

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

А.Л. Генкин, И.В. Никулина (ИПУ РАН)

Проанализированы особенности металлургических процессов как объектов управления. Рассмотрены типичные примеры применения различных методов идентификации в отечественной черной металлургии, а именно: при создании АСУ процессами выплавки стали, горячей и холодной прокатки стального листа, травления и нанесения защитного покрытия на стальную полосу, горячей прокатки труб, а также при определении математического описания технологических процессов, протекающих в нагревательных печах и многих других металлургических агрегатах.

Ключевые слова: черная металлургия, методы идентификации, параметрическая идентификация, структурная идентификация, математические модели.

Введение

Металлургия как отрасль промышленности подразделяется на черную и цветную. Черная металлургия как подотрасль металлургической промышленности включает добычу и обогащение руд черных металлов, производство огнеупоров, кокса, ферросплавов, чугуна, стали. К черной металлургии относят также производство проката черных металлов, стальных, чугунных и других изделий из черных металлов. Сюда же входят сбор и подготовка лома, утилизация шлаков. В соответствии с этим, металлургический комбинат объединяет рудник, коксохимическое предприятие, доменные, сталеплавильные, прокатные цехи. К черным металлам относит железо. В черной металлургии применяются, как правило, только пирометаллургические процессы, которые осуществляются при высоких температурах с полным или частичным расплавлением перерабатываемых материалов.

В работе представлены различные методы идентификации, применяемые в настоящее время для улучшения качества математических моделей, описывающих процессы в отечественной черной металлургии.

Особенности металлургических процессов как объектов управления

Являясь сложными технологическими объектами управления, металлургические процессы имеют ряд отличительных особенностей, которые необходимо учитывать при решении задач идентификации и управления. Перечислим основные из этих особенностей.

1. Наличие большого числа входных воздействий, влияющих на выходные переменные. Входными переменными являются воздействия и возмущения. Последние, в свою очередь, могут быть контролируемые и неконтролируемые, причем точное число неконтролируемых возмущений обычно неизвестно.

2. Существенные неопределенности структуры и характеристик внешних и внутренних возмущений.

3. Сложный характер зависимости между входными/выходными переменными, наличие внутренних перекрестных связей, переменная структура объекта, зависящая от внешних условий или специально формируемая.

4. Существенная нестационарность статических и динамических характеристик процессов.

5. Наличие значительных переменных запаздываний в управлениях, состояниях и измерениях объекта.

6. Высокий уровень помех, для борьбы с которыми широко применяются сглаживающие и фильтрующие устройства, а также статистические способы повышения помехозащищенности измерений.

7. Большая инерционность металлургических процессов.

8. Ограниченное число датчиков и измерительных устройств.

9. Наличие человека в контурах управления с целенаправленным активным поведением.

Бурное развитие методов идентификации и их широкое применение в металлургии обусловлено трудностью управления технологическими процессами в условиях существенной нестационарности и значительной неопределенности в знании базовых свойств этих процессов. В связи с этим для управления технологическими процессами в металлургии получили развитие методы адаптивной идентификации, в основе которых лежит настройка параметров моделей по измеряемым входным/выходным сигналам процесса. Оценка этих параметров осуществляется на основе различных алгоритмов параметрической идентификации. На основе методов адаптивной идентификации были созданы АСУ процессами выплавки стали, горячей и холодной прокатки стального листа, травления и нанесения защитного покрытия на стальную полосу, горячей прокатки труб, а также при определении математического описания технологических процессов, протекающих в нагреватель-

ных печах и многих других металлургических агрегатах [1, 2, 3 и др.]. Основная причина, затрудняющая практическое применение методов адаптивной идентификации, — сложность построения адекватных настраиваемых математических моделей металлургических процессов.

Цель настоящей работы — не только проиллюстрировать высокую практическую значимость методов адаптивной идентификации для управления металлургическими процессами, но и акцентировать внимание исследователей на необходимости разработки комплексного метода моделирования металлургических процессов, представляющего собой рациональное объединение содержания методов идентификации и моделирования реальных объектов на основе использования открытых законов естествознания и известных эмпирических закономерностей.

