

НОВЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЁРА

И.А Карлов, О.Г. Прворова*

Авторы предлагают новый подход к исследованию влияния технологических параметров на работу алюминиевого электролизёра. Подход основан на обработке массива данных методами нейронной информатики.

Введение. В промышленности для получения алюминия используют процесс электролиза Эру-Холла. Он основан на электрохимической реакции превращения глинозема в алюминий. Промышленный электролизер состоит из угольных анодов, погруженных в расплавленный электролит, в котором растворен глинозем. Слой расплавленного электролита расположен над расплавом алюминия. Обычно электролизеры соединены в серии по 100 – 200 ванн.

В процессе электролиза в ванне на поверхности раздела алюминия и электролита могут возникать волны. Образование таких волн приводит к переносу металла в область электролита и снижает экономические показатели работы электролизёра. При некоторых условиях наблюдается рост амплитуд этих волн, что называют неустойчивостью работы электролизёра.

Поскольку устойчивость процесса электролиза – важный фактор эффективной работы электролизера, за последние два десятилетия появилось много работ [1-10], посвященных исследованию механизмов, которые вызывают волнение на поверхности металла. Само по себе существование различных подходов, дающих объяснения этому явлению, и приводящих к разным критериям устойчивости, свидетельствует о значимости этого явления для эксплуатационных качеств электролизера. При исследовании физических механизмов, вызывающих волнение металла, обычно рассматривают упрощенную геометрию такого электролизера (рис.1).

Для выяснения причин неустойчивости и получения критериев устойчивости обычно исследуют систему магнитогидродинамических уравнений

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + (\nabla V)V = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \Delta V + F; \quad \nabla V = 0;$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{rot}(V \times H) - \text{rot}(v_m \text{rot} H); \quad \text{div} H = 0.$$

Далее исследуют эти уравнения при различных упрощающих предположениях для того, чтобы решить две задачи [11]: задачу выявления волн на начальной стадии их развития, и задачу нахождения эффективных методов устранения волнений в электролизере. Авторы предлагают новый подход к решению этих задач.

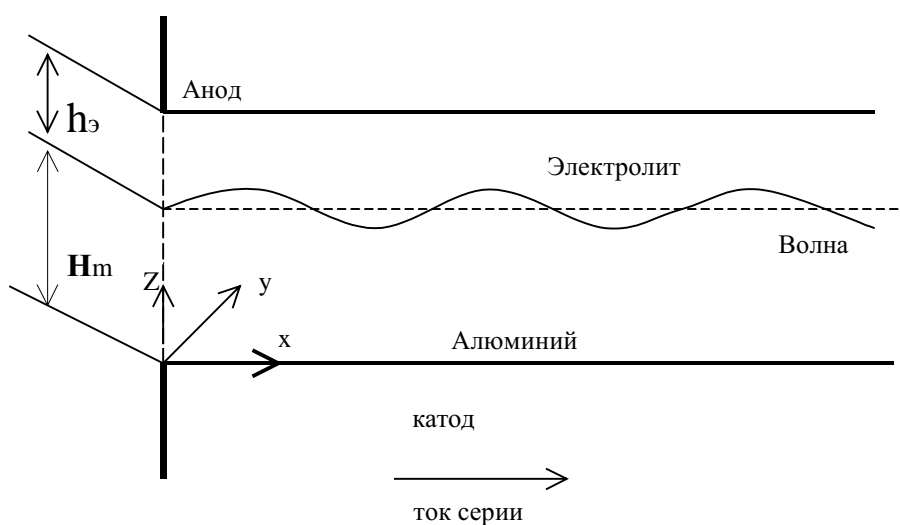


Рис. 1

Построение модели

В результате колебаний поверхности раздела происходят изменения напряжения на электролизере. Количественной характеристикой таких изменений является технологический параметр – “уровень шума”, который измеряют в вольтах.

Задача выявления волн на начальной стадии развития - это предсказание, прогнозирование значения параметра “уровень шума”, или, другими словами, задача построения функциональной зависимости значения параметра “уровень шума” от других технологических параметров.

