \cdot 300 / 30 = 31,4$.

Модель релейной следящей системы приведена на рис.2.

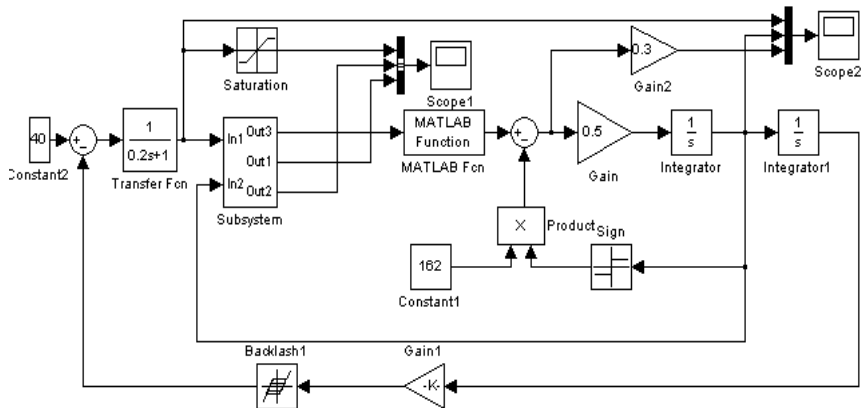


Рис.2. Модель релейной следящей системы

Список литературы

1. Рабинович Л.В. Метод фазовой плоскости в теории и практике релейных следящих систем. – М.: Энергия, 1995. – 152 с.
2. Электротехнический справочник: в 4т. / Под ред. В.Г. Герасимова, А.Ф. Дькова, Н.Ф. Ильинского и др. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: МЭИ, 2001. – Т. 2: Электротехнические изделия и устройства.
3. Краново-металлургические электродвигатели / Баталов Н.М., Белый В.А., Иоффе А.Б. и др. – М.: Энергия, 1997. – 204 с.
4. Хализев В.В., Серов В.И. Расчёт пусковых, тормозных и регулировочных устройств для электродвигателей. – М.: МЭИ, 2003.

**А.Ю. Леднов, Н.А. Савинова,
Д.А. Харитонов, И.Н.Идрисов**
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И Носова»

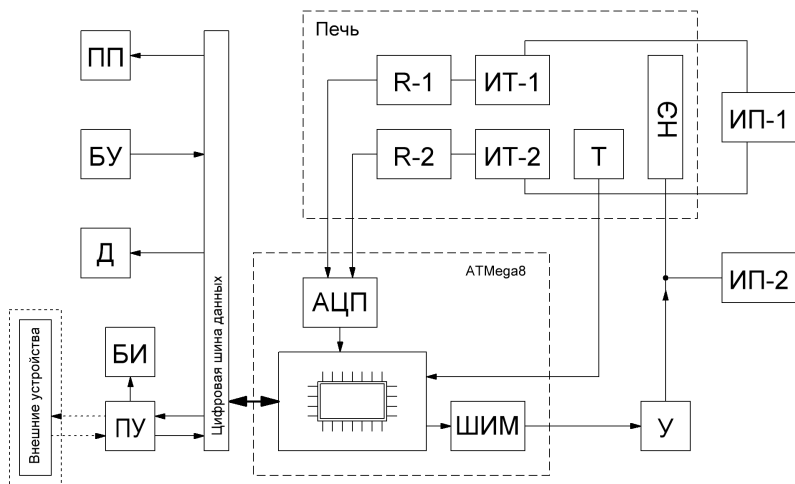
АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ФИЗИКЕ. СООБЩЕНИЕ 1

В связи с переходом на новые образовательные стандарты возникает потребность в совершенствовании лабораторного практикума. Он должен быть выполнен с применением современных технических средств. Студент должен уметь пользоваться современными цифровыми измерительными системами, связанными с компьютерами, планировать и проводить эксперимент с помощью программного обеспечения, имеющего доступ к сети Ethernet.

Для реализации поставленных задач необходимо совершенствовать старые и разрабатывать новые лабораторные стенды с применением микропроцессорной техники.

В качестве пилотного проекта разработана лабораторная установка для исследования зависимости от температуры сопротивлений металлов и полупроводников. Установка должна обладать следующими возможностями: обеспечивать контролируемый нагрев, сопротивление по двум каналам, интерфейс с оператором и связь с компьютером. Основой для лабораторного стенда решено использовать микропроцессор фирмы Atmel семейства AVR – ATmega8. Контроллеры этого семейства программируются на различных языках программирования, например в среде «CodeVision» на языке C. Аппаратные ресурсы включают в себя 8 КБ flash ROM для хранения программ, 512 байт RAM, 6 10-битных аналого-цифровых преобразователей, встроенный аппаратный ШИМ, USART и дискретные порты ввода-вывода. На рисунке представлена схема разработанного устройства.

Измерения температуры производится с помощью датчиков DS18B20, имеющего интерфейс 1Wire, результат измерения в котором представляется в цифровом виде. Диапазон измерения от -55 до +125 °С.



Блок-схема устройства:

ПП - порт программирования; БУ - блок управления; Д – дисплей; ПУ – преобразователь уровня; БИ – блок индикации; АЦП – аналого-цифровой преобразователь (интегрированный); ШИМ – широтно-импульсный модулятор (интегрированный); R-1, R-2 – исследуемые сопротивления; Т – термодатчик; НЭ – нагревательный элемент; ИП-1, ИП-2 – источник питания контура с сопротивлениями и ТЭН соответственно; У – усилитель

Для измерения сопротивления применяются источники постоянного тока на микросхемах LM317, а падение напряжения на измеряемом сопротивлении измеряется с помощью интегрированных в микроконтроллер АЦП. Управление нагревом осуществляется с помощью аппаратного ШИМ, регулируя мощность печи, работающей от напряжения 24 В и тока 1 А. В качестве индикатора используется символьный четырехстрочный дисплей 1604 А с управляющим контроллером HD4478. Для связи с компьютером применяется встроенный USART с преобразования уровня в соответствии со стандартом RS-232.

Отличительной возможностью разрабатываемого комплекса является программное обеспечение верхнего уровня. Оно будет позволять управлять ходом эксперимента, заносить измеряемые параметры непосредственно в таблицы Excel, строить графики зависимости и управлять установкой через сеть

Ethernet. Также существует возможность применения произвольных алгоритмов нагрева рабочего пространства печи.

Разрабатываемый комплекс может использоваться для подготовки бакалавров в вузах, для очной, заочной и дистанционной форм обучения. А при минимизации стоимости – в школах, ПТУ, техникумах, лицеях, для подготовки специалистов различного уровня.

УДК 669.046.4.002

С.В. Евдокимов, Н.М. Баженов
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

Применение шибберных затворов в системе регулирования уровня металла в кристаллизаторе показало их эффективность и надёжность в работе по сравнению со стопорными затворами [1]. Однако использование в этой системе шибберных затворов приводит в процессе работы к изменению коэффициента передачи объекта управления ввиду зарастания погружного стакана. Поэтому применение для регулирования уровня металла в кристаллизаторе обыкновенной САР по отклонению не позволяет обеспечить нужного качества регулирования в течение всего периода времени.

В литературе известны методы построения самонастраивающихся систем, позволяющих устранить этот недостаток [2-4]. В данной работе предлагается применить программный метод построения коррекции параметров настройки регуляторов, обеспечивающий стабилизацию качества переходных процессов на всём протяжении процесса разлива. Эта идея реализована на модели системы, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Регулирующим звеном является ПИ-закон регулирования, состоящий из двух последовательно включенных звеньев: пропорционально-дифференциального (ПД) звена, программно реализованного в контроллере, и интегрального звена, представляющего собой гидроцилиндр с пропорциональной скоро-

стью перемещения штока. Рабочий орган (РО) можно рассматривать как линейное звено, коэффициент передачи которого изменяется вследствие зарастания и затягивания канала. Корректирующее звено позволяет системе быстро реагировать на возмущения по каналу скорости вытягивания. Объект управления (ОУ) представляет собой последовательно соединённые интегрирующее и инерционное звенья. Инерционное звено представляет собой сумму малых инерционностей (инерционность измерительной системы, инерционность дозирующей системы).

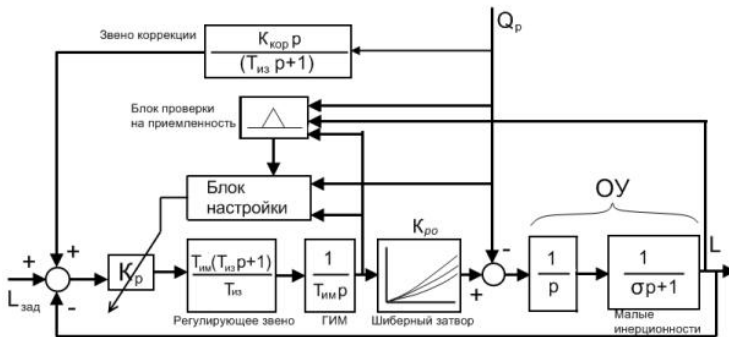


Рис. 1. Структурная схема контура управления

Задачей блока настройки является отслеживание изменения коэффициента передачи шиберного затвора и корректировка коэффициента передачи регулятора для сохранения оптимальной настройки всей системы. Принцип действия блока автоподстройки основан на оценке особенностей изменения статической характеристики объекта в течение разливки. Зная зону нечувствительности статической характеристики, текущее положение шиберного затвора и скорость разливки, можно найти наклон линейного участка статической характеристики, т.е. коэффициент передачи шиберного затвора. Важным условием при этом является то, что определение положения шиберного затвора и скорости разливки должно осуществляться в статическом режиме работы системы, т.е. при отсутствии переходных процессов. Блок проверки на приемленность позволяет отследить нахождение системы в статическом режиме. Кроме этого, разработан алгоритм, позволяющий в процессе разливки корректировать величину зоны нечувствительности (которая изменяется вследствие прогара шибера).

Моделирование предложенной системы выполнялось с целью доказательства работоспособности данной системы и оценки качества переходных процессов. Полученные результаты показали, что применение блока автоподстройки позволяет улучшить качество переходных процессов и повысить точность регулирования уровня металла в кристаллизаторе.

Одна из циклограмм сигналов системы управления, полученная при моделировании, приведена на рис. 2.

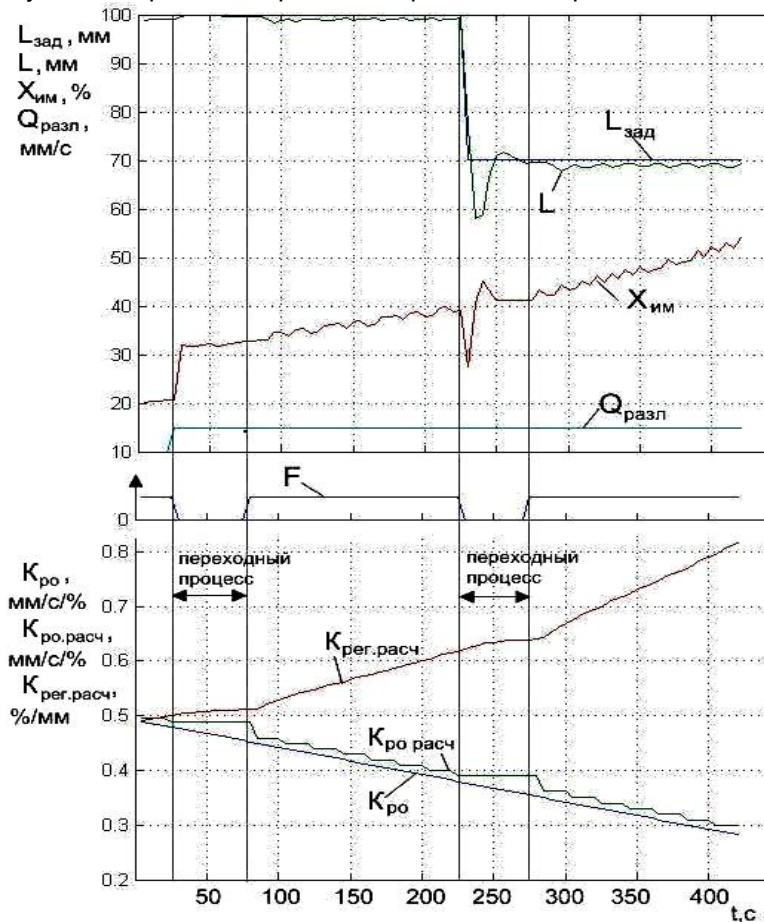


Рис. 2. Моделирование системы управления

При моделировании имитировалось зарастание сталепроводного канала и переходные процессы. Из рисунка видно, что рас-

считанное значение коэффициента передачи РО довольно точно следит за действительным его значением. Лишь во время переходных процессов подстройка регулятора прекращается. Сигналом F на приведённом рисунке обозначен сигнал признака установившегося состояния (если он равен нулю, значит в системе протекают переходные процессы).

Список литературы

1. Опыт разработки шиберных устройств для технологических переливов стали/ С.П. Еронько, А.Ю. Цупрун, С.А. Бедарев и др.// Бюл. «Черная металлургия». – 2008. – 9. – С. 81 – 87.
2. Ввод в эксплуатацию системы регулирования уровня зеркала жидкого металла в кристаллизаторе по принципу нечёткой логики на заводе фирмы Baogang steel/ Б.Думитриу, Р.Микут, Г.Бреттхауэр и др.// Черные металлы. – 2001. – № 6. – С. 16 – 19.
3. Yeongseob Kueon, Wendong Xiao Improved mold level control for continuous steel casting by fuzzy logic control // Transaction on control, futomation and systems engineering. – 2003. – № 6. – С. 12-19.
4. Jili Tao, Ning Wang. Fuzzy neyron hybrid control for continuous steel casting //IEEE Control System Mag. – 2004. – № 4.- С. 64-70.

УДК 669.162.228

Б.Н. Парсункин, Н.В. Богданов
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ КИСЛОРОДА И ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Доменные печи являются самыми безотходными, экономичными и высокопроизводительными агрегатами для выплавки чугуна. Восстановление железа осуществляется двумя способами: прямое восстановление углеродом кокса при температуре более 2000 °С и косвенное восстановление за счет монооксида углерода (СО) в процессе встречного движения шихты (вниз) и потока газа (вверх).

Для осуществления процесса горения кокса и получения тепловой энергии в нижнюю часть печи подаётся горячее дутьё, нагретое до 1200 °С. В нижней части печи кокс формирует своеобразную зону, которая обеспечивает необходимый газодинамический режим плавки, полноту протекания процессов восстановления железа и науглероживания металла. Доменное дутьё представляет собой воздух, обогащённый кислородом, с топливно-восстановительными добавками (природный газ, угольная пыль, мазут и т.п.). Природный газ используется как эквивалентная эффективная замена дорогостоящего кокса, затрачиваемого на получения необходимой тепловой энергии.

Статическая характеристика определяется зависимостью производительности доменной печи от соотношения расхода природного газа и технического кислорода $V_{\text{ПР}}/V_{\text{ТК}}$ и имеет одноэкстремальный вид [1]. На начальном участке при постоянном расходе кислорода происходит рост производительности печи, так как, сгорая, природный газ выделяет тепло и образуется моноксид углерода СО и водород H_2 , по реакции $\text{CH}_4 + 0,5\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2 + 37,25 \text{ кДж}$, которые являются хорошими восстановителями железа. При дальнейшем увеличении природного газа происходит эндотермическая реакция (с поглощением тепла) разложения природного газа на углерод С и водород H_2 $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2 - 76 \text{ кДж}$, что приводит к снижению производительности доменной печи при снижении температуры.