Примеры применения методов идентификации в черной металлургии

Адаптивная система управления прокаткой труб с идентификатором в цепи обратной связи

Адаптивная система управления станом 160 для горячей прокатки стальных труб предназначена для стабилизации геометрических размеров готовых труб [1, 3]. Для предсказания толщины стенки трубы использована линейная модель трубопрокатного стана. Идентификатор в этой системе выполняет функции подстройки коэффициентов каналов преобразования контролируемых внешних и управляющих воздействий, а алгоритм идентификации базируется на итерационной процедуре, которую можно отнести к модификации алгоритма Качмажа. Система управления подстраивает стан перед прокаткой каждой трубы. Одновременно после каждой прокатки корректируется модель стана. Система реализована на трубопрокатном агрегате 160 Первоуральского новотрубного завода.

Идентификация процесса травления окалины в прокатном производстве

Удаление окалины с поверхности холоднокатаной стали — одна из сложнейших операций технологического процесса, поскольку состав и структура окалины зависит от различных причин (зачастую непредсказуемых) при термообработке металла. Для удаления слоя окалины с поверхности металла в прокатных цехах применяют непрерывно-травильный агрегат (НТА), в состав которого входят щелочные и кислотные ванны, через которые протягивается металлическая лента. Авторами [1] получена статическая модель процесса травления слабоуглеродистых сталей на Череповецком металлургическом комбинате.

Для повышения эффективности управления травильным агрегатом были построены динамические модели, причем синтез математического описания осуществлялся с помощью адаптивного идентификатора состояния [1]. Исследование частотных свойств входных сигналов процесса кислотного травления слабоуглеродистых сталей показало, что по каналу

«скорость движения ленты — активность среды в кислотной ванне» можно ограничиться построением модели первого порядка.

Для процесса кислотного-щелочного травления нержавеющей ленты построена динамическая модель первого порядка по каналу «скорость движения ленты — плотность раствора в кислотной ванне». С целью экономии расхода травильных компонентов был также построен адаптивный идентификатор состояния второго порядка, который позволяет построить динамическую модель и восстановить ненаблюдаемую переменную — скорость изменения плотности раствора.

Адаптивная система управления процессом нанесения цинкового покрытия на стальную полосу

С целью нанесения антикоррозионного цинкового покрытия на поверхность листового проката применяют агрегаты непрерывного горячего цинкования, принцип работы которых на Череповецком металлургическом комбинате заключается в следующем [1]. Обезжиренная (с помощью НТА, аналогичного описанному выше при травлении окалины) и очищенная полоса поступает в проходную печь, где осуществляется рекристаллизационный отжиг, охлаждение полосы до заданной температуры и термохимическая подготовка листа в восстановительной защитной атмосфере. Из печи полоса поступает в ванну, где осуществляется покрытие поверхности стальной полосы расплавленным цинком.

Для обеспечения высоких динамических характеристик регулирования толщины цинкового покрытия построена адаптивная система управления с эталонной моделью, причем в качестве эталонной модели использовано динамическое звено первого порядка с запаздыванием.

Адаптивные системы управления в листопрокатном производстве

Прокатное (в первую очередь листопрокатное) производство является наиболее автоматизированным на современных металлургических комбинатах.

В работе [4] анализируется производственный комплекс (ПрК) в металлургической отрасли, рассматриваемый как сложная система, характеризующаяся высоким уровнем априорной неопределенности, недостаточной изученностью протекающих процессов, стохастичностью внутренних процессов и действующих возмущений, нестационарностью и нелинейностью основных характеристик и параметров. Для эффективного управления производственным комплексом (системами ПрК) в этих условиях предложено разрабатывать адекватные методы синтеза математического обеспечения, основанные на применении принципов адаптивной идентификации.

Рассматривая систему ПрК, предполагается, что о системе имеется экспериментальная информация, которая содержит данные как о свойствах систем ПрК, так и о действующих возмущениях. Относительно свойств систем ПрК предполагается, что они

принадлежат некоторой ограниченной неизвестной области и имеют неизвестный закон изменения. Скорость изменения вектора свойств систем ПрК является ограниченной. Такие же предположения делаются относительно действующих возмущений.

В [4] ставится задача идентификации стохастических процессов в системах ПрК в условиях неопределенности. Для решения поставленной задачи предложен метод синтеза, получивший название *P*-подхода. Разработан ряд модификаций *P*-алгоритма с учетом информации о конкретных свойствах объекта идентификации. На основе полученных результатов предложен алгоритм моделирования производственных процессов в системах ПрК.

