УДК 621.746.58

В.Ю.БАЖИН, *канд. техн. наук, доцент, (812)328-82-56*
П.А.ПЕТРОВ, *канд. техн. наук, ассистент, (812)328-82-56*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

V.Y.BAZHIN, *PhD in eng. sc., associate professor, (812)328-82-56*
P.A.PETROV, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812)328-82-56*
Saint Petersburg State Mining University

ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МОЩНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ

Рассматривается проблема автоматизированного контроля технологического процесса электролитического процесса алюминия на электролизерах высокой мощности. Разработан алгоритм и система оптимального регулирования технологическими параметрами с помощью автоматизированных систем глинозема. Предложенная компьютерная нейросетевая модель обеспечивает эффективность управления.

***Ключевые слова*:** алюминиевый электролизер, глинозем, система питания.

DIAGNOSTICS OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF POWERFUL ALUMINIUM POTS BY MEANS OF SPECIAL PROGRAMS

The problem of the automated control of technological process of reduction aluminium process for superpower pots is discussed. The algorithm and system of optimum regulation of technological parameters by means of the alumina automated systems are developed. Offered computer neuron site model provides management efficiency.

***Key words*:** reduction pot, alumina, feeding system.

В настоящее время одной из серьезных проблем для российских предприятий по производству первичного алюминия является создание системы контроля и управления технологическими параметрами в течение всего процесса производства, позволяющей обеспечить максимальный выход по току. Автоматизация дает достоверную информацию о ходе протекания процесса, позволяет в целях оперативного управления пользоваться математическими вычислениями и снижает влияние человеческого фактора.

Уровень автоматизации и механизации на российских предприятиях по производству алюминия на протяжении многих лет был значительно ниже, чем в других странах. Этот разрыв компенсировался путем внедрения систем автоматизации фирмы «SIEMENS», когда при органичном сочетании накопленного отечественного и зарубежного практического опыта были установлены системы СААТ-1, СААТ-2 и Тролль. Тенденция роста уровня автоматизации предприятий может частично решить проблему обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции. Однако несовершенство таких систем не обеспечивает полный контроль за процессом и прогнозирование последующей ситуации.

Всем перечисленным целям технологического процесса электролиза алюминия служит разработанный автоматизированный технологический нейросетевой комплекс.

Главными достоинствами комплекса являются:

• управление процессом подачи энергии в каждый электролизер;

• контроль концентрации глинозема в электролите для каждого электролизера;

• контроль уровня металла и электролита;

• управление технологическим процессом электролиза алюминия в масштабах корпуса, цеха, завода.

Решение этих задач невозможно без объединения в одном комплексе трех составляющих: технологического оборудования, комплекса управляющих технических средств, современных мощных алгоритмов обработки информации.

В состав автоматизированного технологического комплекса входят:

• комплекс управляющих технических средств – блоки управления электролизерами, сетевое и компьютерное оборудование;

• программное обеспечение управления электролизерами и анализа накопленной информации и подготовки отчетов, системное программное обеспечение;

• запатентованное решение измерения уровня металла и электролита;

• технологическое оборудование подачи глинозема в электролизер оригинальной конструкции.

Сверхмощный алюминиевый электролизер, являясь многофункциональной технической системой с входными и выходными данными, во время эксплуатации нуждается в технологической диагностике. Практика показывает, чтобы достичь максимальной эффективности электролизного производства, недостаточно осуществлять временные корректировки электролита, контролировать содержание глинозема, регулировать напряжение по заданной уставке*.

На опытных участках с мощными электролизерами реализуются программы с узкой задачей (например, изменение режима питания фтористого алюминия или управление напряжением в программе) на основе математической теории нечетких множеств и логик (Fuzzy Sets and Fuzzy Logics). Программа 9box позволяет получить лишь рекомендации по целевым значениям напряжения электролизера и периода подачи фтористых солей путем ежедневных замеров температуры процесса электролиза. При этом отмечается неадекватная реакция программ при использовании глинозема различного качества.