С целью определения и поддержания максимально возможной производительности доменной печи при заданном удельном количестве технического кислорода необходимо использовать систему автоматической оптимизации (CAO) для управления величиной коэффициента соотношения $V_{\text{ПР}}/V_{\text{ТК}}$ путем изменения расхода природного газа на печь.

В отличие от систем автоматической стабилизации регулируемого параметра, в которых величина и направление управляющего воздействия определяются знаком и величиной отклонения регулируемой величины от задания, в CAO задаётся цель управления: достижение экстремального значения оптимизируемого параметра, в данном случае максимальной производительности.

Для достижения этой цели в таких системах используется поисковый режим работы, суть которого заключается в следующем. Первоначально в CAO случайно реализуется управляющее воздействие в случайном направлении. Затем анализируется влияние этого воздействия на величину оптимизируемого

параметра. Если полученные изменения оптимизируемого параметра осуществлены в направлении приближения к цели (увеличивается при поиске максимума) управления, то направление считается правильным. Если выбранное направление управляющего воздействия приводит к отдалению выходного параметра от цели, то изменение следует считать ошибочным и направление управляющего воздействия необходимо изменить на противоположное (произвести реверс ИМ) [2, 3].

Целью представленной работы является разработка шаговой системы оптимизации по приращению производительности выпуска чугуна в течение одного шага системы и написание алгоритма и программы работоспособной системы.

Доменная печь обладает значительной инерционностью, в сумме время запаздывания и постоянная времени объекта равны 10 ч, поэтому целесообразно применение только шаговой системы экстремального регулирования (СЭР) или САО, чтобы объект управления успел отреагировать на предыдущее управляющее воздействие.

Значительная инерционность объясняется двумя причинами:

- производительность печи можно определить только при дискретных выпусках (через 40-80 мин);
- снижение удельного расхода кокса возможно только при обнаружении тенденций «горячего» хода печи по косвенным параметрам, доступным для инструментального контроля.

Структурная схема системы управления представлена на рис. 1.

Объект управления представлен статическим звеном с нелинейной характеристикой $y=f(x)$, чтобы учесть закон изменения коэффициента передачи при изменении управляющего воздействия, и двумя инерционными звеньями с постоянными времени T_3 и T_0 .

Текущее значение выходного параметра $Z(\tau)$ подаётся на запоминающее устройство Z_1^{-1} и одновременно на элемент сравнения ЭС1. Z_1^{-1} задерживает сигнал на время задержки, равное времени выпуска чугуна из домны, $T_3 = 1$ ч. На выходе первого элемента сравнения ЭС1 формируется разность между текущим значением регулируемой величины и запомненным в предыдущий момент времени, т.е. приращение регулируемой величины:

$$\Delta Z(\tau) = Z(\tau) - Z(\tau - 1).$$

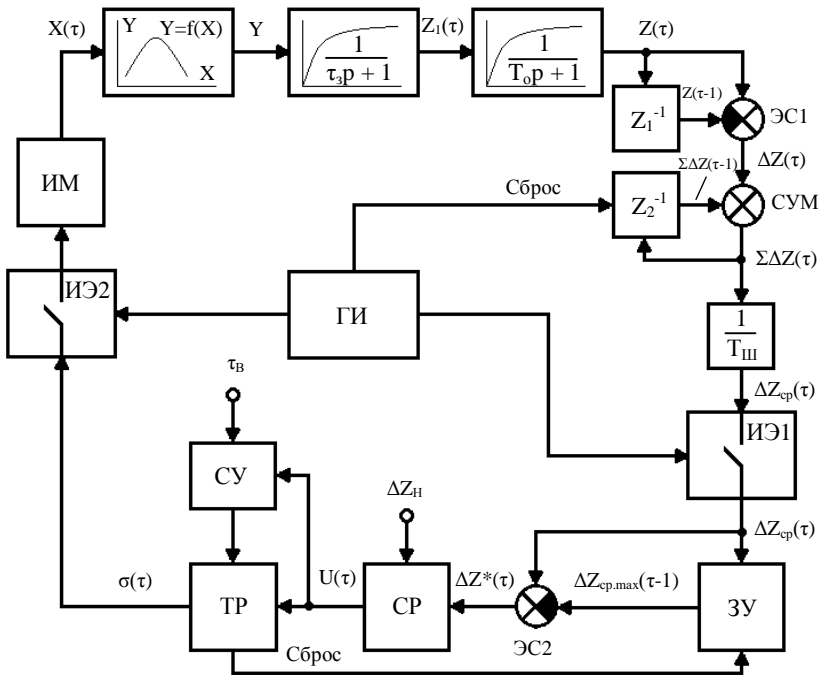


Рис. 1. Структурная схема системы экстремального регулирования шагового типа с запоминанием максимума приращения средней производительности доменной печи за шаг

После чего $\Delta Z(t)$ суммируется в сумматоре СУМ с предыдущей суммой $\Sigma \Delta Z(t)$, запомненной запоминающим устройством Z_2^{-1} . Z_2^{-1} , так же как и Z_1^{-1} , задерживает сигнал на время, равное времени выпуска чугуна из домы, $T_3 = 1$ ч. Одновременно $\Sigma \Delta Z(t)$ поступает на пропорциональное звено, коэффициент пропорциональности которого обратно пропорционален времени шага системы $T_{ш}$. В результате чего на выходе пропорционального звена имеем среднее приращение производительности доменной печи $\Delta Z_{ср}(t)$ за один шаг системы.

При истечении времени шага системы $T_{ш} = 10$ ч замыкаются импульсные элементы ИЭ1 и ИЭ2, управляемые генератором импульсов ГИ, и одновременно происходит сброс запомненной суммы в Z_2^{-1} для нового накопления приращения производительности доменной печи $\Delta Z_{ср}(t)$ за этот шаг системы.

Запоминающее устройство ЗУ запоминает только макси-

мальное среднее приращение $\Delta Z_{CP.MAX}(\tau)$, достигнутое на предыдущем шаге, и не реагирует на уменьшение выходного параметра.

На выходе второго элемента сравнения ЭС2 формируется разность приращения средней производительности домны за один шаг системы:

$$\Delta Z^*(\tau) = \Delta Z_{CP}(\tau) - \Delta Z_{CP.MAX}(\tau - 1).$$

Логическим устройством, осуществляющим формирование управляющего воздействия, является сигнум-реле. Это устройство осуществляет логическое управление исполнительным механизмом (ИМ) для достижения поставленной цели. Логическое управление осуществляется путем формирования на выходе логической функции $U(\tau)$ в соответствии с условием:

$$U(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{если } \Delta Z_{CP}(\tau) - \Delta Z_{CP.MAX}(\tau - 1) + \Delta Z_H \geq 0, \text{ то } \sigma(\tau + 1) = \sigma(\tau) \\ -1, & \text{если } \Delta Z_{CP}(\tau) - \Delta Z_{CP.MAX}(\tau - 1) + \Delta Z_H < 0, \text{ то } \sigma(\tau + 1) = -\sigma(\tau) \end{cases},$$

где ΔZ_H – заданная зона нечувствительности САО.

При $U(\tau) = +1$ – текущее значение выходного параметра больше, чем максимальное запомненное значение в предыдущий момент времени, и выбранное значение $\sigma(\tau)$ следует сохранить при определении величины $X(\tau+1)$ и на последующий интервал $(\tau+1)$ времени, т.е. $\sigma(\tau+1) = \sigma(\tau)$.

При $U(\tau) = -1$ – текущее значение оптимизируемого параметра уменьшится по сравнению с максимальным запомненным значением в предыдущий момент времени на величину, большую, чем зона нечувствительности, в системе нужно произвести реверс, т.е. $\sigma(\tau+1) = -\sigma(\tau)$.

Поскольку в системах автоматического управления технологическими процессами используются ИМ постоянной скорости, то его перемещение равно:

$$X(\tau) = X_0 + \sigma(\tau)k_{ИМ} \Delta \tau_{ИМ},$$

где X_0 – начальное значение положения вала ИМ при $\tau = 0$; $\Delta \tau_{ИМ}$ – время импульса (время движения ИМ).

Если система, приближаясь к оптимуму, совершает два реверса, то поиск прекращается и ИМ останавливается на время выдержки $t_B = 3(T_0 + t_3)$ или на время, пока не выполнится ус-

ловие реверса ИМ. Система останавливает ИМ, устанавливая расход природного газа исходя из условия:

$$X(\tau) = \frac{X_{MIN} + X_{MAX}}{2},$$

где X_{MAX} и X_{MIN} – максимальный и минимальный расход природного газа при повторных реверсах ИМ.

На рис. 2 и 3 представлены траектории поискового режима работы производительности доменной печи от расхода природного газа по статической характеристике и во времени при её дрейфе. Из-за изменения расхода технического кислорода V_{TK} , непостоянства качества (состава) шихтовых материалов, изменения влажности кокса происходит дрейф статической характеристики. Время дрейфа равно $T_{ДР} = 10$ ч (коэффициенты горизонтального $\alpha = 242,7$ м³/ч и вертикального $\beta = 0,5$ т/ч дрейфа рассчитаны при $T_{ДР} = 10$ ч).

Из рис. 2 и 3 видно, что при остановки ИМ на $T_{ОСТ} = 30$ ч система достигает максимальной производительности.

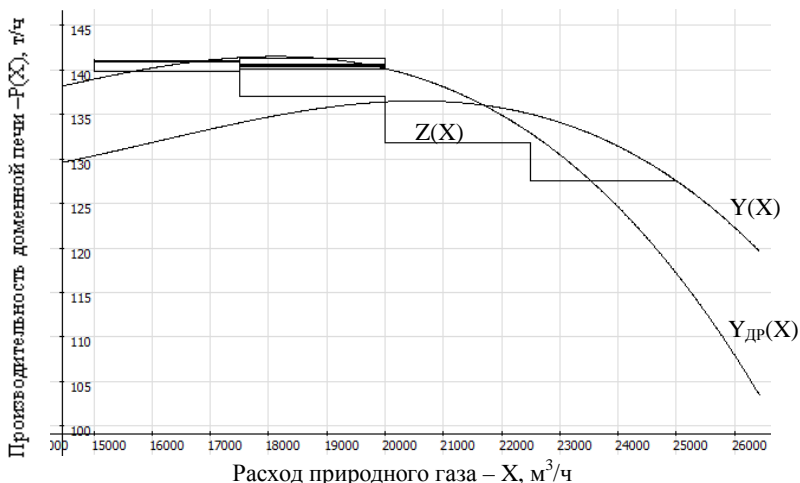


Рис.2. Траектория поискового режима работы ШСЭР в координатах $P(X)$ при $V_{TK} = 140$ м³/т и параметрах настройки: $\Delta X = 2500$ м³/ч; $\Delta Z_H = 0,01-0,11$ т/ч

Анализ полученных данных показывает, что при наличии дрейфа статической характеристики оптимизируемого процесса САО обеспечивает устойчивый поиск и поддержание макси-

мальной производительности доменной печи.

Смоделированная и реализованная программно система автоматической оптимизации, основанная на принципе поиска максимума приращения выходного параметра, в действительности выполняет предъявляемые требования, отыскивая экстремум выходного параметра, отличающийся от действительного экстремума по статической характеристике не более чем на $\Delta Z_{\text{п}} = 0,1 \text{ т/ч}$.

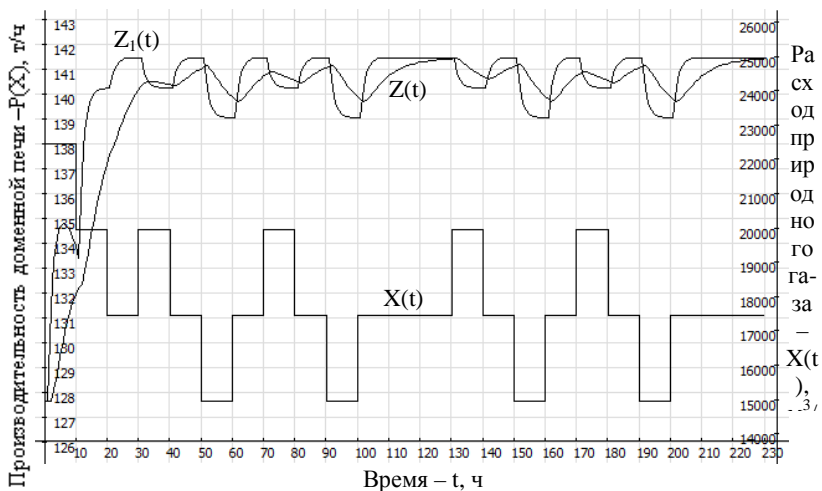


Рис.3. Траектория поискового режима работы ШСЭР во времени при $\Delta X = 2500 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta Z_{\text{п}} = 0,01-0,11 \text{ т/ч}$

В зависимости от величины шага изменения расхода природного газа меняется время достижения максимальной производительности доменной печи. При наличии дрейфа статической характеристики оптимизируемого процесса САО обеспечивает устойчивый поиск и поддержание максимальной производительности доменной печи. При дрейфе статической характеристики оптимальными параметрами настройки САО являются: $\Delta X = 2500 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta Z_{\text{п}} = 0,01-0,1 \text{ т/ч}$ при следующих показателях качества поискового режима: $A_z = 1,4 \text{ т/ч}$; $A_x = 5000 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta Z_{\text{п}} = 0,01 \text{ т/ч}$, $T_p = 30 \text{ ч}$ (см. рис.2 и 3).

Необходимо отметить, что в реальных условиях положение и вид статической характеристики оптимизируемого процесса для системы автоматической оптимизации неизвестен. Высокая интеллектуальность рассматриваемой САО обеспечивается

эффективным поисковым режимом работы.

Зона нечувствительности релейного элемента является одним из настроечных параметров контура управления. Она влияет на качество регулирования, а именно на то, насколько близко регулируемая величина будет подходить к заданному значению. Однако при слишком большой зоне нечувствительности возникает вероятность появления ложных реверсов, так как уменьшается чувствительность системы на минимальное изменение оптимизируемого параметра.

Список литературы

1. Сеничкин Б.К., Бахчиев Н.Ф., Гостенин В.А. Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI века: сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГМА, 1996. – Т. 2. – 198 с.
2. Парсункин Б.Н., Бушманова М.В. Расчёты переходных процессов в системах экстремального регулирования с запоминанием экстремума: учеб. пособие. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – 164 с.
3. Парсункин Б.Н., Бушманова М.В, Андреев С.М. Расчёты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии: учеб. пособие. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – 267 с.

УДК [621.771.237;621.965]-52

А.Б. Коробейников

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

ПЕРЕВОД СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ АГРЕГАТОВ ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА ЛПЦ-5 НА СОВРЕМЕННУЮ ПРОЦЕССОРНУЮ БАЗУ

В связи с выходом ОАО «ММК» на мировой рынок, основной стратегической целью в области качества является сохранение долгосрочной конкурентоспособности предприятия на рынке металлопроката. Эти и другие вопросы в ОАО «ММК» решаются посредством внедрения современного оборудования в процесс производства, реконструкцией устаревших объектов и возведением новых.