В основе концепции *P*-подхода лежит ряд принципов и положений построения оптимальных итерационных *P*-алгоритмов за счет подготовки экспериментальных данных. Суть предлагаемого *P*-подхода состоит в том, что в условиях априорной неопределенности, существенной стохастичности протекающих процессов и неизвестных законов изменения свойств систем ПрК он позволяет выбирать структуру алгоритма адаптации, исходя из реальных условий функционирования объекта. При этом обеспечивается получение гарантированных оценок параметров с достижением глобального минимума критерия идентификации.

Предлагаемые итерационные *P*-алгоритмы занимают промежуточное место между проекционными методами и методом инструментальной переменной. Проекционные методы базируются на рекуррентной процедуре метода наименьших квадратов. Метод инструментальной переменной также основан на методе наименьших квадратов, однако в алгоритме идентификации используется не сам вектор переменных состояний или входа объекта, а его преобразованное значение, причем оператор преобработки выбирается так, чтобы исключить корреляцию между переменными объекта.

С учетом изложенного разработан алгоритм моделирования производственных процессов в цехе холодной прокатки полос в классе распределений Пирсона, общее описание которого приведено ниже [4].

Первоначально в качестве исходных данных накапливается информация в виде временного вариационного ряда, а также данные, необходимые для работы с генератором случайных величин. задается тип распределения случайного процесса (γ - или β -распределение). Затем на основе введенных данных производится оценка границ изменения процесса, то есть выделение «выбросов» случайного процесса. Если абсолютные значения получившихся вариационных рядов достаточно велики, производится их нормирование.

Далее осуществляется моделирование реализаций основного случайного процесса и «выбросов». После чего оценивается точность моделирования путем определения вероятности попадания значений про-

цесса в заданный интервал. Рассмотренный алгоритм моделирования производственных процессов имеет два вида обратной связи: внешнюю для корректировки границ «выбросов» с целью улучшения точности прогноза и внутреннюю для адаптации точек нелинейного преобразования.

Для придания металлу определенных свойств в процессе прокатки в работах [5, 6] рассмотрены различные аспекты проблемы управления охлаждением металла в автоматизированном комплексе для прокатки толстых и тонких листов и полос.

Так, например, в работе [5] разработаны модели и алгоритмы управления процессом принудительного охлаждения полосы водой в межклетевых промежутках чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки. Исходная настройка устройств принудительного охлаждения осуществляется с помощью прогнозирующей математической модели, обеспечивающей получение значений коэффициента теплоотдачи от полосы к воде, позволяющих достичь требуемого уровня температуры полосы на выходе из стана $T_{кп}$. При этом прогнозирующая математическая модель может быть построена на основе обработки данных, полученных в результате эксперимента, с помощью математической модели процесса или их комбинацией.

Для коррекции исходной настройки режима прокатки с принудительным охлаждением при отклонении температуры полосы на выходе из стана $T_{кп}$ от заданного значения предложен метод адаптивной настройки, заключающийся в подстройке прогнозирующей математической модели с целью сведения погрешности $T_{кп}$ к минимуму. Технологически необходимость адаптивной настройки прогнозирующей модели обусловлена возможностью отклонения $T_{кп}$ от заданного значения при управлении межклетевым охлаждением в основном из-за неполной информации о свойствах объекта (прокатного стана) при создании математической модели процесса изменения температуры, принятых допущений и сложности учета всех характеристик процесса при построении прогнозирующей модели, а также вследствие случайных изменений свойств самого объекта.

Для адаптивной настройки прогнозирующей модели в [5] предложен простой одношаговый адаптивный алгоритм, в соответствии с которым минимизируется отклонение $T_{кп}(j+1)$ -ой полосы на основе информации о качестве управления при прокатке j -ой полосы,

Для устранения существующих недостатков управления охлаждением металла при его горячей прокатке авторами [6] предложен новый принцип управления, в основе которого в качестве исполнительного органа охлаждения используются не форсунки, а охлаждающие ролики. Разработана функциональная схема управления роликовым охлаждением листа, при этом идентификация процесса осуществляется с помощью имитационной модели, которая непрерывно параме-

трически подстраивается под объект. В рамках предлагаемого процесса идентификации непрерывно фиксируются основные технологические показатели объекта управления (температура хладагента на входе/выходе из ролика, расход хладагента, величина фактического теплоотвода). Использование прогрессивных методов идентификации с включением идентификатора-наблюдателя с многовариантной имитационной моделью в контур управления обеспечивает непрерывную адаптацию системы на основании реальных измерений под текущие условия протекания технологического процесса и повышает точность управления охлаждением.