Вторая задача – нахождение эффективных методов устранения волнений в электролизере - основана на исследовании математических моделей и заключается в том, что в определенный момент времени, когда “уровень шума” на электролизной ванне достигает допустимого предела, необходимо произвести некоторые действия, чтобы уменьшить значение параметра “уровень шума” и тем самым стабилизировать работу электролизера.

Процессы, происходящие в электролизере, характеризуются большим набором технологических параметров (температура, уровень металла и электролита, различные величины, характеризующие состав электролита, различные виды напряжений) и технологических операций (выливка металла, замена анодов, анодные эффекты). Не все параметры, а тем более технологические операции, можно учесть в системе магнитогидродинамических уравнений.

Найдём зависимость “уровня шума” от технологических параметров методами нейронинформатики.

Для исследования строят нейронную сеть, которую обучают правильно решать поставленную задачу.

У нейронной сети выделяют группу связей, по которым она получает информацию (входной вектор), и группу связей, с которых снимаются выдаваемые сетью сигналы (выходной вектор).

Нейрон имеет следующую математическую модель [12]:

$$S = \sum_{i=1}^N w_i x^i + w_0,$$

$$y = \varphi(S),$$

где

w_i - вес синапса (weight), ($i=1,2,...N$);

S - результат суммирования (sum);

x_i - компонента входного вектора (входной сигнал), ($i=1,2,...N$);

y - выходной сигнал нейрона;

N - число входов нейрона;

φ - нелинейное преобразование

Тогда модель всей нейронной сети будет иметь вид

$$y = \sum_{i_L=1}^{N_L} w_{i_L}^L \varphi \left(\sum_{i_{L-1}=1}^{N_{L-1}} w_{i_{L-1}}^{L-1} \varphi \left(\dots \varphi \left(\sum_{i_1=1}^{N_1} w_{i_1}^1 x^i + w_0^1 \right) \dots \right) + w_0^{L-1} \right) + w_0^L.$$

Состояние электролизной ванны зависит не только от технологических параметров самой ванны, но и от состояния соседних с ней ванн. Поэтому во входной вектор нейросети включены также технологические параметры электролизной ванны, расположенной перед исследуемой по линии тока.

Компонентами входного вектора \bar{x} являются: на предыдущей ванне: Уровень металла, Уровень электролита, Температура, Количество АЭ, Длительность АЭ, Напряжение АЭ, Средний уровень шума, Время высокого шума, Напряжение электролизера, Среднее заданное напряжение, на самой ванне: Уровень металла, Уровень электролита, Температура, Количество АЭ, Длительность АЭ, Напряжение АЭ, Напряжение электролизера, Среднее заданное напряжение.

Теперь задача формулируется следующим образом. Пусть вектор \bar{x} содержит результаты измерений технологических параметров двух соседних электролизных ванн. Необходимо построить функцию $F(\bar{x})$, вычисляющую значение параметра "Уровень шума на текущей ванне".

Для исследования были построены два обучающих множества: Учитель - для обучения нейросети, и Задачник - для тестирования обученной нейросети.

Одним из критериев, определяющих применимость методов нейронинформатики, является критерий, основанный на константе Липшица.

Введем функцию $\arg \max F(x) = \{x_0 = \arg \max F(x) : F(x_0) = \max F(x)\}$.

Константа Липшица L вычисляется для всего обучающего множества:

$$L = \max_{i,j \in [1,n]} \frac{\|\bar{y}_i - \bar{y}_j\|}{\|\bar{x}_i - \bar{x}_j\|},$$

где \bar{y}_i - компоненты, входящие в выходной вектор сети, а \bar{x}_i - во входной.