В настоящее время возникла необходимость постоянного управления процессом по всем составляющим с учетом текущих технологических изменений с помощью синергетических моделей на базе нейросетевого компьютинга. Системы АСУТП и управления процессом на каждом предприятии индивидуальны. Научная и практическая деятельность формируют общие признаки этих систем, а также методы, инструменты и принципиальные подходы, которые можно применять в каждой из них.

Специфика технологии электролиза криолит-глиноземных расплавов обуславливает особенность управления процессом получения алюминия, которая состоит в недостаточном уровне информации о параметрах процесса (температура электролита, концентрация глинозема, криолитовое отношение и т.д.), не собираемой системами автоматического управления. Технологические отклонения, в основном, проявляются вследствие выхода за соответствующие рамки заданных технологических параметров (частота анодных эффектов, перегрев электролита, повышенное напряжение, количество «шумов»). Процесс автоматизированного контроля производства алюминия не обеспечивает своевременную корректировку технологических параметров. Для стабильности процесса электролиза необходимо анализировать причины появления отклонений на каждой стадии и давать конкретные рекомендации по их устранению в виде обратных связей.

Алгоритм построения и функционирования диагностической системы использует нейросетевую модель исследуемого процес-

---

* *Сизяков В.М.* Состояние и перспективы развития производства алюминия / В.М.Сизяков, В.Ю.Бажин, А.А.Власов // Металлург. 2010. № 7. С.2-6.

Sizyakov V.M., Bazhin V Yu., Vlasov A.A. Status and prospects for the production of aluminium // Metallurgist. 2010. N 7. P.2-6.

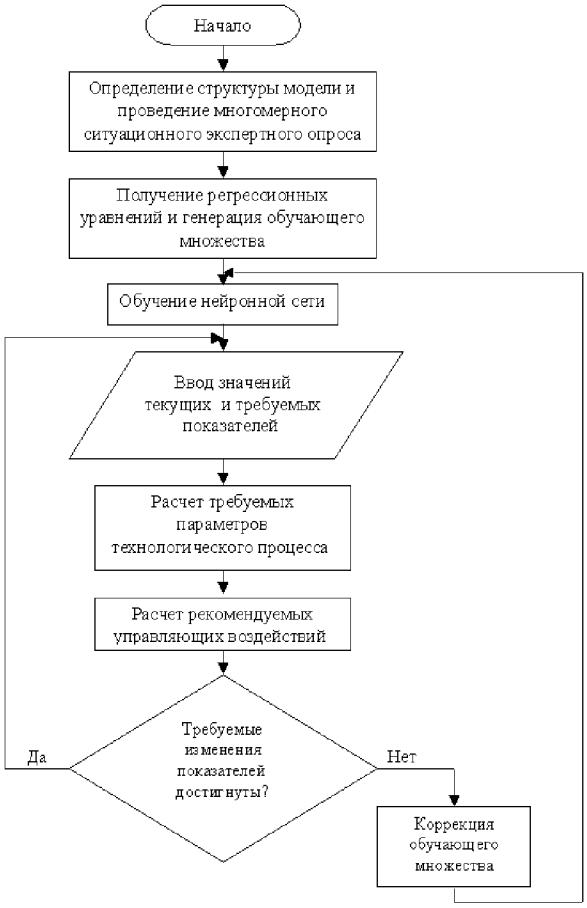

Рис.1. Блок-схема алгоритма построения и функционирования системы диагностики

са электролиза на мощных алюминиевых электролизерах для определения технологического состояния по значениям показателей измерений, т.е. представляет собой стандартный алгоритм систем нейрокомпьютинга с помощью программы NN Contol+*. Кроме этого, для математического моделирования протекающих в электролизной ванне процессов построения модели системы управления, обработки данных в настоящее время применяются современные компьютерные программы MatLab, Delphi. В качестве обучающей выборки нейронной сети предлагается использовать данные, полученные в результате наблюдения за ходом технологического процесса на мощных алюминиевых электролизерах (свыше 300 кА), что равносильно применению при построении модели технологического процесса данных пассивного эксперимента.