В работе [7] описана разработка адаптивного алгоритма управления установкой контролируемого охлаждения толстолистового проката. Система управления установкой должна обеспечивать получение заданной температуры окончания ускоренного охлаждения с определенной точностью по всей площади раската.

При формировании структуры системы был использован аппарат нейро-нечеткого моделирования. Результатом структурной и параметрической идентификации объекта управления является нейро-нечеткая модель, которая получена за счет использования метода субтрактивной кластеризации для исходного разбиения пространства переменных и алгоритма на основе конкуренции как средства синтеза нечетких правил.

Математическое обеспечение модели управления реализовано программно и протестировано на установке контролируемого охлаждения стана 5000 ЛПЦ-3 ПАО «Северсталь». По итогам испытаний отклонение прогнозируемого значения температуры металла на выходе установки по сравнению с фактическим оказалось приемлемым для обеспечения эффективной работы агрегата и формирования требуемых потребительских свойств металла, что свидетельствует о высокой точности управления.

Идентификация процесса нагрева металла перед прокаткой

Нагрев металла перед прокаткой осуществляется в основном с целью повышения его пластичности при дальнейшей его обработке в прокатном стане. Современные нагревательные печи являются многозонными, причём нагрев металла в каждой зоне осуществляется по определенному закону изменения температуры в соответствующей зоне. Следовательно, управляющим воздействием является температура топлива (газа) в пределах каждой из зон. Задачей оптимизации процесса нагрева является выбор температуры каждой из зон таким образом, чтобы обеспечить при известной начальной температуре нагреваемого металла заданную конечную (на выходе из печи) температуру нагрева металла при минимальном расходе топлива.

Современная методическая нагревательная печь является объектом с распределенными параметрами. На практике для управления процессом нагрева металла обычно применяют упрощенные модели на основе уравнений теплопроводности, которые отража-

ют изменение средних температур в зонах печи [1]. Параметрическая идентификация нагрева металла в печи осуществляется с помощью как адаптивных, так и неадаптивных алгоритмов [2, 8]. При этом под адаптивным алгоритмом идентификации понимают алгоритм, позволяющий уточнять значения оцениваемых неизвестных параметров математической модели по мере получения дополнительной информации о работе объекта, т. е. работающий рекурсивно. К неадаптивным алгоритмам относят процедуры, позволяющие оценивать параметры модели сразу, используя всю совокупность информации.

Описанные выше методы решения задач идентификации процесса нагрева металла перед прокаткой используются при разработке алгоритмического обеспечения АСУ ТП методических печей на современных металлургических комбинатах.

Идентификация процесса разливки стали в машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ)

В настоящее время непрерывная разливка стали в МНЛЗ является наиболее прогрессивным методом получения заготовок (слябов) для дальнейшей обработки в листопрокатных станах. Для получения непрерывнолитых слябов жидкий металл заливается в верхнюю часть водоохлаждаемого кристаллизатора МНЛЗ, в котором начинается затвердевание жидкого металла с образованием твердой оболочки слитка, сохраняющей жидкую фазу по центральной оси. За кристаллизатором располагается зона вторичного охлаждения (ЗВО), в результате форсированного поверхностного охлаждения заготовка затвердевает по всему сечению.

Авторы [6] предлагают использовать преимущества роликового охлаждения (по сравнению с форсированным) плоского металла при управлении процессом охлаждения стальных слитков в ЗВО МНЛЗ. Ими предложен дополнительный контур идентификации траекторий охлаждения по результатам металлургического анализа качества металла с использованием новых принципов построения интеллектуальных алгоритмов адаптивной динамической идентификации объекта управления и оценки параметров математических моделей. Предложенный контур управления предназначен для коррекции исходной настройки системы управления процессом охлаждения металла в ЗВО МНЛЗ. В результате использований предложений авторов [6] обеспечивается снижение объема некондиционных заготовок, расход хладагента и электроэнергии, улучшение санитарно-гигиенических условий обслуживания МНЛЗ и повышение ее производительности за счет управляемости и контролируемости процесса охлаждения слитка.