Если $((x, y)_{i_0}, (x, y)_{j_0}) = \arg \max L$, и $L((x, y)_{i_0}, (x, y)_{j_0}) \gg 1$, то у этих элементов входные вектора будут практически совпадать, а выходные будут сильно отличаться, т.е. для двух одинаковых входных векторов результат работы сети должен быть различен. Это приводит к противоречию в работе сети и не дает ей возможности правильно обучиться для решения поставленной задачи. Такие входные векторы будем называть "противоречивыми".

Данный критерий интересен тем, что позволяет определить эти самые "противоречивые" элементы. На практике такие элементы часто удаляют из обучающего множества и переносят в дополнительное, изучением которого занимаются отдельно. После удаления "противоречивых" элементов значения констант Липшица становятся для Учителя - 1,49; а для Задачника - 1,45.

Проведен выбор архитектуры (количества слоев и нейронов в каждом слое) сети и ее обучение и тестирование.

В табл. 1 приведены описания и результаты тестирования двух нейросетей, показавших наилучшие результаты.

Из табл.1 видно, что сеть 2 решает поставленную задачу лучше, чем сеть 1. Следовательно, математическая модель, задаваемая сетью 2, более точна, чем модель, задаваемая сетью 1.

Таким образом построены несколько моделей, несколько вариантов функции зависимости значения параметра "уровень шума" от других технологических параметров.

Таблица 1

Сеть 1		Сеть 2	
Описание			
Количество слоев:	1	Количество слоев:	2
Количество нейронов:	20	Количество нейронов:	18+2
Тестирование			
Количество правильно решенных примеров:	88,75%	Количество правильно решенных примеров:	95,46%
Количество неправильно решенных примеров:	11,25%	Количество неправильно решенных примеров:	4,54%
Средняя ошибка:	8,24%	Средняя ошибка:	4,23%

Исследование влияния технологических параметров на стабильность электролизной ванны

В табл.2 приведены веса всех компонент входного вектора. Вес показывает степень влияния компонент входного вектора на конечный результат.

В таблице для каждой из сетей выделены 3 параметра, которые имеют наибольшее влияние на конечный результат. В обеих сетях такими оказались параметры "уровень шума на предыдущей ванне", "длительность анодных эффектов" и "напряжение электролизера".

Практический опыт работы с электролизными ваннами также показывает большую значимость этих параметров по сравнению с другими. Что говорит об адекватности построенной модели.

Однако четвертые по значимости параметры для сетей отличаются. Для сети 1 это "напряжение электролизера на предыдущей ванне", для сети 2 – "заданное напряжение". Сам факт, что параметр "заданное напряжение" выделен как один из значимых, представляет огромный интерес потому, что этот параметр относится к управляемым, то есть с его помощью можно управлять технологическим процессом.

Информативным может оказаться множество "противоречивых" элементов, созданное на этапе анализа обучающей выборки.

Таблица 2

Параметр	Сеть 1	Сеть 2
Уровень металла на предыдущей ванне	0,009	0,007
Уровень электролита на предыдущей ванне	0,012	0,036
Температура на предыдущей ванне	0,019	0,002
Количество АЭ на предыдущей ванне	0,033	0,007
Длительность АЭ на предыдущей ванне	0,071	0,066
Напряжение АЭ на предыдущей ванне	0,016	0,025
Уровень шума на предыдущей ванне	0,104	0,143
Время высокого шума на предыдущей ванне	0,051	0,066
Напряжение электролизера на предыдущей ванне	0,092	0,051
Заданное напряжение на предыдущей ванне	0,036	0,069
Уровень металла	0,019	0,014
Уровень электролита	0,023	0,014
Температура	0,022	0,031
Количество АЭ	0,057	0,031
Длительность АЭ	0,125	0,127
Напряжение АЭ	0,022	0,057
Напряжение электролизера	0,235	0,147
Заданное напряжение	0,047	0,108

Рассмотрим 2 элемента из этого множества. В табл.3 во втором и третьем столбцах приведены значения компонент элементов, в четвертом столбце – норма их разности. В пятом – процент от диапазона значений этой

