

- 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-

гических, широко применяются гидрометаллургические (реализуются в водных средах) и электрометаллургические (электролиз) процессы.

Рассмотрим различные методы идентификации, применяемые в настоящее время для улучшения качества математических моделей, описывающих процессы в отечественной цветной металлургии.

Примеры применения методов идентификации в цветной металлургии

Как и в черной металлургии, интенсивное развитие методов идентификации процессов цветной металлургии началось в 70-х годах XX века.

Идентификация иерархических структур химико-металлургических производств

При построении автоматизированных систем управления на первый план выдвигается особенность структуры технико-экономических показателей ряда непрерывных производств с ограниченной номенклатурой выпускаемой продукции, учет основных технологических взаимосвязей, складывающихся в отдельных агрегатах, их комплексе, цехах и более крупных подразделениях заводов и предприятий [2]. Задача идентификации становится обозримой, если химико-металлургическому производству поставить в соответствие иерархическую модель, представленную на «верхнем» уровне в виде нестационарной сети с детерминированной структурой и состоящую на «нижнем уровне» из динамических моделей отдельных технологических единиц. Тогда для нестационарной сети «верхнего» уровня может быть применена адаптивная матричная модель, где каждая технологическая единица эквивалентна определенным столбцам и строкам матрицы.

В реальных режимах работы химико-металлургического производства иерархическая модель должна обладать возможностью адаптации параметров. Необходимость идентификации обусловлена неточностью исходного задания коэффициентов динамических моделей, подверженных непредвиденным изменениям, а также необходимостью автоматизации определения матриц расходных коэффициентов большой размерности. С учетом изложенного в [2] предложен подход к идентификации сложного химико-металлургического производства, состоящий в построении адаптивной матричной модели «верхнего» уровня на основе адаптивных динамических моделей «нижнего» уровня, полученных на основании априорной информации о структуре объекта. В работе анализируется производство никелевых анодов. По расходным коэффициентам, найденным из моделей процессов и полученным по регрессионным зависимостям, а также на основании информации, получаемой от ряда служб цеха, была построена численная адаптивная матричная экономико-математическая модель участка.

Полученная матричная экономико-математическая модель участка использована для решения задач опе-

ративного управления производственным комплексом. Проведенный при помощи матричной экономико-математической модели прогноз оценок ряда экономических показателей работы химико-металлургического участка обеспечил точность прогноза 3...3,5%.

Моделирование процесса обжига молибденового концентрата в реакционном пространстве печи

В процессе обжига концентрат непрерывным потоком подается в ванну печи [3]. Под напором воздушного потока в ванне создается псевдосжиженный (кипящий) слой, обеспечивающий высокую степень контакта между частицами концентрата и кислородом. Экзотермическая реакция протекает интенсивно, причем горение поддерживается за счет выделяющегося тепла. Твердые и газообразные продукты обжига непрерывно выводятся из печи для последующей переработки.

Управление процессом обжига может осуществляться за счет изменения расхода воздуха, состава и количества подаваемой шихты или за счет изменений условий теплоотвода. Непрерывный процесс обжига молибденового концентрата в кипящем слое проводят автоматически. Измельченный концентрат с определенным содержанием молибдена подают в печь с помощью питателя.

Одновременно снизу поступает воздух, обеспечивающий кипение концентрата и участвующий в химической реакции обжига. Огарок выводится через порог печи. Тепло реакции используется для нагревания входных потоков шихты и воздуха до температуры процесса. Часть тепла теряется через кладку печи.

Математическая модель процесса обжига включает уравнения материального и теплового баланса в печи. Модель процесса получена на основе системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, в которую введены дополнительные упрощающие предположения.

Для регулирования температуры в модель включается уравнение пропорционального регулятора при выборе в качестве управляющего воздействия одной из входных переменных модели. При включении регулятора процесс стабилизируется, так как увеличение температуры (под действием возмущений) будет вызывать пропорциональное уменьшение потока шихты.

Параметрическая идентификация процесса производится на основе подстройки по экспериментальным данным значений параметров математической модели: коэффициентов передачи тепловой части, предэкспоненциального множителя и безразмерного параметра теплоотвода. Таким образом, осуществляется адаптация модели к конструктивным особенностям реального аппарата, составу шихты, типу холодильника.