Одними из таких объектов являются агрегаты поперечной резки 2 и 3 (АПР-2,3), где установлено устаревшее технологическое и электрическое оборудование, а именно «Система регулирования уровня пакетировки листов и управления досылателями», разработанная в 1979 году. Система морально и физически устарела. При этом часто выходят из строя ячейки системы, датчики, разъёмы в корзине с ячейками. Ремонт ячеек сопровождается трудностями, так как они одноразового применения, в частности модули на базе логики Т не ремонтпригодны, и в настоящее время такие комплектующие сняты с производства. Все вышеперечисленные моменты являются источником отказов и больших простоев агрегата.

Таким образом, основными целями перевода системы пакетировки АПР-2,3 на современную микропроцессорную базу являются:

- повышение уровня информационного обеспечения системы за счёт внедрения современных датчиков координат объекта и цифровых информационных каналов;
- повышение качества выпускаемой продукции за счёт реализации новых алгоритмов управления технологическими процессами;
- снижение удельного расхода электроэнергии за счёт оптимизации работы технологических агрегатов;
- повышение надёжности системы автоматизации, возможность реализации функций контроля за техническим состоянием оборудования и, как следствие, сокращение аварийных простоев технологических агрегатов.

В результате выбора возможных вариантов модернизации системы было принято решение использовать контроллер Simatic S7-300, который установлен на участке отделки и реализует программу «Система управления отбраковкой, сопровождения, управления карманами и учета материалов». Анализ загруженности данного контроллера позволил сделать вывод о возможности включения в его операционную часть программных модулей, реализующих основные системы автоматизации агрегатов поперечной резки. Для связи с датчиками координат, ключами управления, а также для формирования управляющих воздействий в каждой подсистеме будет использована станция удалённой периферии ET200M.

Таким образом, в контроллере Simatic S7-300 будут реализованы следующие системы:

- система сортировки и учета с системой управлением карманами;
- система управления опусканием столов в карманах с подсистемой пакетирования;
- системы управления досылателями листов в карманах.

Функция управления опусканием столов в карманах с подсистемой пакетирования предназначена для поддержания необходимого уровня положения пачки в карманах и расчета высоты пачки. Для исключения изломов и замятия листов при увеличении их количества в кармане используется данная функция, которая контролирует положение верхней кромки пачки и, управляя положением столов, поддерживает на необходимом уровне.

Функция управления досылателями листов в карманах должна обеспечить формирование и выдачу сигнала на досылатели. Досылатели выравнивают поступающие в карман листы по габаритам набираемой пачки.

«Система сортировки и учета с системой управления карманами» сортирует листы на два сорта, обнаруживает и отбраковывает листы по сигналу от кнопки контроллера или датчика толщины полосы. Система пакетирует листы в три кармана. Назначение карманов: №1 – брак, №2 – первый сорт, №3 – второй сорт. Система также по введенным оператором параметрам рассчитывает теоретический вес листа, пачки и автоматически управляет набором пачек готовой продукции.

На рис. 1 представлена структурная схема новой системы управления досылателей листов в карманах.

Оператор на посту управления с помощью ключей, опрашиваемых контроллером через входной дискретный модуль, выбирает, в какой карман будут сортироваться листы.

Контроллер согласно управляющей программе через выходные дискретные модули управляет соответствующими полупроводниковыми реле выбранного кармана. Реле включают нужный соленоид на перемещения в исходное и рабочее положение досылателя листа.

На рис. 2 приведена новая система регулирования уровня пакетирования листов.

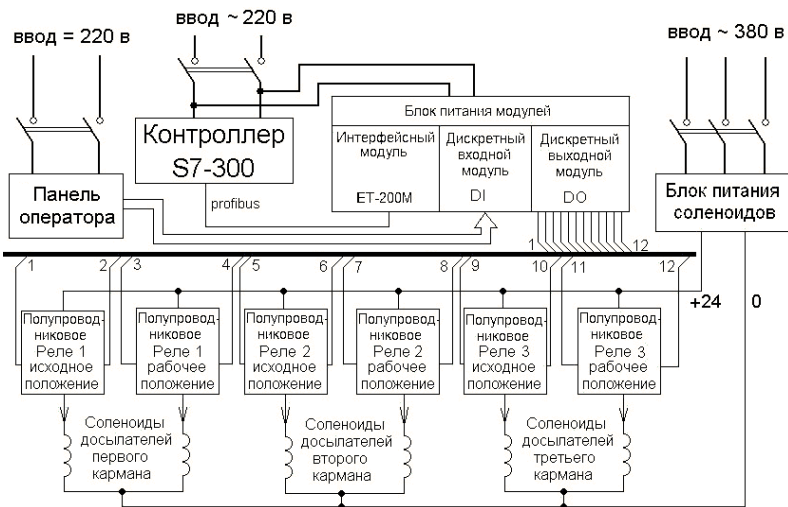


Рис. 1. Структурная схема новой системы управления досылателей листов в карманах

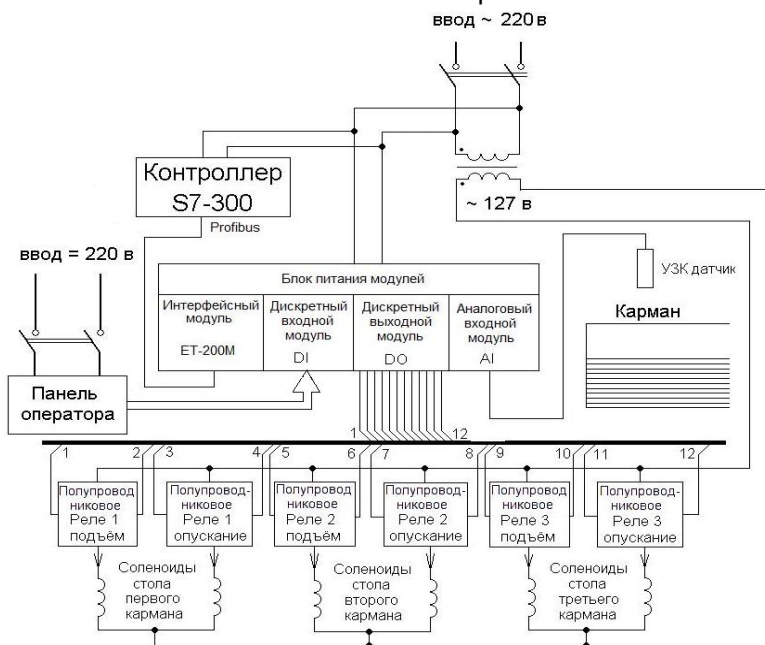


Рис. 2. Новая система регулирования уровня пакетировки листов

Оператор на посту управления с помощью ключей, опрашиваемых контроллером через входной дискретный модуль, выбирает, в какой карман будут сортироваться листы.

Сигнал с ультразвукового датчика (УЗК) подаётся на входной аналоговый модуль. Контроллер согласно управляющей программе подаёт через выходные дискретные модули сигнал на соответствующее полупроводниковое реле выбранного кармана, которое, замыкаясь, включает нужный соленоид на опускание или подъём стола. Как только карман наполнен листами, разгрузочный конвейер в автоматическом режиме или по команде оператора убирает стопку листов и стол поднимается в исходное состояние.

Для повышения точности измерения высоты пачки листов вместо устаревших индуктивных датчиков были использованы ультразвуковые датчики типа Siemens BERO 3RG6115.

На выходе датчик формирует токовый сигнал 4-20 мА, пропорциональный высоте пачек, который поступает на вход модуля аналогового цифрового преобразователя в составе ET200M.

Для повышения надёжности исполнительных механизмов электромеханические реле включения обмоток соленоидов поднятия, опускания столов и досылателей карманов были заменены на полупроводниковые коммутаторы с управлением от модуля дискретного вывода в составе ET200M.

На рис. 3 представлена блок-схема управляющей программы контроля уровня пакетировки листов и досылателей.

Оператор с поста управления запускает процесс пакетировки, выбирая соответствующий карман. Контроллер с определённой частотой перемещает в исходное и рабочее положение досылатели, а по мере заполнения карманов опускает стол. Как только карман наполнился листами, контроллер включает разгрузочный конвейер, который убирает стопку листов и стол поднимается в исходное состояние.

Таким образом, предлагаемый вариант модернизации системы автоматизации АПР-2,3 позволит при минимальных затратах на приобретение оборудования повысить качество выпускаемой продукции и надёжность оборудования технологического агрегата.

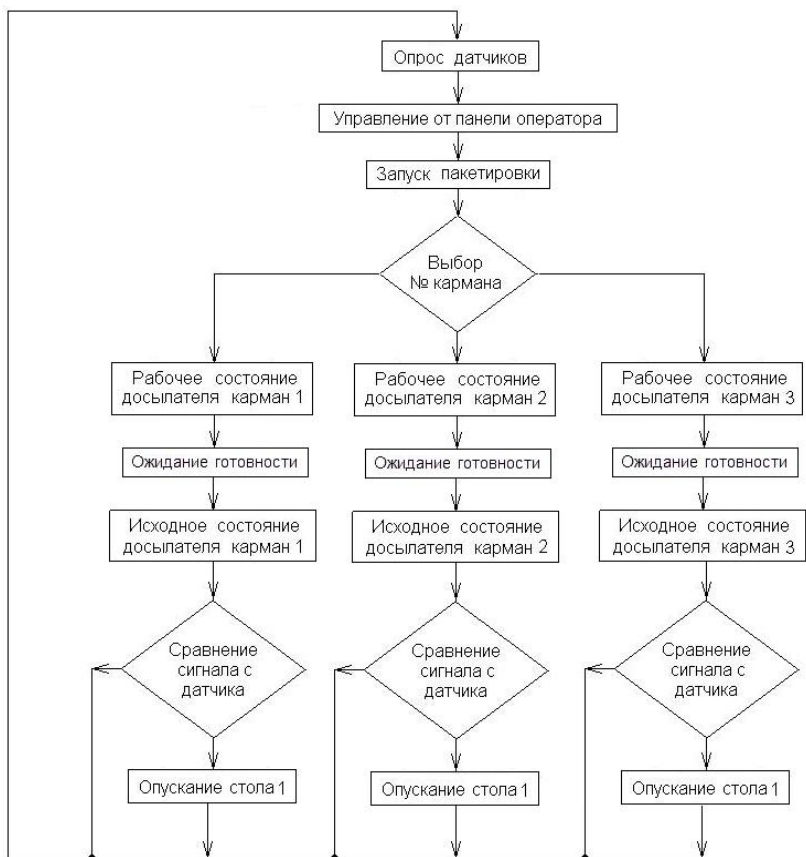


Рис. 3. Блок-схема управляющей программы контроля уровня пакетировки листов и досылателей

Список литературы

1. Техническая документация по АПР-2,3
2. Техническая документация по контроллерам SIEMENS

**У.Б. Ахметов, Т.У. Ахметов,
Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова**
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АКП

В настоящее время в условиях высокопроизводительного сталеплавильного производства наиболее предпочтительным критерием оптимального управления энергетическим режимом электродугового технологического агрегата, а в нашем случае АКП, является достижение его максимальной производительности при безусловном выполнении всех заданных качественных показателей стали.

Известно, что часовая производительность печи q , т/ч, в основном зависит от мощности, выделяемой в электрической дуге P_o , и от мощности тепловых потерь P_{mn} , ориентировочно может быть определена по эмпирической формуле

$$q = (P_o - P_{mn}) / \omega,$$

где ω – расчетное ориентировочное количество энергии, необходимое для поддержания 1 т металла в период рафинирования с учетом нагрева, расплавления сыпучих материалов, подаваемых в ковш, кВт·ч/т [1].

Управление электрическим (энергетическим) режимом электродуговых агрегатов металлургического производства возможно двумя способами:

- 1) изменением величины напряжения питания U_{II} электрода путем переключения ступеней напряжения;
- 2) изменением величины тока дуги при выбранном значении U_{II} за счет перемещения электрода, т.е. изменения длины дуги.

С учетом сказанного, под статической рабочей характеристикой понимается зависимость величины конкретного электрического параметра от величины рабочего тока дуги при выбранной постоянной величине напряжения питания U_{II} .

Зависимости величин мощности, выделяемой в дуге P_o , и производительности АКП от тока дуги I_p при различных ступенях напряжения трансформатора представлены на рис. 1.

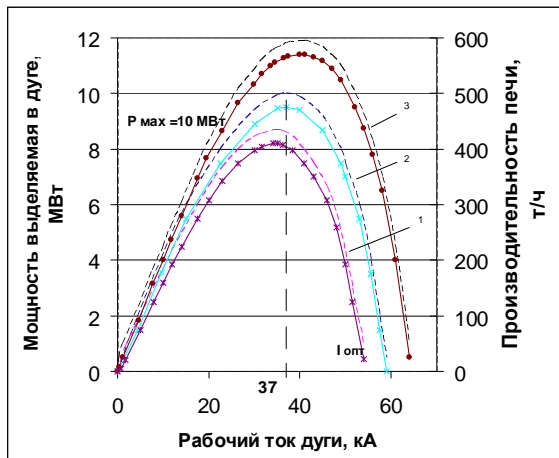


Рис. 1. Зависимость мощности, выделяемой в дуге, от рабочего тока дуги при значении напряжения печного трансформатора для АКП: 1 – $U=398$ В; 2 – $U=431$ В; 3 – $U=470$ В (штриховой линией обозначена производительность печи)

Зависимости $P_o = f(I_p)$ имеют экстремальный вид, т.е. доступны для оптимизации процесса управления, и экстремумы $P_o(I_p)_{max}$ смещаются по сложной траектории с увеличением U_{II} в направлении больших величин оптимальных значений рабочих токов дуги.

Под оптимальным значением величины рабочего тока дуги $I_{p\ opt}$ понимается текущее значение тока дуги каждой фазы, при котором обеспечивается достижение максимально возможной мощности, подводимой к электроду при выбранной ступени напряжения.

Таким образом, основной целью автоматической оптимизации управления электрическим режимом АКП является обес-

печение условий для достижения максимальной мощности, выделяемой в электрической дуге $P_{\text{от max}}$.

Поскольку непосредственное измерение мощности, выделяемой в дуге $P_o = U_o I_p$, недоступно, то для управления этой мощностью целесообразно использовать косвенные параметры, доступные для прямого инструментального контроля: величину рабочего тока I_p и подводимую к электроду (активную) мощность P_A .

При этом часть подводимой (активной) мощности теряется в короткой цепи АКП в виде $P_{нэ}$ – электрических потерь, определяемых из выражения [2]:

$$P_{нэ} = I_p^2 r .$$

В случае, когда $P_{нэ} = P_A$, имеет место короткое замыкание.

Определим токи короткого замыкания для различных ступеней трансформатора (они пригодятся при исследовании переходных процессов в системе):

$$I_p^2 r = I \sqrt{U_{II}^2 - (I_p x)_2} \Rightarrow I_{к.з} = \frac{U_{II}}{\sqrt{r^2 + x^2}} ;$$

$$U_{II} = 200B :$$

$$I_{к.з.} = \frac{U_{II}}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{200^2}{\sqrt{0.002^2 + 0.007^2}} = 27.472 (кА) ;$$

$$U_{II} = 398B : I_{к.з.} = 54.669 кА ;$$

$$U_{II} = 431B : I_{к.з.} = 59.202 кА ;$$

$$U_{II} = 470B : I_{к.з.} = 64.559 кА .$$

В данной работе для оптимизации управления электрическим режимом АКП будем использовать регулятор, реализующий принцип нечеткой логики неявных решений в сочетании с принципом экстремального регулирования.