нормы:
$$Per = \frac{|x_1^i - x_2^i|}{|\max x^i - \min x^i|} \cdot 100\%$$

Параметр	X ₁	X ₂	X ₁ -X ₂	Per Таблица 3
1	2	3	4	5
Номер электролизера	6	6	-	-
Уровень металла на предыдущей ванне	26	25	1	6%
Уровень электролита на предыдущей ванне	20	20	0	0%
Температура на предыдущей ванне	958	961	3	7.5%
Количество АЭ на предыдущей ванне	0	0	0	0%
Длительность АЭ на предыдущей ванне	0	0	0	0%
Напряжение АЭ на предыдущей ванне	0	0	0	0%
Уровень шума на предыдущей ванне	0.02	0.017	0.003	1.6%
Время высокого шума на предыдущей ванне	0	0	0	0%
Напряжение электролизера на предыдущей ванне	4.506	4.517	0.011	1%
Заданное напряжение на предыдущей ванне	4.49	4.49	0	0%
Уровень металла	24	24	0	0%

1	2	3	4	5
Уровень электролита	21	23	2	12.5%
Температура	970	975	5	2.5%
Количество АЭ	1	1	0	0%
Длительность АЭ	1.2	2.3	1.1	12%
Напряжение АЭ	32	41	9	9%
Напряжение электролизера	4.647	4.628	0.019	1.8%
Заданное напряжение	4.668	4.584	0.084	11%
Уровень шума	0.171	0.022	0.149	84%

Все параметры, кроме “уровня шума”, почти не отличаются – максимальная разность (параметр “уровень электролита”) составила всего 12,5%. Разница в значении параметра “уровень шума” между этими элементами составила 82%.

На основе полученной информации можно сделать несколько предположений, следующие из анализа табл.3.

1. Из обработки, возможно, исключены важные технологические параметры.
2. Уровень электролита - 23 см близок к критическому значению для ванн этого типа, поэтому уменьшение на 12,5% привело к значительному увеличению параметра “Уровень шума”.

Авторы благодарят ОАО КрАЗ за предоставленные материалы и обсуждение постановки задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Urata N., Mori K, Ikeuchi H. Behavior of Bath and Molten Metal in Aluminium Electrolytic Cell // (Light Metals, Japan, Kaikiuzoku). 1976, 26. p. 573-583.
2. Urata N. Magnetic and metal pad instability // Light Metals, 1985. p. 581-589.
3. Tang H.Q., Urata N., Metal pad wave analysis using a fast anode lowering method // Light Metals, 1997. p.387-393.
4. Sele T., Instabilities of the Metal Surface in Electrolytic Cells // Light Metals. 1977. 7-24.
5. Bojarevics V., Romerio M.V., Long wave instability in liquid metal-electrilyte interface in aluminium electrolysis cells: a generalization of Sele’s criterion // European Journal of Mechanics. B/Fluids. Vol. 13. N 1. 1994. p.33-56.
6. Davidson P.A., Lindsay R.J. A New Model of Interfacial Waves in Aluminium Reduction Cells // Light Metals. 1997. p. 432-441.
7. Lindsay R.J., Davidson. P.A. Application of New Stability Criteria to Industrial Cell Desighn // Light Metals. 1997. p. 423-427.
8. Davidson P.A., Lindsay R.J., Stability of interfacial waves in aluminium reduction cells // Light Metals. 1998. p. 437-443.
9. Davidson P.A., Graham W.R., O’Brien. Instability Mechanisms in Aluminium Reduction Cells // Light Metals. 1999. p.327-331.
10. Droste Ch., Segatz M. and Vogelsang D., Magnetohydrodynamics Instability Analysis in Reduction Cells // Light Metals. 1998. p. 419-427.
11. LaCamera A.F., Ziegler D.P., Kozarek R.L. Magnetohydrodynamics in the Hall-Heroult process, an overview // Magnetohydrodynamics in progress. Metallurgy TMS Annual Meeteng. San Diego. California. March 1-5. 1992.
12. Заенцев И.В. Нейронные сети: основные модели. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1999.