Моделирование процесса обжига катодов алюминиевых электролизеров

Электролизер — это специальное устройство, которое предназначено для разделения компонентов соединения или раствора с помощью электрического

тока. Процесс обжига подины электролизера — это заключительный этап при проведении капитального ремонта алюминиевых электролизеров, и качество его проведения является одним из основных факторов, влияющих на срок службы электролизеров.

В [3] моделирование процесса реализовано в виде обучающей системы на тренажерном комплексе, позволяющем вести отработку практических навыков в тесной увязке с теоретическими представлениями об объекте, что дает возможность обучаемому формировать системный образ управляемого объекта и принимать более обоснованные управляющие решения.

Математическая модель процесса включает систему уравнений теплового баланса, обеспечивающих определение среднеобъемной температуры подины в зависимости от подачи топлива или расход топлива, необходимый для достижения определенной среднеобъемной температуры подины. Описывается также перенос тепла внутри тела в электролизере и устанавливает связи между временными и пространственными изменениями температуры тела. Граничное условие выбрано на основании того, что существующие системы автоматизации процесса обжига обеспечивают изменение температуры на поверхности подины в соответствии с заданным (запрограммированным) температурным режимом.

Приведенная математическая модель является идеализированной и рассматривает нагрев одного многослойного бруса (подового блока). Задача идентификации процесса обжига сводится к нахождению численных значений неизвестных теплофизических коэффициентов математической модели, которые обеспечивают минимум заданного эмпирического интегрального квадратичного критерия. Задача минимизации критерия решается методом Гаусса-Зейделя.

Моделирование процесса прокатки кокса

При изготовлении электродов, применяемых в электролизерах для электролиза алюминия, используется прокатанный кокс. Процесс прокатки обеспечивает удаление влаги и летучих компонентов для улучшения качественных показателей углеродистого сырья (кокса), повышая его плотность и увеличивая механическую прочность. Для прокатки кокса в промышленности наибольшее распространение получила трубчатая вращающаяся печь.

Для оптимизации процесса прокатки кокса во вращающейся печи сложный технологический процесс прокатки представлен в виде совокупности более «простых» процессов: пиролиз, удаление летучих соединений, размягчение (начало усадки), усадка с уменьшением пор, рост зерна, рекристаллизация, упорядочение, восходящая диффузия и др. [4]. На основе исследования основных физико-химических процессов, протекающих при прокатке, разработана математическая модель прокатки кокса в периодическом режиме с целью использования ее для расчета качества продукта прокатки при проведении процесса в трубчатой вращающейся печи.

Определение численных значений коэффициентов математической модели осуществлено посредством параметрической идентификации на основе использования экспериментальных кинетических зависимостей изменения пикнометрической плотности от температуры. Поставленная задача решалась как задача математического программирования минимизацией суммы квадратов отклонений расчетных значений пикнометрической плотности от экспериментальных.

С помощью математической модели исследованы оптимальные технологические режимы прокатки кокса во вращающейся печи, обеспечивающие реализацию критерия управления: минимизацию суммарных потерь кокса в рабочем пространстве печи при заданном качестве готового продукта и заданной производительности печи.

Управление электролитно-плазменными и электрохимическими технологическими процессами

В работе [5] приведены результаты разработки методологии управления электролитно-плазменными и электрохимическими технологическими процессами, используемыми при изготовлении и ремонте деталей энергетических машин. Данная методология создана на основе использования метода импедансной спектроскопии для контроля свойств обрабатываемой поверхности. Этот метод основан на активной идентификации процессов при помощи модуляции напряжения на электролизере и последующем измерении импеданса, в основном определяемого комплексным сопротивлением модифицируемого поверхностного слоя.