В работе [9] отмечается, что любое управление, как правило, предполагает наличие обратной связи, т. е. информации о текущем состоянии объекта регулирования. Возможно, конечно, управление и без обратной связи на хорошо изученных объектах. Однако в этом случае не учитываются возмущающие, шумовые фак-

торы, которые уводят состояние объекта в неопределенную область. Только управление с непрерывной идентификацией на основе прямого измерения состояния объекта в определенной степени, подчеркивается в [9], свободно от этих недостатков.

Объектом управления в новой динамической системе управления охлаждением «Динамика-ДСВО» является тепловое состояние разливаемого сляба, раскассированного на конечное количество зон управления по длине МНЛЗ [9]. В качестве базисной управляющей подсистемы рассматривается математическое обеспечение, осуществляющее он-лайн моделирование процесса охлаждения с учетом нестационарности технологического процесса и совокупности текущих физических параметров работы МНЛЗ (скорость литья, химический состав разливаемой стали, температура металла в промежуточном ковше и т. д.). На основе имеющейся информации периодически вырабатываются управляющие воздействия, выраженные в расходах хладагентов по зонам вторичного охлаждения МНЛЗ. Выбор необходимой стратегии управления позволяет поддерживать температурный профиль, соответствующей среднестатистической скорости литья за выбранный интервал времени. Разработанная ПАО «Уралмашзавод» новая система управления успешно пущена в эксплуатацию на МНЛЗ Магнитогорского металлургического комбината.

Идентификация процесса выплавки чугуна в доменной печи

Управление процессом выплавки чугуна в доменной печи предполагает стабилизацию заданного химического состава продуктов плавки и температуры жидкого чугуна. В то же время доменный процесс существенно зависит от множества контролируемых и неконтролируемых возмущений, зачастую изменяющихся во времени. В связи с этим разработка математических моделей, адекватно описывающих протекающие в домне процессы, невозможна без идентификации объекта управления.

В работе [2] изложен способ идентификации процессов в доменной печи по каналу «рудная загрузка — содержание кремния в чугуне». По данному каналу доменная печь как объект управления описана в виде линейного алгебраического уравнения с учетом транспортного запаздывания. Для идентификации возмущений использовали модель авторегрессии — скользящего среднего. Описанный подход построения модели был использован при создании АСУ процессом выплавки чугуна для Мариупольского металлургического комбината им. Ильича.

Управление выплавкой стали в металлургических печах

Работа [10] посвящена решению задачи идентификации и построения системы управления технологическим процессом в условиях малой априорной информации, а именно в условиях непараметрической неопределенности. Предлагаемый в [10] путь управления объектом в условиях непараметрической неопре-

деленности относится к классу непараметрического дуального управления. Отличие развиваемой в настоящее время теории непараметрических адаптивных систем от существующей параметрической теории адаптивных систем состоит в отсутствие этапа выбора параметрической структуры модели на основании имеющейся априорной информации. В этом случае требования к априорной информации ослабевают. Здесь требуется информация на качественном уровне (например, объект обладает взаимно однозначной или неоднозначной характеристикой процесса для безынерционных систем, является линейным или указан тип нелинейности для динамических систем и др.).

В [10] предложена новая схема управления технологическим процессом, включающая в себя, помимо традиционного в теории управления параметрического регулятора, управляющее устройство, в котором реализован непараметрический алгоритм дуального управления. Данная схема позволяет управлять технологическим процессом, используя не только текущую информацию, но и информацию, накопленную ранее. В этой связи говорят, что устройство управления обладает памятью. Вычислительные эксперименты показали высокую эффективность предложенного алгоритма управления.

В работе [11] рассмотрен подход к построению системы автоматического управления электрическим режимом электродуговых печей переменного тока, в частности, дуговых сталеплавильных печей, с использованием модели электрического контура печи. Так как система работает в условиях нестационарных возмущений объекта управления, применяется непрерывная параметрическая идентификация. В результате применения идентификации формируются функции цели управления, позволяющие корректировать текущий электрический режим с целью достижения экстремумов целевых функций.

Предлагаемый в [11] подход к созданию системы автоматического управления электрическим режимом электродуговыми печами позволяет достичь наиболее энергетически выгодных режимов работы электродуговых агрегатов, формируя в реальном масштабе времени (в темпе процесса) уставки подчиненным системам регулирования положения электродов (регуляторам мощности). Постоянная адаптация коэффициентов используемых моделей позволяет своевременно оценить изменения состояния объекта управления, целевых функций, обеспечивая тем самым компенсацию нестационарностей объекта управления. Техническая реализация системы в виде алгоритмической и программной надстройки над уже существующими системами управления электрическим режимом позволяет снизить капитальные затраты внедрения таких систем, одновременно обеспечивая повышение экономических показателей работы электродуговых агрегатов переменного тока.