Такие системы обладают неоспоримым преимуществом перед традиционными классическими методами автоматического управления, обеспечивая возможность получения приемле-

мое по качеству управление, в условиях невозможного получения адекватной модели управляемого технологического процесса, за счет замены, как правило, упрощенной математической модели управляемого процесса качественной лингвистической логической моделью, составленной из определенных логических правил, задаваемых в форме «Если..., тогда...».

Структурная схема контура оптимизации энергетического режима АКП, используемая при математическом моделировании процесса, представлена на рис. 2.

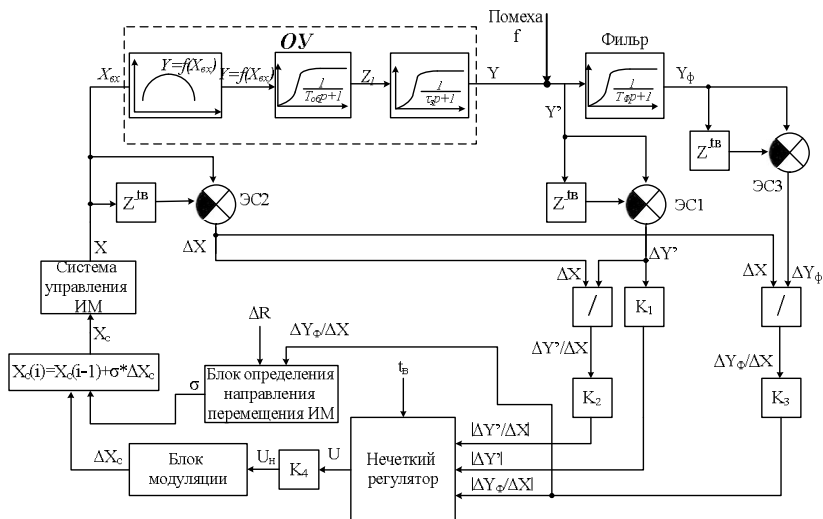


Рис. 2. Структурная схема контура оптимизации управления энергетическим режимом АКП

Объект управления ОУ представляет собой последовательное соединение трех звеньев: статической характеристики объекта управления (мельницы) $Y=f(X_{ex})$ и двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени $T_{об}$ и T_3 , характеризующими динамические свойства объекта управления. Так как данный ОУ характеризуется большой инерционностью, то для управления им необходимо использовать шаговую систему управления с периодом цикла $t_б$.

На выход объекта управления могут влиять различные возмущающие воздействия – помехи f , поэтому целесообразно для уменьшения влияния этих помех пропустить выходной сигнал ОУ (уже с помехами) Y' через фильтр, в качестве которого в

простейшем случае можно взять инерционное звено первого порядка с постоянной времени T_{ϕ} .

Для управления данным объектом необходимо составить логическую модель поведения системы управления в зависимости от текущего значения величин $|\Delta Y' / \Delta X|$. Это можно сделать, используя принципы нечеткой логики.

На вход разрабатываемого нечеткого регулятора после блоков масштабирования K_1 , K_2 и K_3 должны поступать три сигнала: $|\Delta Y'|$, $|\Delta Y' / \Delta X|$ и $|\Delta Y_{\phi} / \Delta X|$.

Для получения величины $|\Delta Y'|$ выходной сигнал ОУ поступает на элемент сравнения ЭС1 и одновременно на блок задержки сигнала на время цикла t_b (Z^{-t_b}). Тогда на выходе ЭС1 будет сигнал $\Delta Y' = Y'(t_{e_i}) - Y'(t_{e_{i-1}})$, где i – номер цикла (шага).

Полученный сигнал $\Delta Y'$ нормируется и берется по модулю в блоке K_1 . Аналогично рассчитывается сигнал ΔX (величина X поступает с выхода системы управления ИМ).

Для получения величины $|\Delta Y' / \Delta X|$ сигналы $\Delta Y'$ и ΔX поступают на блок деления, после чего полученный сигнал $\Delta Y' / \Delta X$ нормируется и берется по модулю в блоке K_2 . Аналогично рассчитывается сигнал $|\Delta Y_{\phi} / \Delta X|$ (нормирование происходит в блоке K_3).

Полученные сигналы $|\Delta Y'|$, $|\Delta Y' / \Delta X|$ и $|\Delta Y_{\phi} / \Delta X|$ поступают на вход нечеткого регулятора, с выхода которого управляющий сигнал U подается на блок K_4 , где происходит его нормирование. В результате будет получено значение, на которое нужно будет переместить ИМ на следующем цикле.

Однако следует ограничить минимально допустимое перемещение ИМ за отдельный цикл в связи с действием на процесс различных возмущений и ограничений возможностей исполнительных устройств. В то же время это может привести к тому, что процесс, не дойдя до экстремума, остановится в его окрестностях. Для того, чтобы избежать этого, при малых значениях U_n производится интегрирование этой величины за несколько циклов и, как только интеграл становится больше заданного минимального перемещения ИМ, это перемещение производится на величину интеграла, и далее этот интеграл об-

нуляется. Тем самым, пускай и за большее время, выходная величина постепенно достигнет оптимального значения, одновременно со снижением размаха производимых в районе экстремума колебаний.

Указанные операции производятся в блоке модуляции перемещения ИМ, внутренняя структура которого представлена на рис. 3.

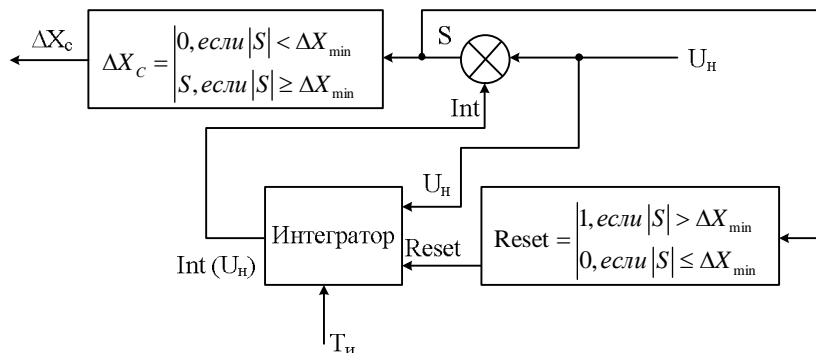


Рис. 3. Внутренняя структура блока модуляции перемещения ИМ

Работа данного блока происходит следующим образом. Если на очередном цикле, когда подходит момент перемещения ИМ (на выходе нечеткого регулятора сформировывается сигнал U_n), оказывается, что требуемое перемещение меньше минимального ΔX_{\min} , то перемещения не происходит (приращение перемещения ИМ $\Delta X_c = 0$). Но при этом рассчитанное значение перемещения ИМ U_n интегрируется в блоке интегратора, параметром настройки которого является время интегрирования $T_{\text{И}}$.

При проверке возможности перемещения ИМ к моменту окончания следующего цикла выдержки, к выходу нечеткого регулятора U_n добавляется накопленное значение интеграла $Int(U_n)$ и, если выполняется условие $|S| \geq \Delta X_{\min}$, где $|S| = U_n + Int(U_n)$, то ИМ перемещается на величину $\Delta X_c = U_n + Int(U_n)$. При этом накопленный интеграл обнуляет-

ся (на его вход сброса Reset приходит логическая единица, обнуляя тем самым интеграл).

Логическая база правил, заданная в нечетком регуляторе, формирует на его выходе сигнал, пропорциональный требуемой величине перемещения ИМ для скорейшего достижения экстремума.

Формирование направления перемещения ИМ вынесено в отдельный блок, выходом которого является знаковая функция σ , которая может принимать значения +1 и -1, что будет соответствовать увеличению и уменьшению рабочего тока дуги.

Для формирования направления перемещения ИМ предлагается использовать так называемую рейтинговую систему, структурная схема которой приведена на рис. 4.

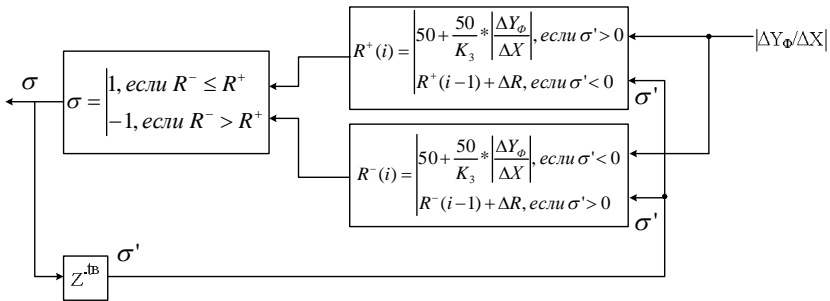


Рис. 4. Рейтинговая система определения направления перемещения ИМ

Работа данной системы осуществляется следующим образом. Для выбора направления движения рассчитываются два рейтинга желательности: R^+ (рейтинг движения на увеличение) и R^- (рейтинг движения на уменьшение).

Расчет рейтингов происходит по результату предыдущего цикла выдержки путем анализа значения знаковой функции σ .

Предположим, что ИМ был перемещен в сторону увеличения. Далее, после окончания времени выдержки t_b , производится расчет рейтинга R^+ путем приведения величины $\left| \frac{\Delta Y_\phi}{\Delta X} \right|$ в диапазон $[0; 100]$. Масштабирование производится относительно уровня 50, который соответствует значению $\left| \frac{\Delta Y_\phi}{\Delta X} \right| = 0$ (т.е.

$|\Delta Y_{\phi}| = 0$), исходя из заданного максимально возможного значения $|\Delta Y_{\phi} / \Delta X|$.

Несмотря на то, что ИМ был перемещен в сторону увеличения, рейтинг R^- также изменяется, увеличиваясь на величину ΔR . Это позволяет сделать систему выбора направления перемещения ИМ «подозрительной». При увеличении ΔR «подозрительность» системы растет, принуждая ее чаще проверять правильность выбранного направления перемещения ИМ.

В рейтинговой системе, по существу, сравнивается значение $|\Delta Y_{\phi} / \Delta X|$ при перемещениях в различных направлениях, и система окажется неработоспособна, только если за время цикла изменение состояния процесса под действием нисходящего дрейфа будет происходить со значительным ускорением или замедлением. В таком случае система будет совершать перемещения ИМ все большей величины в одну и другую сторону, пока влияние ускорения не удастся преодолеть.

Основная задача рейтинговой системы заключается в привязке частоты проведения поверочных реверсов к соотношению между полезностью движения в одну и другую сторону. Под полезностью понимается значение $|\Delta Y_{\phi} / \Delta X|$, приведенное к пределам $[0;100]$.

Если разница между R^+ и R^- высока, то наименьший из рейтингов вскоре достигнет уровня второго рейтинга, и реверс произойдет через достаточно продолжительное время. Уменьшение частоты проведения поверочных реверсов благоприятно сказывается на характеристиках надежности системы.

Таким образом, после всех преобразований на вход системы управления ИМ поступит сигнал: $X_c(i) = X_c(i-1) + \sigma \cdot \Delta X_c$ (ΔX_c характеризует величину перемещения ИМ, а σ – направление перемещения).

В рассматриваемой системе нечеткий регулятор формирует управляющий сигнал U в соответствии с принципом нечеткой логики.

Входные нормированные сигналы нечеткого регулятора обозначим как X_1 , X_2 и X_3 , а нормированный выходной сигнал как U .

Введем лингвистические переменные:

X_1 - «Относительное приращение выходного сигнала»;
 X_2 - «Относительное приращение выходного сигнала после прохождения через фильтр»; X_3 - «Приращение выходного сигнала»; U - «Управляющий сигнал».

В области определения текущего нормированного сигнала рассогласования X_1 введем два нечетких множества, определяющих значения лингвистической переменной X_1 , соответствующими функциями принадлежности:

$$[A_1^{x_1} = \text{«Большое»}; A_2^{x_1} = \text{«Нулевое»}].$$

Аналогично определим функции принадлежности для значений лингвистической переменной X_2 и X_3 :

$$[A_1^{x_2} = \text{«Большое»}; A_2^{x_2} = \text{«Нулевое»}; [A_1^{x_3} = \text{«Большое»}; A_2^{x_3} = \text{«Нулевое»}].$$

Графически функции принадлежности нечетких множеств $\mu(X)$ и значения их параметров $A_1^{x_1}$, $A_2^{x_1}$, $A_1^{x_2}$, $A_2^{x_2}$, $A_1^{x_3}$, $A_2^{x_3}$ в зависимости от величин входных переменных X_1 , X_2 и X_3 представлены на рис.5.

В начале каждого цикла работы системы вычисляются значения функции принадлежности $\mu(X)$ для каждого нечеткого множества, определенных для соответствующих входных переменных.

В качестве операций конъюнкции и импликации используется операция алгебраического произведения, а в качестве метода дефазификации - метод по среднему центру.

Нечеткие множества значений выходной лингвистической переменной U определены функциями принадлежности: $[B_1 = \text{«Большое»}; B_2 = \text{«Нулевое»}]$ и представлены в виде функции:

$$\mu^Y(x) = \delta(x-b) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = b \\ 0, & \text{если } x \neq b \end{cases}$$

где значения параметра b для каждого значения выходной лингвистической переменной представлены в виде вектора $b = [1, 0]^T$.

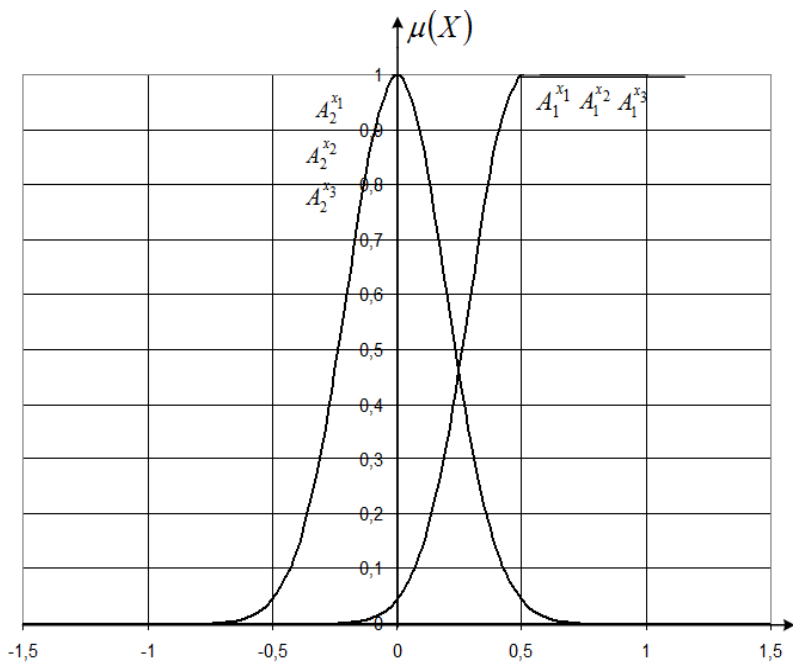


Рис.5. Функции принадлежности

Для организации поискового режима и получения правил нечеткого управления используется основное эвристическое правило: «Если текущее приращение выходной величины большое, то расчет управляющего воздействия необходимо производить по текущему значению коэффициента передачи объекта управления без учета фильтра. Если текущее приращение выходной величины маленькое, то выходная величина приближается к экстремуму, следовательно, чтобы уменьшить влияние помех, необходимо вести управление с учетом фильтра».