Разработанная авторами [5] методология автоматизированного управления электролитно-плазменными и электрохимическими технологическими процессами обеспечивает уникальную модификацию поверхности труднообрабатываемых сплавов, позволяет получать наноструктурированные поверхностные слои и покрытия, отличающиеся высокой коррозионной и износостойкостью. В результате обеспечивается снижение брака путем исключения перетравливания поверхности или нанесения покрытия излишней толщины, уменьшение энергопотребления в 1,2...1,5 раза за счет исключения времени обработки в конце процесса. Результаты работы внедрены в производство деталей вертолетной техники.

Моделирование процесса электролиза алюминия

В работе [6] описан метод параметрической идентификации технологического объекта на примере алюминиевого электролизера. Проведен статистический анализ данных работы электролизера и найден оптимальный объем данных для построения регрессионной модели выливаемого металла. Разработана регрессионная модель выливаемого металла, проверено ее соответствие экспериментальным данным с помощью корреляционного и дисперсионного анализа.

Данная модель может быть использована для организации моделирования различных технологических ситуаций на электролизере, для расчетов объемов

выходного продукта, для нахождения оптимального управления электролизером с целью повышения эффективности его работы. Программное обеспечение, созданное на базе разработанной модели, можно применить для обучения персонала, имитации режимов, оценки алгоритмов управления процессом электролиза и т. п.

Разработка математической модели такого сложного процесса, как электролиз алюминия, позволяет лучше понять взаимосвязь его существенных технологических переменных. Можно испытывать различные составы электролита, способы дозирования глинозема, влияние возмущения на технологические переменные процесса.

Моделирование процесса плазменно-электролитического оксидирования

В работе [7] рассмотрена реализация нового подхода к идентификации процесса плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) как объекта управления на основе анализа переходных характеристик. Показано наличие трех характеристических переходных процессов (из них два — для тока, один — для напряжения на электролизере), которые были аппроксимированы экспоненциальными функциями.

По результатам аппроксимации на основе структурной идентификации построена математическая модель объекта управления в виде линейной модели с переменными параметрами, медленно изменяющимися во времени. В состав модели входят передаточные функции апериодических звеньев первого порядка, обеспечивающих протекание наблюдаемых экспериментально переходных процессов. Постоянные интегрирования и корни характеристических уравнений модели медленно изменяются во времени в ходе обработки в соответствии с ростом покрытия. Показано, что переходный процесс спада напряжения во время паузы после анодного импульса связан с толщиной покрытия, так как отражает рекомбинацию зарядов в покрытии и может быть использован для косвенной оценки состояния поверхности в ходе обработки.

С помощью разработанной модели объекта управления построены графики переходных процессов тока и напряжения в пакете Simulink, соответствующие экспериментальным, что подтверждает адекватность модели. Предложен вариант определения толщины покрытия в ходе ПЭО по результатам анализа медленного изменения свойств объекта.

Идентификация технологических процессов производства губчатого титана

В работе [8] рассмотрены особенности построения моделей процессов восстановления и вакуумной сепарации губчатого титана. Предложено описывать динамику процессов дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. Изложены способы идентификации в позиционных системах управления. Проблема построения моделей сложных многосвязных нестационарных технологических объектов (процессов восстановления и вакуумной сепарации губчатого титана) заменена решением в позиционных системах задач идентификации автономных нестационарных объектов управления. С помощью предложенных моделей синтезирован класс систем управления, обеспечивающих оптимизацию и интенсификацию процессов восстановления и вакуумной сепарации. Предложенный подход может быть применен также для идентификации нестационарных технологических объектов в различных отраслях промышленности.

рации губчатого титана) заменена решением в позиционных системах задач идентификации автономных нестационарных объектов управления. С помощью предложенных моделей синтезирован класс систем управления, обеспечивающих оптимизацию и интенсификацию процессов восстановления и вакуумной сепарации. Предложенный подход может быть применен также для идентификации нестационарных технологических объектов в различных отраслях промышленности.

Заключение

Относительно автоматизации процессов в цветной металлургии можно сделать аналогичные методологические выводы, что и в работе [1]. Необходимо:

- разработать широкий набор методов построения адекватных настраиваемых (по эмпирическим данным) математических моделей металлургических процессов, учитывающих особенности автоматизируемых объектов управления в цветной металлургии [9, 10];
- классифицировать алгоритмы параметрической идентификации по типам металлургических процессов цветной металлургии и детально исследовать их информационные возможности;
- разработать методологию и программное обеспечение оперативного выбора алгоритма параметрической идентификации для проектируемой адаптивной системы управления с идентификатором (в частности, представляется полезным использовать для этой цели программную систему оценивания рекуррентных алгоритмов идентификации [11]);
- 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 [9].