В [12] предложены способы активно-пассивной идентификации промышленных объектов в системах

Если вы попали в чёрную дыру, не сдавайтесь. Выход есть...

Стивен Уильям Хокинг

управления, не требующие разрыва обратных связей в действующих контурах регулирования и нанесения пробных воздействий, цель которых не соответствует достижению характерных для нормального функционирования систем выходных воздействий.

Как показано в [12], предложенные способы позволяют снизить влияние пробных воздействий на нормальный ход технологического процесса, а также позволяют провести идентификацию и управление со сдерживанием движения системы к области неустойчивости. В условиях зашумленности объектов снижение амплитуды пробных исследовательских воздействий не обеспечивает высокой точности идентификации при ограниченном числе опытов. Для существенно нестационарных и нелинейных объектов перспективным является применение многомерного моделирования с учетом разбиения организационно-технологических состояний системы на определенные классы. Ряд действующих систем управления (СУ), имеющих склонность к выходу из устойчивого состояния при управлении, предопределяют использование сложных управляющих компонентов — фрагментов программ управлений. Это обстоятельство требует при идентификации такого рода объектов применения адекватных управляющих компонентов.

Совершенствование СУ сложными объектами промышленного назначения подразумевает не только построение и разумное использование математических моделей объектов, но и подготовку оперативного персонала для эффективной работы в таких системах.

Решение отмеченных выше проблем позволяет сформировать аппарат активно-пассивной идентификации, способной описывать нестационарные, нелинейные процессы в промышленных СУ, обладающих пониженной устойчивостью.

Разработанные в [12] способы активно-пассивной идентификации успешно использовались для описания динамических характеристик каналов регулирования кислородно-конвертерного, доменного, электросталеплавильного процессов на отечественных металлургических предприятиях Западной Сибири. Как показывают полученные результаты, точность описания каналов регулирования предложенными способами на 8–12% выше, чем при использовании традиционных методов активной идентификации. При этом реализация плана эксперимента не сопровождается нарушениями нормального хода технологического процесса и характеризуется снижением моральных и материальных издержек при создании СУ.

Заключение

Исходя из условий практического применения методов идентификации для построения математиче-

ских моделей процессов черной металлургии, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, для ускорения проектирования указанных систем необходимо разработать широкий набор методов построения адекватных настраиваемых (по эмпирическим данным) математических моделей процессов черной металлургии, учитывающих особенности автоматизируемых объектов. Согласно терминологии идентификации систем, эти методы по своему назначению, функциям и задачам следует отнести к классу методов структурной идентификации. Поэтому представляется, что одним из важных направлений идентификации систем является создание методологии структурной идентификации металлургических процессов для цели проектирования адаптивных систем управления с идентификатором [13].

Второй вывод касается алгоритмов параметрической идентификации, которые можно использовать для получения по эмпирическим данным текущего значения параметров настраиваемых математических моделей процессов черной металлургии. Эти алгоритмы необходимо не только классифицировать по типам металлургических процессов и детально исследовать их информационные возможности, но и желательно разработать методологию оперативного выбора алгоритма параметрической идентификации для проектируемой адаптивной системы управления с идентификатором.

В-третьих, представляется необходимым разработать комплексный метод моделирования металлургических процессов, учитывающий их характерные особенности и представляющий рациональное объединение содержания методов идентификации и методов моделирования реальных объектов на основе использования открытых законов естествознания и известных эмпирических закономерностей.

Список литературы

1. Салыга В.И., Карабутов Н.Н. Идентификация и управление процессами в черной металлургии. М.: Металлургия, 1986. 191 с.
2. Спиринов Н.А., Лавров В.В., Паршаков С.И., Денисенко С.Г. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии: учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ. 2006. 307 с.
3. Емельянов С.В., Коровин С.К., Рыков А.С. и др. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления. Кемерово: Кузбассвуиздат, 2007. 307 с.
4. Пятецкий В.Е., Генкин А.Л. Адаптивная идентификация производственных процессов в металлургическом производстве // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2012. С. 599–602.
5. Генкин А.Л. Моделирование и оптимизация процесса горячей прокатки полос. М.: ЛЕНАНД. 2012. 168 с.
6. Салихов З.Г., Газимов Р.Т., Генкин А.Л., Никулина И.В. Многовариантная имитационная модель как основа совершенствования интеллектуальной системы управления объектами с нестационарными и вероятностными характеристиками // Тр. 6-ой всероссийской

- научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2013). Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ. 2013. Т.1. С. 245-249.
7. *Богачев Д.В., Ершов Е.В., Виноградова Л.Н.* Разработка адаптивного алгоритма управления установкой контролируемого охлаждения листового проката // Научно-технический прогресс в черной металлургии: Материалы II международной научно-технической конференции. Череповец: ЧГУ. 2015. С. 234-235.
 8. *Панферов В.И.* Идентификация математической модели нагрева слябов в методических печах // Известия вузов. Черная металлургия. 1994. № 8. С. 53-55.
 9. *Буланов Л.В., Черемисин Д.Д., Кульжов А.А., Казаков А.С., Мошкунов В.В.* Новая динамическая модель управления вторичным охлаждением в системе «ДИНАМИКА-ДСВО» разработки ПАО «Уралмашзавод» на МНЛЗ №2 и МНЛЗ №3 ОАО «ММК» // Научно-технический прогресс в черной металлургии: Материалы II Между-
 - народной научно-технической конференции. Череповец: ЧГУ. 2015. С. 235-236.
 10. *Корнеева А.А., Корнет М.Е.* Непараметрическое управление процессом конвертерной плавки стали / Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). М.: ИПУ РАН, 2014. С. 4303-4314.
 11. *Салихов З.Г., Усачев М.В., Никулина И.В.* Идентификация и управление электрическим режимом трехфазных электродуговых печей // Тр. XII всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). М.: ИПУ РАН. 2014. С. 4366-4374.
 12. *Галицкая Л.В.* Активно-пассивная идентификация промышленных объектов в системах управления // Доклады ТУСУР. 2012. № 1 (25). Ч. 2. С. 230-235.
 13. *Гинсберг К.С., Генкин А.Л.* К основам научной методологии структурной идентификации для цели создания реальных систем автоматического управления с требуемыми свойствами // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. № 3 (84). С. 24-30.

*Генкин Аркадий Львович — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник,
Никулина Ирина Владимировна — научный сотрудник
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.
Контактный телефон (495) 334-87-59.*

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

З.Г. Салихов, А.Л. Генкин (ИПУ РАН)

Проанализированы типичные примеры применения различных методов идентификации в отечественной цветной металлургии, а именно: при идентификации иерархических структур химико-металлургических производств и технологических процессов производства губчатого титана, моделировании процесса обжига молибденового концентрата в реакционном пространстве печи, катодов алюминиевых электролизеров, электролиза алюминия, плазменно-электролитического оксидирования и др.

Ключевые слова: цветная металлургия, методы идентификации, электролизер.

Введение

К цветной металлургии относят добычу, обогащение руд цветных металлов, производство цветных металлов и их сплавов. К цветным металлам относятся все металлы, кроме железа. Цветная металлургия характеризуется очень низким содержанием металла в исходной руде, что делает необходимым обогащение руды с производством концентрата. Основные особенности цветной металлургии:

- исключительно высокая материалоемкость;
- комплексный характер сырья;
- многоступенчатые технологические схемы переработки сырья;
- большое разнообразие технологических процессов, схем и аппаратов (оборудования);
- сочетание пиро- и гидрометаллургических процессов.

Низкое содержание металла в исходной руде предопределяет высокую материалоемкость производства и, соответственно, необходимость транспор-

тировки большого количества исходного сырья. Для снижения транспортных затрат заводы цветной металлургии часто располагают как можно ближе к горнообогатительным комбинатам.

Руды цветных металлов, как правило, носят комплексный характер, то есть наряду с основным элементом в руде содержится большое количество других сопутствующих элементов. Это предопределяет сложные многоступенчатые технологические схемы переработки сырья.

В связи со своеобразием руд разных месторождений технологическая схема производства одного и того же металла на разных заводах существенно отличается. В целом в цветной металлургии применяются следующие основные технологические стадии: обогащение сырья; извлечение металла; рафинирование.

Отличие особенностей процессов цветной металлургии как объектов управления от процессов черной металлургии, изложенных в [1], заключается с том, что в цветной металлургии, помимо пирометаллур-