Функционирование программно реализованного нечеткого регулятора определяется следующей базой правил:

$$R_1 : (X_1 = A_1^{x_1}) \cap (X_2 = A_1^{x_2}) \cap (X_3 = A_1^{x_3}) \rightarrow U = B_1;$$

$$R_2 : (X_1 = A_1^{x_1}) \cap (X_2 = A_2^{x_2}) \cap (X_3 = A_1^{x_3}) \rightarrow U = B_1;$$

$$R_3 : (X_1 = A_2^{x_1}) \cap (X_2 = A_2^{x_2}) \cap (X_3 = A_2^{x_3}) \rightarrow U = B_2;$$

$$R_4 : (X_1 = A_2^{x_1}) \cap (X_2 = A_1^{x_2}) \cap (X_3 = A_2^{x_3}) \rightarrow U = B_1;$$

$$R_5 : (X_1 = A_1^{x_1}) \cap (X_2 = A_1^{x_2}) \cap (X_3 = A_2^{x_3}) \rightarrow U = B_1;$$

$$R_6 : (X_1 = A_2^{x_1}) \cap (X_2 = A_1^{x_2}) \cap (X_3 = A_1^{x_3}) \rightarrow U = B_2.$$

Каждое правило логически объясняет реальную ситуацию и рекомендует соответствующее действие при управлении.

При этом каждое правило имеет степень достоверности своей посылки, определяемую согласно формуле:

$$\mu_i^P = \mu_j^{x_1} \cap \mu_k^{x_2} \cap \mu_l^{x_3},$$

где $i = 1, 2, \dots, 6$; $j = 1, 2$; $k = 1, 2$; $l = 1, 2$; \cap – отображение операции конъюнкции (логического «И»).

Далее производится операция получения выходных нечетких множеств для каждого правила в соответствии с достоверностью посылки этого правила в соответствии с формулой

$$\mu_i^R = \mu_i^P \cap \mu_i^Y,$$

где $i = 1, 2, \dots, 6$.

Затем производится операция дефаззификации для получения четкого значения выходной переменной в соответствии с выражением

$$Y = \sum_{i=1}^6 b_i \mu_i^R / \sum_{i=1}^6 \mu_i^P,$$

где b_i – центр функции принадлежности выходного нечеткого множества для i -го правила.

База правил представляет собой некоторую модель, которая, не являясь моделью процесса управления, является качественной моделью собственного управления, то есть отражает логику работы человека-эксперта.

Для расчёта переходного процесса в контуре оптимизации взяты следующие параметры системы.

Инерционность процесса $T_1 = 0,5 \text{ с}$, время запаздывания $\tau_3 = 0,15 \text{ с}$, постоянная времени фильтра $T_\phi = 0,1 \text{ с}$, величину зоны примем $\Delta Z_n = 1 \text{ MBm} \cdot \text{с}$. Напряжение питания $U_{\text{п}} = 341 \text{ В}$.

Моделирование проведём при значении напряжения питания равном 431 В . Начальное значение тока примем равным 60 кА (ток короткого замыкания).

Примем значения блоков масштабирования нечеткого регулятора за:

$K_1 = 0,24$, $K_2 = 1,5$, $K_3 = 1,5$, $K_4 = 0,5$.

Минимальное движение электрода $\Delta X_{\text{min}} = 1$, время интегрирования для блока модуляции $T_{\text{и}} = 0,02 \text{ с}$.

Дискретность расчёта принята равной $0,01 \text{ с}$.

В результате моделирования разработанной системы управления электрическим режимом АКП были получены следующие графики (рис. 6, 7).

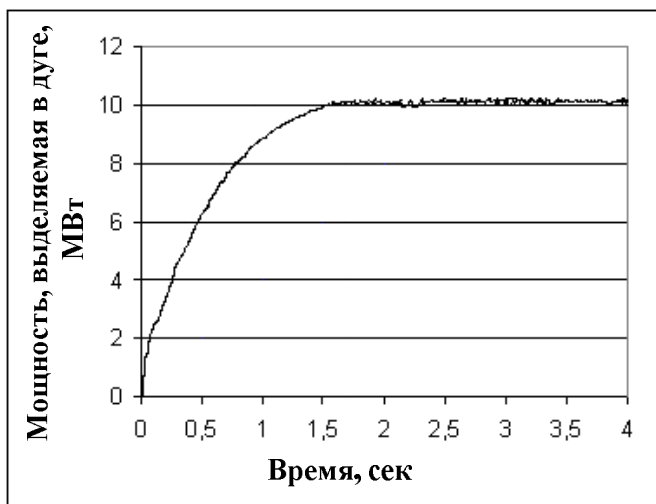


Рис.6. Траектория изменения мощности, выделяемой в дуге

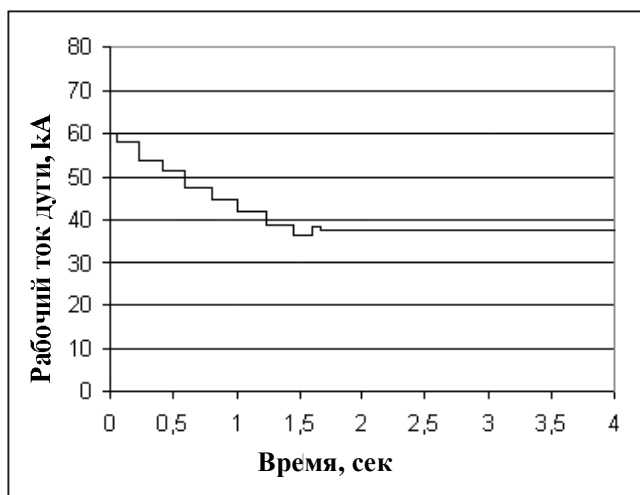


Рис.7. Траектория изменения рабочего тока дуги

Список литературы

1. Автоматизация и оптимизация управления технологическими процессами внепечной доводки стали: монография / Е.Н. Ишметьев, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин, З.Г. Салихов, У.Б. Ахметов. – Магнитогорск: МГТУ, 2008. – 311 с.
2. Ефроймович Ю.Е. Оптимальные электрические режимы дуговых сталеплавильных печей. – М.: Металлургия, 1956. – 98 с.

УДК 681.511

**Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков,
Б.Н. Парсункин**

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ДСП

Управление энергетическим режимом ДСП представляет собой достаточно сложную проблему, так как существует воз-

возможность неконтролируемого дрейфа статических рабочих характеристик, вызванного большими колебаниями реактивного сопротивления печи в процессе плавки. Кроме того, для энергетического режима ДСП характерно наличие высокочастотных помех, затрудняющих процесс управления электродами.

В настоящее время существует несколько алгоритмов управления энергетическим режимом ДСП. Так, например, хорошо зарекомендовала себя система регулирования электродов ArCOS NT, применяемая в ОАО «ММК». Однако следует отметить, что данная система функционирует в жестком программном режиме плавки. При этом особенности технологического процесса учитываются только на этапе настройки таблиц задаваемых значений параметров регулирования. То есть ArCOS требует настройки на конкретный агрегат, не учитывая нестационарности характеристик объекта в процессе плавки.

Поэтому совместно с ArCOS целесообразно применять поисковую систему экстремального регулирования, которая будет поддерживать оптимальный режим работы ДСП даже в условиях нестационарности ее характеристик. При этом целью оптимизирующего алгоритма будет поддержание максимальной производительности печи и снижение затрат на электроэнергию путем обеспечения максимальной мощности, выделяемой в электрической дуге.

Одним из вариантов оптимального управления, отличающимся новизной подходов, является прогнозирующее управление с моделью, получившее значительное развитие в последнее десятилетие.

При этом под прогнозом понимается продление в будущее тенденции развития управляемого параметра в прошлом.

Простейшая система оптимального прогнозирующего управления представлена на рис. 1.

В этой схеме текущее и несколько предыдущих значений управляемой величины подаются на блок аппроксимации и прогноза, в котором определяются параметры аппроксимирующего полинома и рассчитывается по нему прогнозное значение сигнала согласно тренду на следующий цикл работы системы.

Прогнозное значение, полученное на предыдущем цикле работы системы, сравнивается с текущим значением управляемого параметра. Если текущее значение лучше прогнозное, то выбранное направление движения исполнительного устройства сохраняется на следующий цикл работы системы.

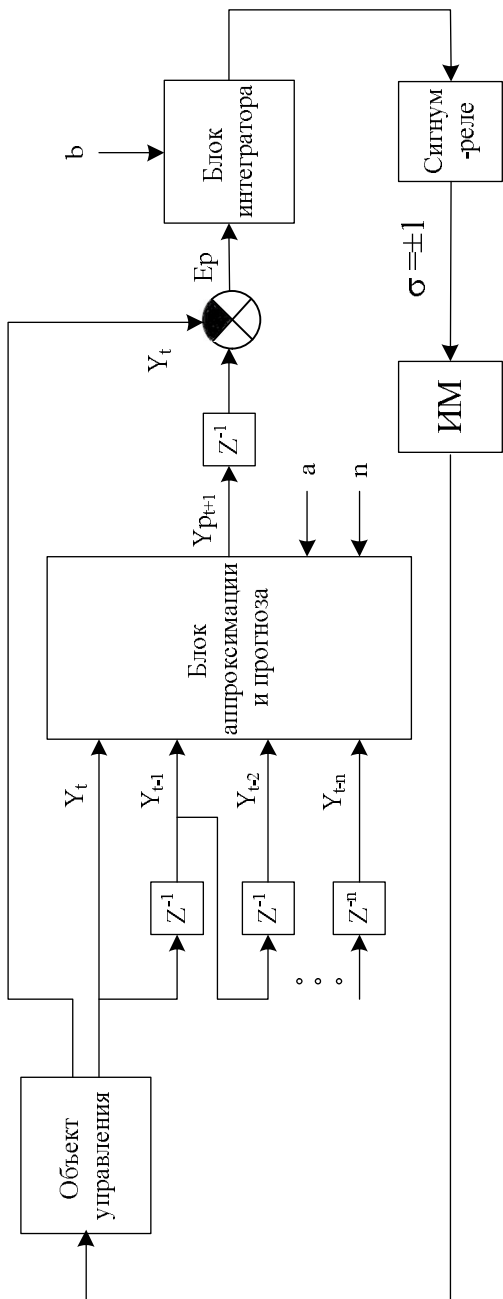


Рис. 1. Схема системы оптимального прогнозирующего управления:
 а – порядок аппроксимирующего полинома; n – число точек для прогноза;
 b – число циклов для интегрирования ошибки прогноза

Исполнительное устройство обычно достаточно инерционно по сравнению с объектом управления. Поэтому для обеспечения возможности его перемещения и для исключений частых повторных реверсов полученная ошибка прогноза интегрируется за определенное число последних циклов. При этом направление перемещения определяется по знаку интеграла с использованием сигнум-реле.

Предложенная система управления будет достаточно эффективно работать, если на управляемую величину не действуют высокочастотные помехи (шумы).

Экспериментальные данные, полученные на ДСП в течение одной из плавков, показывают, что временной ряд управляемой величины (активной мощности) характеризуется сильной зашумленностью (рис. 2).

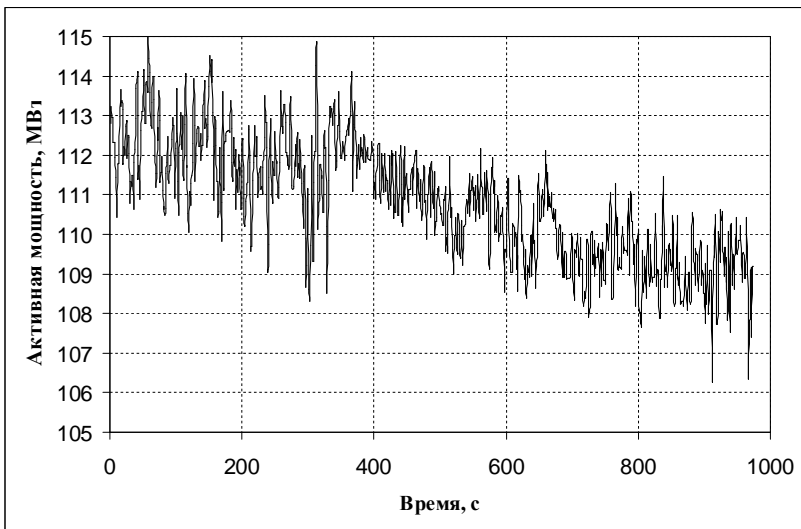


Рис. 2. Временной ряд активной мощности ДСП

Для данного экспериментального временного ряда был произведен анализ с использованием аппарата автокорреляционной (АКФ) и частной автокорреляционной (ЧАКФ) функций.

АКФ показывает связь сигнала с копией самого себя, смещенной на величину интервала по времени – лага.

ЧАКФ отличается от АКФ тем, что при её построении устраняется корреляционная зависимость между наблюдениями внутри лагов.

Графики АКФ и ЧАКФ для экспериментальных значений активной мощности ДСП (см. рис. 2) представлены на рис. 3, 4.

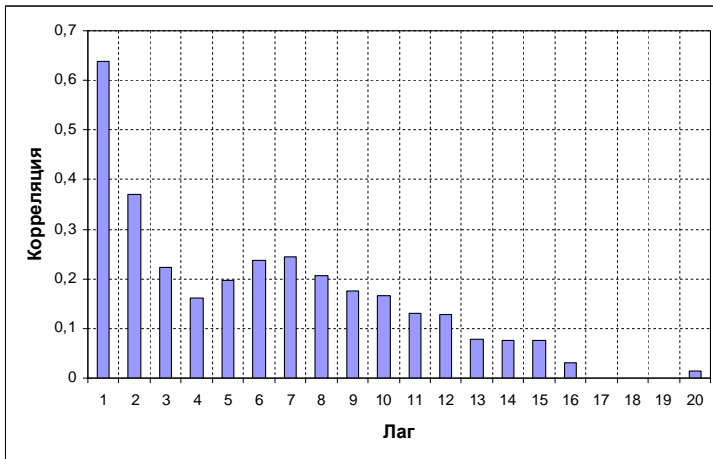


Рис. 3. Автокорреляционная функция экспериментального временного ряда

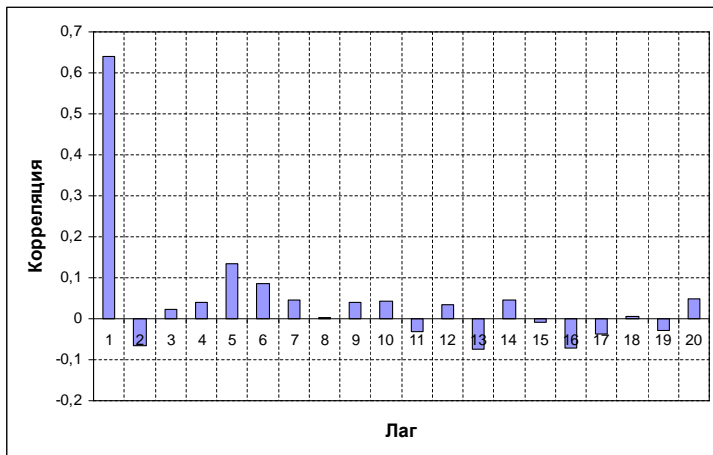


Рис. 4. Частная автокорреляционная функция экспериментального временного ряда

График АКФ плавно убывает, демонстрируя наличие автокорреляций в исследуемом временном ряде значений активной мощности ДСП. То есть текущее значение параметра будет зависеть от предыдущих значений.