Представляется несомненным, что одни и те же фундаментальные принципы автоматизации и идентификации имеют место для процессов в черной и цветной металлургии. Однако автоматизация и идентификация в цветной металлургии имеют свои особенности. В частности, это обусловлено следующими причинами. Во-первых, кислая или щелочная среда протекания многих процессов производства цветных металлов существенно снижает сроки службы и точность автоматических информационных средств контроля и автоматического управления.

Во-вторых, в связи с быстрым развитием современной тенденции автоматического видеоконтроля состава и физико-химических характеристик сырья, поступающего на переработку, и ужесточения требований к экологичности производства резко актуализировалась проблема возвращения мелкодисперсных целевых компонентов гидрометаллургических процессов в производство. Поэтому в настоящее время

и в ближайшем будущем будет особенно актуальным математическое моделирование слабо изученных процессов адсорбирования и коагуляции мелкодисперсных частиц в вязких растворах гидрометаллургии цветных металлов. Существенными компонентами этого моделирования являются структурная и параметрическая идентификация.

Список литературы

1. *Генкин А.Л., Никулина И.В.* Практическое применение методов идентификации для построения математических моделей процессов черной металлургии // Автоматизация в промышленности. 2019. № 4. С. 3-9.
2. *Буровой Н.А., Кропн З.И., Предкин Н.И.* Идентификация иерархических структур химико-металлургических производств // Автоматизация технологических процессов цветной металлургии (МИСиС), LXXII. М.: Металлургия. 1972. С. 5-18.
3. *Горенский Б.М., Лапина Л.А., Любанова А.Ш. и др.* Моделирование процессов и объектов в металлургии. Конспект лекций. Красноярск: ИПК СФУ. 2008. 145 с.
4. *Салихов З.Г., Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л.* Системы оптимального управления сложными технологическими объектами. М.: Теплоэнергетик. 2004. 496 с.
5. *Парфенов Е.В., Ерохин А.Л., Невьянцева Р.Р., Мукаева В.Р., Горбатков М.В.* Управление электролитно-плазменными и электрохимическими технологическими процессами на основе контроля состояния объекта методом импедансной спектроскопии // Тр. XII всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). М.: ИПУ РАН. 2014. С. 4348-4359.
6. *Шахова Н.Д., Бажин В.Ю.* Идентификация объекта с определением необходимого объема данных на примере алюминиевого электролизера // Тр. 10-ой международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'2015). М.: ИПУ РАН. 2015. С. 419-426.
7. *Парфенов Е.В., Фаткуллин А.Р., Ерохин А.Л., Горбатков М.В.* Идентификация модели процесса плазменно-электролитического оксидирования как объекта управления // Тр. 10-ой международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'2015). М.: ИПУ РАН, 2015. С. 427-437.
8. *Кирич Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф., Краев С.Л.* Идентификация технологических процессов производства губчатого титана // Проблемы управления. 2008. № 4. С. 71-77.
9. *Салихов З.Г., Гинсберг К.С.* Исследование эволюции в области идентификации математических моделей металлургических процессов при создании реальных систем автоматического управления // Цветные металлы. 2016. №11. С. 105-112.
10. *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.
11. *Антонова Г.М., Макаров В.В.* Выбор алгоритмов рекуррентной параметрической идентификации для описания результатов имитационных экспериментов // Материалы 11-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018). Москва: ИПУ РАН. 2018. Т. 1. С. 253-256.

*Салихов Зуфар Гарифуллович – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник,
Генкин Аркадий Львович – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.
Контактный телефон (495) 334-87-59.*

CEBIT[®]
RUSSIA

16+

25–27 июня 2019
Москва, Технопарк
«Сколково»

Регистрация на сайте:
www.cebiterussia.ru