Сравнение вариантов функционирования системы диагностики по критериям точности, требовательности к вычислительным ресурсам, скорости разработки системы, скорости адаптации позволило заключить, что наиболее эффективна комбинация рассмотренных вариантов (рис.1), которая использует нейронную сеть для расчета диагностируемой технологической ситуации. Начальная обучающая выборка нейронной сети формируется в результате проведения многомерного ситуационного обзора, построения регрессионных уравнений и применения методики bootstrap. В ходе эксплуатации системы обучающая выборка изменяется алгоритмом адаптации модели.

Нейронная модель технологического процесса реализована в виде трехслойного персептрона, содержащего девять нейронов во входном слое, пять нейронов в выходном и 25 нейронов в скрытом слое (рис.2). Модель в матричной форме имеет вид

$$x = \tilde{N}_3 f(\tilde{N}_2 \tilde{N}_1 y),$$

Вектор входных сигналов, дополненный единичным сигналом нейронного смещения,

$$y = (1, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9)^T.$$

где y_1 – показатель выхода по току; y_2 – объем металла; y_3 – показатель МПР (межполюсное расстояние между анодом и катодом линейно зависит от напряжения); y_4 – уровень металла; y_5 –расход фторида алюминия; y_6 – содержание натрия в металле; y_7 – расход глинозема; y_8 – частота АЭ; y_9 – содержание железа.

Все параметры взаимно зависимы и вызывают изменение ситуации с y.

Вектор выходных сигналов

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T.$$

где x_1 –температура электролита (измеряется хромель-алюмелевой термопарой или че-

* Программа для ЭВМ «NN Control+». № 2007611221. Свидетельство об официальной регистрации / А.Г.Бабенко, Г.Л.Хазан, В.Ю.Бажин, В.Г.Лисиенко. Зарегистр. 22.03.07.

The certificate on official registration of the computer program. N 2007611221. «NN Control+» / A.G.Babenko, G.L.Hazan, V.Yu.Bazhin, V.G.Lisienko. Reg. 22.03.07.

рез датчик автоматического питания глиноземом – АПГ); x_2, – концентрация глинозема (датчик концентрации или уровень шумов (градиент текущего напряжения)); x_3, – криолитовое отношение (отбор пробы или спектр); x_4, – напряжение, В/м; x_5, – уровень расплава (глубина хода штока пробойника АПГ до касания с электролитом).

Матрица синаптических весов нейронов первого слоя

$$\tilde{N}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Далее определяются матрицы синаптических весов нейронов 2-го и 3-го слоя. Функция $f(x) = \dfrac{|x|}{0{,}1 + |x|}$ применяется ко всем компонентам вектора-аргумента за исключением первого (первый компонент вектора обеспечивает смещение нейронов 3-го слоя и должен оставаться равным 1).

Алгоритм адаптации модели в диагностической системе отражает обновление данных обучающей выборки и поступающих в результате наблюдения за ходом технологического процесса, а также повторное обучение сети, если ошибка диагностики технологической ситуации недопустимо велика. После получения диагностики система должна выдавать рекомендации на управление. Инерционность процесса вызывают некоторые параметры (состав электролита и концентрация глинозема в линейной временной зависимости).

Функция диагностики технологического состояния использовалась разработанной системой для выработки рекомендаций по ведению технологического процесса с целью

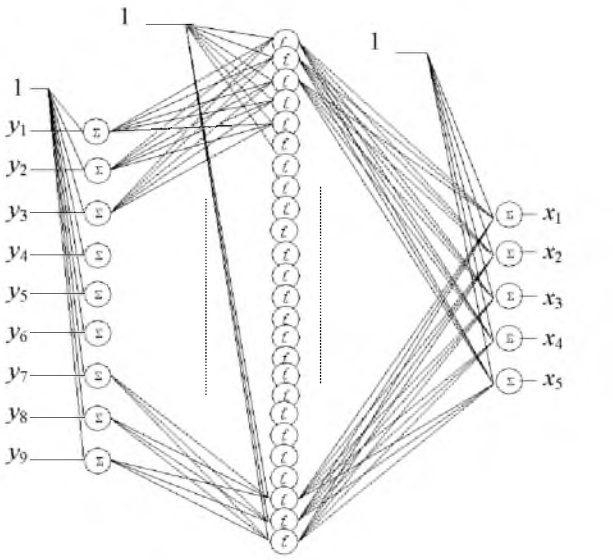

Рис.2 Структура нейросетевой модели технологического процесса в системе диагностики