График ЧАКФ имеет два пика на первом и пятом лагах, выходящих за уровень случайных колебаний, а это означает, что существует зависимость между текущим и предыдущим значениями и между текущим значением и значением, отстающим от него на пять временных циклов (периодов отсчета).

Для улучшения качества прогнозирования такого временного ряда можно использовать в качестве прогнозирующей модели модель авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего ARIMA, которая выдает прогнозное значение управляемой величины с учетом внутренних корреляций ее временного ряда [1,2].

Процесс авторегрессии AR(p) записывают обычно следующим уравнением:

$$Y_t = a_t + f_1 \cdot Y_{t-1} + f_2 \cdot Y_{t-2} + \dots + f_p \cdot Y_{t-p}.$$

Здесь Y_t – наблюдения временного ряда в моменты времени t ; f_i - параметры авторегрессии; a_t - случайная величина, имеющая нулевое среднее значение и постоянную, не зависящую от времени дисперсию («белый шум»).

При этом величина p задает порядок авторегрессии, а первые p членов ряда образуются в соответствии с уравнениями:

$$Y_0 = a_0; Y_1 = a_1 + f_1 \cdot Y_0 \dots;$$

$$Y_p = a_p + f_1 \cdot Y_{p-1} + f_2 \cdot Y_{p-2} + \dots + f_p \cdot Y_0.$$

Параметры f_i при этом заключены в пределах от -1 до 1.

Процесс скользящего среднего MA(q) обычно записывают в следующем виде:

$$Y_t = a_t - g_1 \cdot a_{t-1} - g_2 \cdot a_{t-2} - \dots - g_q \cdot a_{t-q}.$$

Здесь Y_t – тоже наблюдения временного ряда в моменты времени t ; g_i - коэффициенты процесса скользящего среднего; a_t - случайная величина.

Величина q задает порядок скользящего среднего, а первые q членов ряда можно найти по формулам:

$$Y_0 = a_0; Y_1 = a_1 + g_1 \cdot a_0 \dots;$$

$$Y_q = a_q + g_1 \cdot a_{q-1} + g_2 \cdot a_{q-2} + \dots + g_q \cdot a_0.$$

Параметры g_i при этом заключены в пределах от -1 до 1.

В действительности приведенное уравнение эквивалентно ряду, образованному скользящими средними с переменной базой усреднения, отсюда и его название.

В реальном временном ряде эти два процесса необязательно встречаются в чистом виде. Тогда временной ряд можно представить в виде суммы двух процессов: авторегрессии порядка p и скользящего среднего порядка q :

$$Y_t = f_1 \cdot Y_{t-1} + f_2 \cdot Y_{t-2} + \dots + f_p \cdot Y_{t-p} + a_t - g_1 \cdot a_{t-1} - g_2 \cdot a_{t-2} - \dots - g_q \cdot a_{t-q}.$$

Схема управления после добавления модели ARIMA в рассмотренную ранее систему прогноза представлена на рис. 5.

Система работает следующим образом:

1. По значительному числу точек $n > 20$ строится аппроксимирующий полином, либо используется экспоненциальная фильтрация для получения текущего отфильтрованного сигнала.
2. По полиному определяется значение прогноза на следующий шаг.
3. Данные по полиному вычитаются из данных реального ряда, чтобы получить ряд с нулевым математическим ожиданием, т.е. с нулевым средним.
4. На основе ряда с нулевым средним рассчитывается прогноз по ARIMA-модели (одна точка).
5. Прогноз по аппроксимирующему полиному складывается с прогнозом по ARIMA-модели, формируя окончательное значение прогноза на следующий шаг.

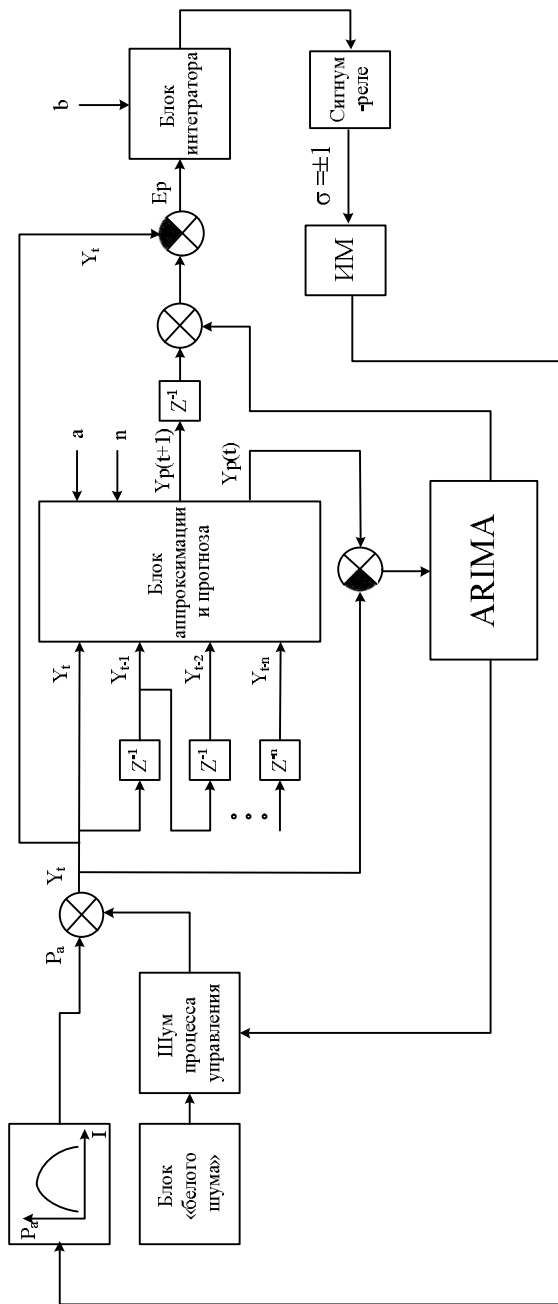


Рис.5. Схема системы оптимального прогнозирующего управления с использованием модели

Далее система работает как рассмотренная ранее система прогноза.

После применения модели ARIMA к временному ряду значений мощности, АКФ и ЧАКФ остатков показали, что теперь значения управляемого параметра некоррелированы, т.е. не зависят друг от друга (рис. 6, 7).

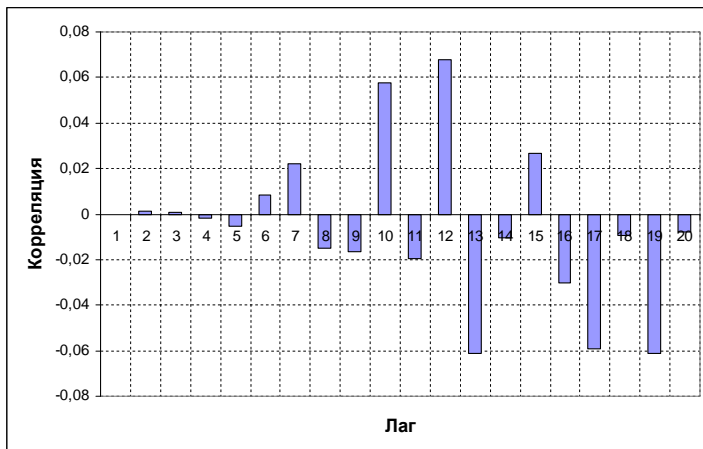


Рис. 6. Автокорреляционная функция остатков после применения ARIMA-модели

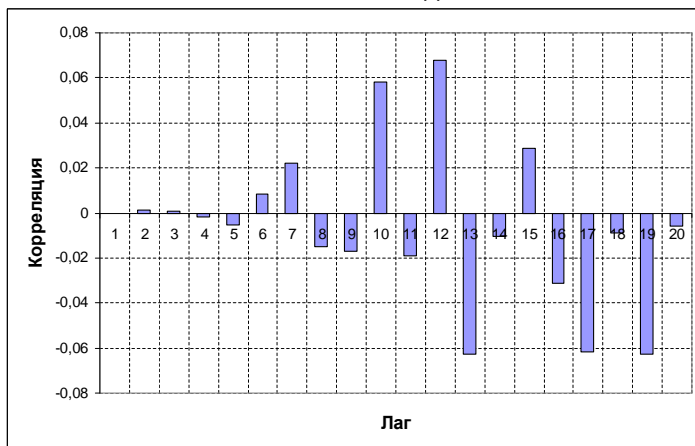


Рис. 7. Частная автокорреляционная функция остатков после применения ARIMA-модели

Работа системы с моделью ARIMA была смоделирована с использованием программного продукта Delphi. Результаты моделирования оформлены в виде графиков, представленных на рис. 8, 9. Как видно из представленных рисунков, разработанная CAO поддерживает максимальное значение мощности ДСП даже при наличии высокочастотных помех.

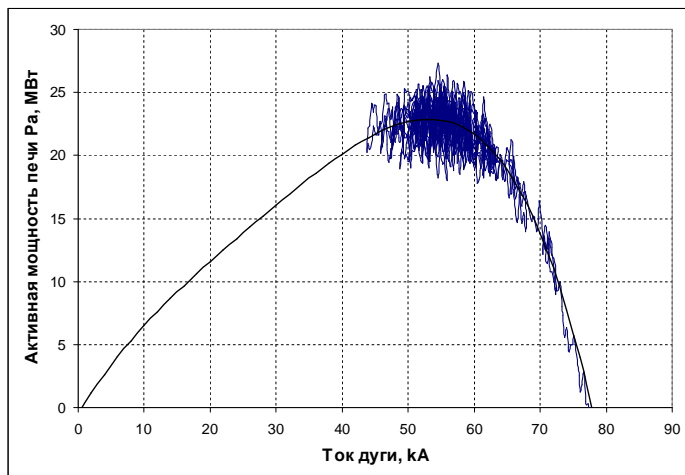


Рис. 8. Фазовый портрет CAO с использованием прогнозной модели ARIMA

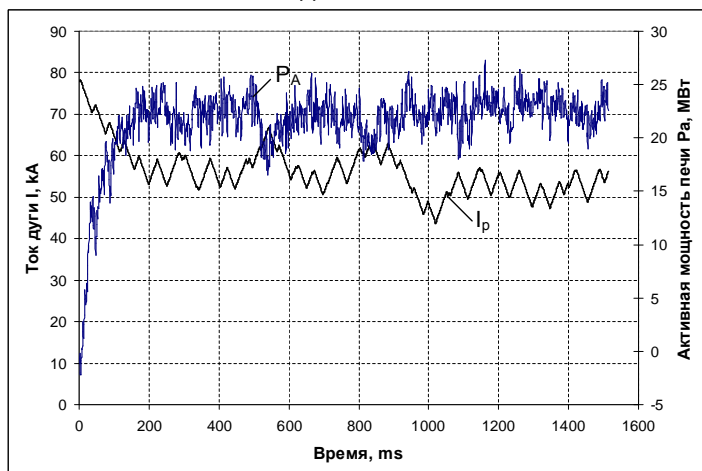


Рис. 8. Переходные процессы в CAO с использованием прогнозной модели ARIMA

Данный оптимизирующий алгоритм на основе применения модели прогноза ARIMA может быть использован и для других технологических процессов, например для доменного процесса, который характеризуется определенной цикличностью.

Список литературы

1. Дуброва Т.А. Статистические методы прогнозирования в экономике. – М.: Московский государственный университет экономики, статистики и информатики, 2004. – 136 с.
2. Тихонов Э.Е. Методы прогнозирования в условиях рынка. – Невинномысск: Северо-Кавказский государственный технический университет, 2006. – 221 с.

УДК 621.778.01

Ульянов Д.В., Радионов А.А., Бардин С.В.
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ПРЯМОТОЧНОМ ВОЛОЧИЛЬНОМ СТАНЕ

Волоочильные цеха метизно-металлургических предприятий Российской Федерации представлены многообразием технологий волочения и, как следствие, волоочильного оборудования. Особо распространено холодное многократное волочение, осуществляемое на машинах со скольжением и без него. Наиболее энерго- и ресурсосберегающими являются производства, реализованные на прямоточных волоочильных станах, которые по сравнению с другими типами станов способствуют как увеличению производительности до 30%, так и улучшают качество выпускаемой продукции в целом.

Немаловажной задачей при разработке и совершенствовании систем автоматизированного электропривода блоков волоочильного стана является определение и поддержание в процессе волочения оптимальных технологических параметров. Так, предлагаемые ранее критерии, основанные лишь на минимизации удельных энергозатрат, не всегда обеспечивают стабильное безобрывное волочение. В процессе волочения проис-

ходит износ волок, что является причиной возникновения медленно изменяющихся возмущений. Неучет таких возмущений приводит к нестабильности процесса волочения и диктует необходимость анализа возможности реализации систем адаптивного регулирования электроприводами блоков волочильного стана.

В настоящее время системы управления электроприводами волочильных блоков строятся по принципу управления по замкнутому циклу с обратными связями как по отклонению, так и по возмущению. Схемы управления по отклонению делают всю электромеханическую систему в целом нечувствительной к изменению свойств отдельных ее элементов. Однако при управлении процессом волочения с большим количеством возмущений эффективность управления снижается. Недостатком систем управления по возмущению является использование фиксированной модели, не учитывающей нестационарность объекта управления.

Наиболее полно и эффективно принцип обратной связи может быть реализован при адаптивном управлении. При этом основной задачей управления процессом волочения на прямоточном волочильном стане является стабилизация противонапряжения – натяжения в обрабатываемой проволоке перед волокой.

Здесь под адаптацией следует понимать процесс изменения структуры системы, ее параметров, а также в ряде случаев и управляющих воздействий. Целью адаптации является достижение заданного технологией качества управления при начальной неопределенности и изменяющихся условиях работы.

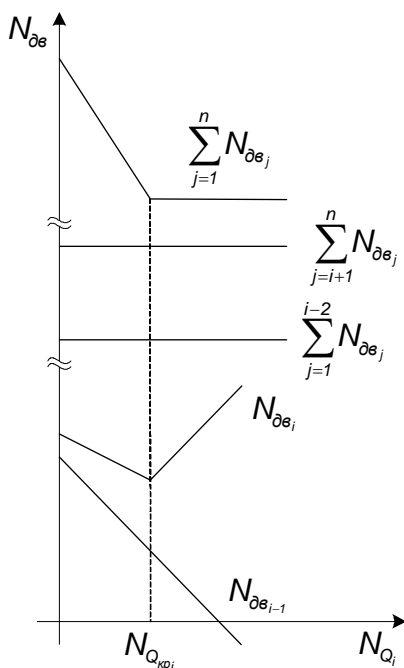


Рис. 1. Асимптотические кривые мощности двигателей

В работе Радионова А.А., Радионовой Л.В. (Энергетический подход к исследованию влияния противонатяжения на процесс волочения // Изв. вузов. – Черная металлургия. – 2008. – № 5. – С. 19-22) получены графики зависимости мощности, потребляемой электроприводами блоков волочильного стана, от величины противонатяжений в конкретном i -ом промежутке (см. рис. 1). Характеристики построены для статического режима работы при пренебрежении потерями как в кинематических передачах стана, так и в его электроприводах. Мощность, потребляемая двигателем i -го барабана, может быть определена как

$$N_{\partial e, i} = N_{T_i} - N_{Q_{i+1}} \quad (1)$$

и имеет форму с ярко выраженным минимумом. Здесь N_{T_i} – мощность, подводимая к i -му очагу деформации тянущим усилием T_i через передний конец проволоки; $N_{Q_{i+1}}$ – мощность, подводимая к очагу деформации силой противонатяжения Q_{i+1} через задний конец проволоки.

Вид кривой мощности ($i-1$)-го двигателя носит убывающий характер с наклоном относительно оси абсцисс равным 45° .

Суммарная мощность, потребляемая всем станом, в зависимости от величины противонатяжения в любом его i -м промежутке в диапазоне значений противонатяжений $0 \dots Q_{кр}$ убывает, причем скорость убывания превышает скорость роста противонатяжения, а затем остается неизменной вплоть до обрыва проволоки в этом промежутке.

Наличие минимума $N_{\partial e, i}$ позволяет утверждать, что для каждого конкретного маршрута волочения существуют оптимальные значения противонатяжений, при которых потребляемая электроприводами мощность минимальна.

Иначе критерий оптимальности можно сформулировать на основании требований технологического процесса. В общем виде такой критерий может быть записан в следующей форме:

$$\xi = \int_0^{\infty} (i, \Phi, \omega, Q, U), \quad (2)$$

где i , Φ , ω – ток якоря, магнитный поток и угловая скорость двигателя постоянного тока электропривода барабана; Q – противонатяжение; U – управляющее воздействие.

При дальнейшем рассмотрении для удобства принимается квадратичный критерий качества, при котором минимизируется квадрат отклонения противонатяжения от желаемых значений

$$\xi = \int_0^{\infty} \beta \cdot (Q^* - Q)^2 \cdot dt, \quad (3)$$

где β – весовой коэффициент; Q^* , Q - заданное и действующее значения противонапряжения.

Учитывая U-управление, которое присутствует при реализации системы управления процессом, функционал (3) запишется в виде

$$\xi = \int_0^{\infty} [\beta(Q^* - Q)^2 + \alpha \cdot U^2] \cdot dt. \quad (4)$$

Прямое регулирование противонапряжения с установкой соответствующего датчика труднореализуемо. На эксплуатируемых станах сегодня используются различные схемы питания приводных двигателей – с параллельным, последовательным и индивидуальным питанием якорей. Поэтому на практике адаптивное управление может быть организовано по току якоря, по угловой скорости двигателя или по потоку возбуждения.

УДК 621.78.223.01

Т.Г. Обухова

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОвого СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВОК НА ВЫХОДЕ ИЗ ПЕЧИ*

Для повышения пластических свойств и уменьшения сопротивления металла пластической деформации при прокатке заготовки предварительно подвергают нагреву в методических печах.

Увеличение температуры нагрева в печи выше установленной, несмотря на некоторое облегчение работы прокатного оборудования, является нежелательным ввиду ухудшения механических свойств металла, повышения угара, а также ввиду

* Работа выполнена под руководством д-ра техн.наук, профессора каф. ПК и СУ Б.Н. Парсункина

перерасхода топлива. Температура нагрева ниже заданного по технологии интервала требует большего расхода электроэнергии на прокатку и приводит к перегрузкам прокатного оборудования, быстрого выхода его из строя. Поэтому контроль качества нагрева заготовок перед прокаткой является важной и актуальной задачей.

Качественным нагревом считается такой, при котором обеспечиваются заданные конечные параметры и отсутствует брак металла. Под названными параметрами следует понимать:

- усредненная температура поверхности заготовки на выходе из печи соответствует заданному значению;
- перепад температуры по толщине заготовок не превышает допустимых значений;
- перепад температуры по длине заготовок соответствуют принятой технологии прокатки.

Выбор этих параметров зависит от химического состава стали.

Непрерывное определение распределения температур по толщине заготовки может быть выполнено только расчетным путем с периодическим уточнением получаемых результатов при измерении действительной температуры на поверхности заготовки. А значит, и перепад температур по сечению заготовки можно рассчитать лишь по модели нагрева.

В производственных условиях требуется простая, но представительная модель, использующая информацию с уже имеющихся в АСУ ТП нагрева датчиков. Такую модель можно построить на основе метода конечных разностей МКР, в котором используется аппроксимация искомых непрерывных функций совокупностью ее дискретных значений. В МКР эти значения относятся к узловым точкам, регулярно покрывающим область определения, вплоть до ее границ. Все узлы увязываются в общую сетку.

В основе математической формулировки лежит закон сохранения энергии, выражаемый уравнением:

$$C \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = -\operatorname{div} \vec{q}, M \in G, \quad (1)$$

где C - удельная объемная теплоемкость [Дж/(м³·К)]; $T(M, \tau)$ и $q(M, \tau)$ - температура и плотность теплового потока в точке $M = \{x, y, z\}$ в момент времени τ ; G - расчетная область пространства; λ - коэффициент теплопроводности [Вт/(м·К)].

Учитывая указанные выше допущения и применяя закон Фурье

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T, \quad (2)$$

получим уравнение теплопроводности, описывающее изменение температурного поля во времени:

$$C \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T). \quad (3)$$

При постановке краевых условий для уравнения теплопроводности (3) следует указать распределение температуры в начальный момент времени $T_n(M)$ и сформулировать граничное условие, выражающее особенности теплообмена на поверхности нагрева Γ , отделяющей область G от окружающей среды. При этом предполагается, что заданным по условию является: температурное поле поверхности тела $T_w(M, \tau)$, $M \in \Gamma$ (граничное условие I рода), распределение плотности теплового потока на этой поверхности $q_w(M, \tau)$, $M \in \Gamma$ (граничное условие II рода) или определенное соотношение между температурой $T_w(M, \tau)$ и плотностью потока $q_w(M, \tau)$ (граничное условие III рода): $q_w = f(T_w)$.

Для выравнивания температурного поля заготовки в томительной зоне печи температуру поверхности заготовки стабилизируют, поэтому для расчетов можно использовать граничное условие I рода. Для расчетов нагрева в сварочных зонах следует воспользоваться условием III рода.

Температурное поле заготовки по сечению $T(y, 0)$ при входе в томительную зону имеет вид параболы с минимальной температурой в центре заготовки при условии симметричного нагрева:

$$T(y, 0) = dT_0 / s^2 \cdot y^2 + (T_0 - \Delta T_0), \quad 0 \leq y \leq s, \quad (4)$$

где T_0 – температура поверхности; $(T_0 - \Delta T_0)$ – температура в центре заготовки.

Основная идея МКР: непрерывная область изменения пространственной переменной $0 < y < s$ заменяется конечной совокупностью дискретно расположенных узловых точек

$y_1, y_2, \dots, y_n, y_{n+1}$. При равномерном расположении этих точек на отрезке $[0, s]$ их координаты равны $y_i = (i - 1) \Delta y$ при $i = 1, \dots, n+1$, где расстояние между соседними точками (шаг по координате) $\Delta y = s/n$. Аналогичным образом вместо непрерывного изменения температурного поля во времени рассматриваются значения температуры в фиксированные моменты времени $t_k = k \Delta t$, $k = 1, 2, \dots$, где Δt – интервал между двумя последовательными моментами времени (шаг по времени).

В плоскости (y, τ) совокупность узловых точек с координатами (y_i, τ_k) образует прямоугольную сетку. Расчет температурного поля $T(y, \tau)$ сводится к отысканию сеточной функции T_i^k , приближенно характеризующей температуру тела в узловых точках.

В данном случае зависимость искомых значений температуры в $k + 1$ -й момент времени от ее значений в предыдущий, k -й момент времени определяется разностными уравнениями неявным образом, поэтому для расчета дискретного температурного поля на каждом шаге по времени необходимо их совместное решение. Приведенная система разностных уравнений представляют собой систему n -линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных температур T_i^{k+1} , $i = 0, \dots, n$ которую в матричном виде можно записать: $A \cdot T^{k+1} = B$, где A – матрица коэффициентов, входящих в правые части уравнений; B – столбец свободных членов, определяемых температурами в предыдущий момент времени; $T^{k+1} = \{T_i^{k+1}\}$ – столбец искомых значений температур в последующий момент времени.

Для решения этой системы могут быть применены различные методы решения систем линейных уравнений – как прямые, так и итерационные. Наиболее эффективным, однако, оказывается использование так называемого метода прогонки, учитывающего характерную особенность матрицы A , а именно то, что отличными от нуля являются лишь те ее элементы, которые располагаются на трех диагоналях: главной и двух к ней прилегающих.

Сущность метода прогонки заключается в том, что решение системы разностных уравнений представляется в виде

$$T_i^{k+1} = \alpha_i T_{i+1}^{k+1} + \beta_i, \quad i = 0, \dots, n, \quad (5)$$

где α_i, β_i – некоторые вспомогательные коэффициенты.

И на каждом шаге по времени задача сводится к опреде-

лению величин α_i, β_i . При $i = 1$ значения α_i, β_i найдем из левого граничного условия:

$$\alpha_0 = \frac{2f}{1+2f}; \quad \beta_0 = \frac{T_0^k}{1+2f}, \quad \text{где} \quad f = d \frac{\Delta g}{\Delta y^2}. \quad (6)$$

Для нахождения остальных коэффициентов α_i, β_i :

$$\alpha_i = \frac{f}{1+f(2-\alpha_{i-1})}; \quad \beta_i = \frac{T_i^k + f\beta_{i-1}}{1+f(2-\alpha_{i-1})}. \quad (7)$$

$$T_i^{k+1} = \frac{f}{1+f(2-\alpha_{i-1})} T_{i+1}^{k+1} + \frac{T_i^k + f\beta_{i-1}}{1+f(2-\alpha_{i-1})}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Отметим, что температуры T^k , входящие в выражения для β_i , (87 для каждого шага по времени являются известными величинами: при $k=0$ они задаются начальным условием (4), а для каждого последующего момента времени определяются результатами предшествующего расчета. Таким образом, вычислив значения α_0, β_0 по формулам (6) и используя рекуррентные соотношения (7), можно последовательно найти все остальные значения α_i, β_i при $i = 2, \dots, n$.

Теперь, для того чтобы можно было начать применение формулы (5), необходимо определить температуру T_n в правом граничном узле. При граничном условии III рода получим:

$$T_n^{k+1} = \frac{T_n^{k+1} + 2f(V \cdot T_\Gamma + \beta_n)}{1+2f(1+V-\alpha_n)}, \quad V = \alpha \frac{\Delta y}{\lambda}, \quad (9)$$

где α – коэффициент теплоотдачи [Вт/(м²·К)].

В свою очередь, коэффициент теплоотдачи зависит от температур греющей среды и поверхности металла, приведенной степени черноты ε_{IP} . Добавим поправочный коэффициент на термическое сопротивление окалины K ($0 < K < 1$):

$$\alpha(T_W) = \varepsilon_{IP} \sigma_0 \frac{(T_\Gamma^4 - T_W^4)}{T_\Gamma - T_W} \cdot K. \quad (10)$$

Определение температурного состояния заготовок перед выдачей из печи позволит оперативно контролировать качество нагрева металла. Что, в свою очередь, приведет к стабилизации температурного режима прокатки и уменьшит число температурных нарушений технологии за счет контроля нагрева каждой заготовки перед выдачей.

Список литературы

1. Арутюнов В. А. и др. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
2. Опробование информационной системы контроля теплового состояния заготовок перед выдачей из методической печи / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Обухова Т.Г., Седельников С.В., Овчинников И.Ю. // Сталь. – 2006. – №12. – С.75-78.

УДК 519.24

С.Н. Рахманов

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОТЖИГА И ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛОСЫ НА АГРЕГАТЕ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ОЦИНКОВАНИЯ

В последние годы еще больше усилилась роль техники измерений и управления в процессах производства продукции высокого стабильного качества при высокой производительности.

Регулирование температуры полосы на агрегате непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ) предполагает поддержание определенной температуры нагрева, времени высокотемпературной выдержки, скорости охлаждения и получение заданного качества продукта.

Общая схема участка термической обработки полосы показана на рис. 1.

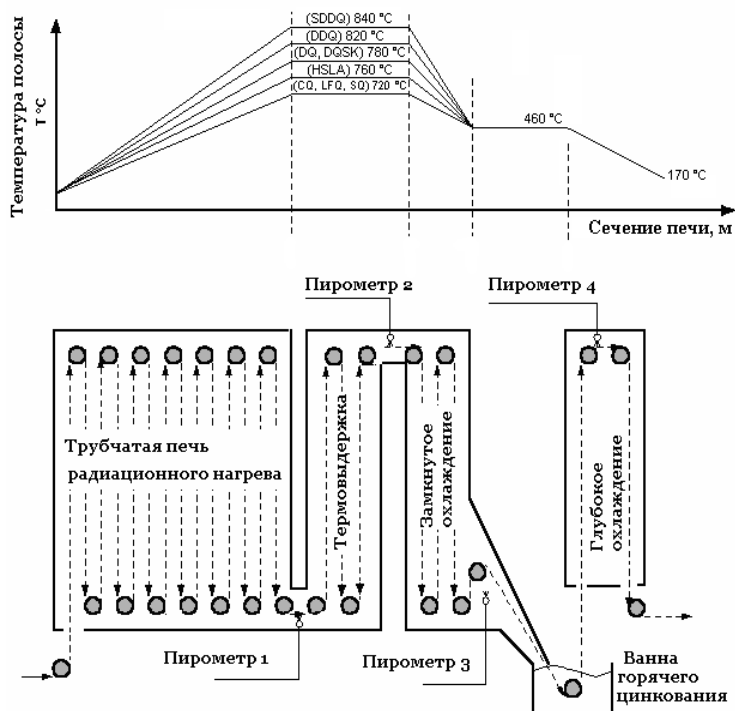


Рис. 1. Технологический процесс термообработки полосы на АНГЦ и температурный режим в зависимости от групп обрабатываемой стали

Башенного типа печь радиационного нагрева содержит три отделения:

- отделение нагрева (имеет семь зон регулирования температуры);
- отделение температурной выдержки (имеет две зоны регулирования температуры);
- отделение регулируемого охлаждения (имеет четыре зоны регулирования температуры).

Полоса в отделениях нагрева и выдержки нагревается излучением от радиационных труб, каждая из которых оснащена рекуперативной горелкой.

Для отопления радиационных (радиантных) труб используются высокоскоростные длиннофакельные горелки инъекционного (всасывающего) типа. В качестве топлива используется природный газ.

Существующая система управления не позволяет улучшить реакцию системы нагрева с радиантными трубами, поэтому для повышения точности регулирования температуры целесообразно применить промежуточное охлаждение.