достижения требуемого качества продукции. Особенность таких рекомендаций заключалась в расчете изменений нескольких технологических параметров, которые должны реализовываться одновременно. Этот способ управления процессом электролиза отличается от широко применяемого (в частности, на Уральском алюминиевом заводе) изменения факторов по одному показателю, который часто приводит к тому, что устранение отклонения одной категории сопровождается ухудшением ситуации из-за возникновения ранее не наблюдавшихся параметров.

Алгоритм расчета рекомендаций по ведению технологического процесса для достижения требуемого результата следующий:

1) на основании замеров определяются значения технологических показателей в текущий момент времени, одновременно с этим измеряются параметры технологического процесса, характеризующие текущее технологическое состояние $x_{тек}$;

2) выходящие параметры задаются по регламентируемым значениям. На основании этих значений, применяя нейросетевую модель, определяются соответствующие значения технологических параметров, т.е. требуемое технологическое состояние $x_{тр}$;

3) вектор рекомендуемых изменений вычисляется по формуле $\Delta x = k(x_{тр} - x_{тек})$, $k \le 1$.

Множитель k определяет количество шагов изменения технологических параметров для достижения необходимого результата; введен, чтобы уменьшить последствия управления, реализованного на основе ошибочных рекомендаций системы, полученных вследствие возможной неадекватности модели (во время промышленных испытаний системы задавалось $k = 0{,}2$, т.е. достижение требуемого качества за три шага); шаги 1-3 повторяются, пока не достигнут результат.

Проиллюстрируем сказанное примером. Текущее состояние технологического процесса определялось параметрами: $y_1 = 93{,}5$ %, $y_2 = 0{,}20$ т/м^2, $y_3 = 4{,}80$ см, $y_4 = 19$ см, $y_5 = 20$ кг/т Al, $y_6 = 0{,}009$ % (по массе), $y_7 = 1925$ кг/т, $y_8 = 0{,}3$ шт./сут, $y_9 = 0{,}08$ % (по массе). При этом определены текущие значения технологических параметров: $x_1 = 961$ °С, $x_2 = 4{,}8$ %, $x_3 = 2{,}49$ ед., $x_4 = 4{,}458$ В, $x_5 = 22/18$ см. По предъявляемым к качеству требованиям необходимо установить $y_1 = 96{,}0$ %. Расчет требуемого в этом случае технологического состояния дал следующие значения технологических параметров: $x_1 = 957$ °С, $x_2 = 3{,}0$ %, $x_3 = 2{,}30$ ед., $x_4 = 4{,}325$ В, $x_5 = 20$ см.

Таким образом, нужные параметры достигались в основном изменением x_2, x_4 и x_1, что согласуется с результатами качественного анализа технологического процесса, т.е. с топологией модели. В результате реализации управления технологическим процессом на основе рекомендаций разработанной системы были получены следующие технологические показатели: $y_1 = 95{,}0$ %, $y_2 = 0{,}23$ т/м^2, $y_3 = 4{,}67$ см, $y_4 = 20$ см, $y_5 = 16$ кг/т Al, $y_6 = 0{,}009$ % (по массе), $y_7 = 1918$ кг/т, $y_8 = 0{,}01$ шт./сут, $y_9 = 0{,}07$ % (по массе). Отклонение полученных результатов от требуемых значений качества не превысило 2 %. В более сложных случаях для достижения необходимого качества необходимо одновременное изменение нескольких технологических параметров.

В современном понимании систему диагностики электролиза можно представить как совокупность организационных и технических мер, необходимых для обеспечения гарантий высокой производительности при наименьших затратах. Применение данных алгоритмов в системах управления процессом в электролизерах с обожженными анодами обеспечит повышение качества управления процессом электролитического получения алюминия путем контроля теплового режима, стабилизацию концентрации глинозема и фторидов на заданном оптимальном уровне.