На стадии нагрева нужно предусмотреть газоструйное охлаждение, и используя высокую скорость реакции системы охлаждения, достичь лучшей динамики управления температурой на выходе из зоны нагрева. При одной и той же заданной температуре полос в случае перехода с более толстой полосы на более тонкую в инерционной зоне нагрева иногда имеет место завышение температуры металла при пропуске тонкой полосы. В таких случаях в зоне промежуточного охлаждения нужно намеренно охлаждать передний конец тонкой полосы, склонный к перегреву в зоне нагрева, и таким способом обеспечивать постоянство температуры полосы. Наоборот при переходе с более тонкой полосы на более толстую еще в период пропуска тонкой полосы нужно заранее настраивать повышенную температуру печи, предполагаемый перегрев тонкой полосы устранять промежуточным охлаждением, а при пропуске толстой полосы охлаждение прекращать и достигать стабильной заданной температуры.

Функции секции охлаждения представлены на рис. 2.

Зона промежуточного охлаждения должна состоять из охлаждающего вентилятора, водяного газоохладителя, камеры охлаждения и коллекторов.

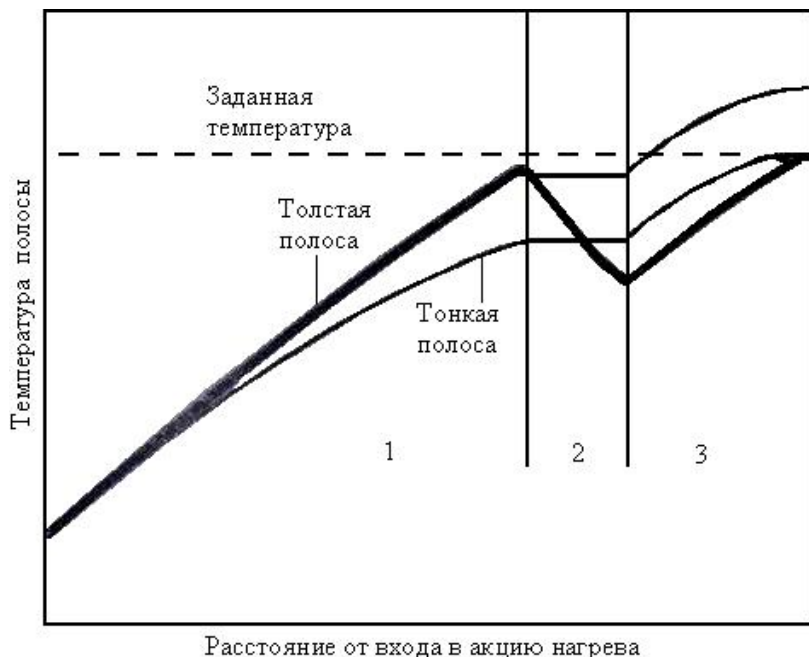
Ключевыми моментами регулирования температуры являются: использование модели теплопередачи для определения приращения температуры после охлаждения, расчет температуры полосы на выходе из зоны промежуточного охлаждения и выдача уставки в устройство децентрализованного управления низшего уровня.

Модель теплопередачи включает уравнение лучистого теплообмена в зоне горения:

$$CS \cdot \rho \cdot d \cdot (\partial TS / \partial t) = \Phi CG \cdot \sigma \cdot (TS^4 - TF^4),$$

где CS - теплоемкость; ρ - плотность полосы; d - толщина полосы; ΦCG - общий коэффициент теплопоглощения; σ -

постоянная Стефана-Больцмана; TS - температура полосы; TF - температура печи; t - время.



Расстояние от входа в акцию нагрева

Рис. 2. – Функции охлаждения:

1 – секция № 1 нагрева; 2 – секция охлаждения; 3 – секция № 2 нагрева

Обычно температура полосы на выходе определяется заданной температурой обработки конкретного продукта и толщиной полосы, и она изменяется скачкообразно на участке стыка полос. В зоне промежуточного охлаждения заранее настраивается частота вращения вентилятора охлаждения, работающего в контуре циркуляции, по командам системы слежения за металлом срабатывают шиберы, открывая и перекрывая подачу воздуха на полосу, и таким образом обеспечивается быстрая реакция системы.

Т.Г. Обухова
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ КЛИНКЕРА ОБЖИГОВОГО ОТДЕЛЕНИЯ ОАО «МЦОЗ»*

Разработанные и испытанные в цементной промышленности системы автоматического регулирования построены на использовании косвенной информации о технологическом состоянии материала в различных зонах печи по его температуре. Известные зависимости между температурой смеси и ее физико-химическим состоянием делают температурные факторы достаточно достоверными для использования их в качестве управляющих параметров.

Современная АСУ тепловым режимом вращающейся печи содержит следующие основные контуры регулирования:

- расхода шлама в печь для равномерной загрузки сырьевого материала, поступающего в печь;
- температуры перед дымососом и электрофильтром для защиты от перегрева частей дымососа и электрофильтра;
- разрежения дымососа в левом и правом рукаве для обеспечения необходимой тяги по пространству печи;
- температуры в пространстве печи для обеспечения заданного качества готового клинкера.

Также системой автоматизации предусмотрен контроль следующих технологических параметров:

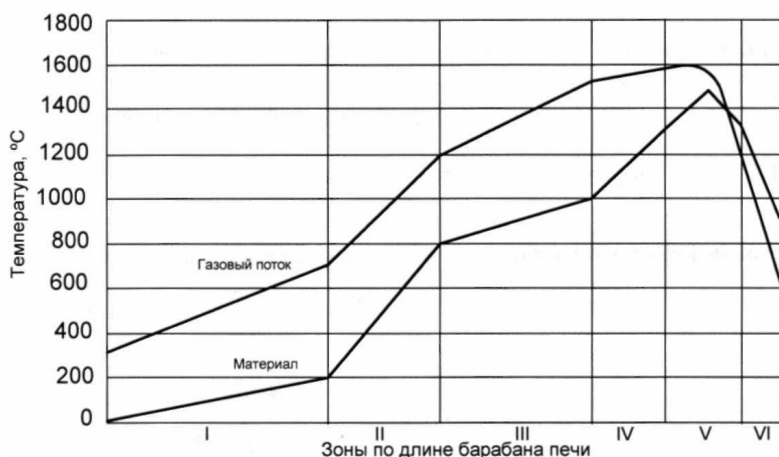
- температуры подшипников дымососа для защиты дымососа от перегрева, корпуса печи для защиты корпуса печи от прогара, после электрофильтра для обеспечения нормальной работы дымососу, отходящих газов на выходе из печи для обеспечения необходимого подогрева сырьевого шлама;
- содержания CO и O_2 в отходящих газах для обеспечения рационального сжигания топлива и уменьшения вредных выбросов, запыленности газа для подсчета количества материала, возвращаемого в печь, и для работы электрофильтра без перегрузок;

* При участии студентки гр.2102 Кучерук Е.С.

- расхода газа с коррекцией по температуре и давлению для расчета затрат по себестоимости процесса;
- разрежения перед фильтром, на выходе из печи, в зоне горелки для обеспечения необходимого газодинамического режима печи и для максимальной производительности электрофильтра;
- давления воздуха на пневмовинтовой насос для обеспечения бесперебойной работы насосов, природного газа перед горелкой для сообщения об аварийных ситуациях;
- управление отсечными клапанами и останов дымососа, для защиты оборудования и людей от возможных аварийных ситуаций.

На рисунке изображено распределение температур по зонам печи, по оси абсцисс отложена длина отдельных зон печи в процентах к общей длине барабана печи, а по оси ординат – температура газового потока и материала в каждой точке печи.

Ломаный характер кривой температуры материала показывает, что при нагревании сырьевой смеси в ней происходят различные физико-химические процессы, в одних случаях тормозящие нагревание (пологие участки), а в других – способствующие резкому нагреванию (крутые участки).



Распределение температур по длине барабана печи

В зоне испарения I поступающий шлам подвергается действию нагретых до высокой температуры отходящих дымовых

газов. В результате шлам нагревается и из него испаряется влага. В зоне подогрева II высушенный материал нагревается примерно до температуры 600°C. В зоне декарбонизации III протекает процесс разложения углекислого кальция CaCO_3 . Этот процесс осуществляется быстро в том случае, если температура достигает 900°C и более. В зоне экзотермических реакций IV взаимодействие между основным и кислотными оксидами продвигающегося материала протекает с большой скоростью вследствие более высокой температуры. В зоне спекания V материал частично плавится, т.е. спекается. Этот процесс начинается при температуре 1300°C, продолжается при дальнейшем повышении температуры до 1450°C и последующем охлаждении до температуры 1300°C. Из зоны спекания клинкер поступает в зону охлаждения VI.

Система осуществляет автоматический контроль и управление по температуре материала в каждой из трех основных зон: дегидратации, кальцинирования и спекания. По зоне дегидратации в качестве управляющего параметра может использоваться также температура отходящих газов, а по зоне спекания вводится коррекция по содержанию кислорода в отходящих газах.

Измерение температуры в пространстве вращающейся печи производится термопарой типа ТХА-0193-01, установленной в корпусе печи и вращающейся вместе с печью. Выводы холодного спая термопары подключены к троллеям, которые прикреплены к корпусу печи через изоляторы по всему периметру печи. Сигнал с троллей снимается щеточным механизмом, который расположен снизу печи на специальной площадке. Далее сигнал со щеток по компенсационным проводам поступает на пульт управления и вторичный прибор.

Для управления используют два регулирующих воздействия: изменение подачи топлива либо изменение подачи холодного воздуха.

Система автоматизации предназначена для поддержания температурного режима, обеспечивающего стабилизацию качества клинкера при минимальном расходе топлива и заданной производительности печи.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Андреев С.М.	25, 117	Лосев А.А.	25
Аникина О.В.	39	Логунова О.С.	56
Аркулис М.Б.	112	Мацко И.И.	56
Ахметов Т.У.	166	Миков А.Ю.	56
Ахметов У.Б.	166	Мишенева Н.И.	112
Баженов Н.М.	150	Москвин В.М.	104
Бардин С.В.	188	Мухина Е.Ю.	144
Беляков А.А.	80	Обухова Т.Г.	191, 200
Богданов Н.В.	153	Парсункин Б.Н.	61, 153, 166, 178
Брайчук О.А.	139	Пилипенко О.В.	130
Вечеркин М.В.	49	Радионов А.А.	188
Вострокнутова О.Н.	35	Рахманов С.Н.	80, 196
Галдин М.С.	61, 117	Рыскужина И.В.	35
Галкин М.В.	25	Рябчиков М.Ю.	69, 80, 178
Гасияров В.Р.	126	Рябчикова Е.С.	166, 178
Гладких Т.В.	130	Савинов А.С.	96
Гребенникова В.В.	144	Савинова Н.А.	148
Дмитриенко В.Д.	130	Савченко Ю.И.	35, 112
Евдокимов С.В.	150	Тубольцева А.С.	99
Еголаев В.В.	4	Ульянов Д.В.	188
Зибров П.Ф.	39	Усатый Д.Ю.	126
Идрисов И.Н.	148	Харитонов Д.А.	148
Коробейников А.Б.	160	Чесноков Ю.Н.	22
Лаптева А.В.	22	Шпонько А.А.	49
Леднов А.Ю.	148	Щелокон Я.М.	13
Леонов С.Ю.	130	Шорохов С.А.	61
Лисиенко В.Г.	4, 13, 22	Ягольников Е.Б.	45
Лисовская М.А.	35		

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
В.Г. Лисиенко, В.В. Еголаев АКАДЕМИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК ИМ. А.М. ПРОХОРОВА НА УРАЛЕ – ИНЖЕНЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ИННОВАЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ.....	4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Я.М. Щелоков, В.Г. Лисиенко ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ.....	13
Ю.Н. Чесноков, В.Г. Лисиенко, А.В. Лаптева ЭМИССИЯ В КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНЫХ ПРОЦЕССАХ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА – ПАРНИКОВОГО ГАЗА.....	22
С.М. Андреев, М.В. Галкин, А.А. Лосев МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ МЕТАЛЛА.....	25
Ю.И. Савченко, И.В. Рыскужина, М.А. Лисовская, О.Н. ВострокнUTOва УЛЬТРАЗВУКОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ЭМАП.....	35
О.В.Аникина, П.Ф.Зибров ПРИВЕДЕНИЕ ТАБЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ К ДЕТЕРМИНИРОВАННОМУ ВИДУ.....	39
Е.Б. Ягольникова АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ТАРИФ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ ОАО «ММК»	45
А.А. Шпонько, М.В. Вечеркин ВЫБОР АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ БАЗЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗОДУВНЫХ МАШИН КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	49
А.Ю. Миков, И.И. Мацко, О.С. Логунова ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ.....	56

Б.Н. Парсункин, М.С. Галдин, С.А. Шорохов МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ РАЗЛИВКЕ НА МНЛЗ.....	61
М.Ю. Рябчиков СПОСОБ МНОГОУРОВНЕВОГО ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ОБЛАСТИ РАССЕЯНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.....	69
М.Ю. Рябчиков, С.Н. Рахманов, А.А. Беляков СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАГРЕВА ПОЛОСЫ В ПРОТЯЖНОЙ ПЕЧИ БАШЕННОГО ТИПА АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ОЦИНКОВАНИЯ.....	80
А.С. Савинов МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ПОСТОЯННОЙ ЖЕСТКОСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОТЛИВКИ..	96
А.С. Тубольцева УСТАНОВКА ПО ИЗУЧЕНИЮ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЫРЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ.....	99
В.М. Москвин ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТНОЙ КЛЕТКИ СРЕДСТВАМИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ.....	104
М.Б. Аркулис, Ю. И. Савченко, Н.И. Мишенева РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ УПРУГО- ДЕФОРМИРОВАННОГО ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА.....	112
С.М. Андреев, М.С. Галдин ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	117

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В.Р. Гасияров, Д.Ю. Усатый СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ ПРОКАТА ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА 5000.....	126
---	-----

В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, Т.В. Гладких, О.В. Пилипенко СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.....	130
О.А. Брайчук ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ АО «ССГПО»	139
Е.Ю. Мухина, В.В. Гребенникова УПРАВЛЕНИЕ ОБРЕЗКОЙ КРОМКИ ПОЛОСЫ.....	144
А.Ю. Леднов, Н.А. Савинова, Д.А. Харитонов, И.Н.Идрисов АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ФИЗИКЕ. СООБЩЕНИЕ 1.....	148
С.В. Евдокимов, Н.М. Баженов МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ.....	150
Б.Н. Парсункин, Н.В. Богданов ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ КИСЛОРОДА И ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ...	153
А.Б. Коробейников ПЕРЕВОД СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ АГРЕГАТОВ ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА ЛПЦ-5 НА СОВРЕМЕННУЮ ПРОЦЕССОРНУЮ БАЗУ.....	160
У.Б. Ахметов, Т.У. Ахметов, Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АКП.....	166
Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ДСП.....	178
Д.В. Ульянов, А.А. Радионов, С.В. Бардин АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ПРЯМОТОЧНОМ ВОЛОЧИЛЬНОМ СТАНЕ.....	188
Т.Г. Обухова ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВОК НА ВЫХОДЕ ИЗ ПЕЧИ.....	191

С.Н. Рахманов СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОТЖИГА И ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛОСЫ НА АГРЕГАТЕ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ОЦИНКОВАНИЯ	196
Т.Г. Обухова АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ КЛИНКЕРА ОБЖИГОВОГО ОТДЕЛЕНИЯ ОАО «МЦОЗ»	200