

УДК 519.7

Ю.Н. Алпатов*, В.В. Черепанов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АНОДНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ АЛЮМИНИЯ

В статье рассмотрена методика получения математической модели сложного производственного процесса при помощи топологического метода на основе структурного графа.

Ключевые слова: математическая модель, методика моделирования, множественная регрессия.

В ходе электролиза на аноде периодически возникает явление, называемое анодным эффектом, или, по производственной терминологии, «вспышкой». В технологии электролиза возникновение анодных эффектов имеет большое практическое значение. Влияние анодного эффекта на производство алюминия покажем в табличной форме.

Возможность управлять и контролировать наступление анодного эффекта явля-

ется одной из важнейших задач управления электролизом алюминия на современном производстве, позволяет снизить отрицательные последствия анодного эффекта и повысить технико-экономические показатели.

Топологический метод на основе С-графа дает возможность получить математическую модель процесса электролиза алюминия.

Таблица 1

Влияние анодного эффекта на электролиз алюминия

Анодный эффект	
Положительное влияние	Отрицательное влияние
<ul style="list-style-type: none"> - хорошая контрольная характеристика; - позволяет подравнивать и очищать подшву анода; - позволяет снять «сухую» пену с минимальным содержанием криолита; - используется для разогрева расплава. 	<ul style="list-style-type: none"> - повышается расход электроэнергии и материалов; - интенсифицируется улетучивание составляющих электролита; - прекращается наработка металла; - снижается производительность электролизера.

$$\begin{pmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & W_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{36} & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{31} & W_4 & -1 & W_{10} & 0 & 0 & 0 & W_{38} & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_9 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & W_{14} & W_{17} & W_{20} & W_{23} & W_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_1 & W_6 & W_{11} & -1 & 0 & W_{34} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{28} & W_{29} & 0 & 0 & 0 & 0 & W_7 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & W_{39} \\
 0 & 0 & 0 & W_{15} & W_{18} & W_{21} & 0 & W_{26} & W_{27} & 0 & 0 & W_{30} & 0 & W_2 & W_8 & W_{12} & W_{33} & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & W_{16} & W_{19} & W_{22} & W_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_3 & 0 & W_{13} & 0 & 0 & W_{35} & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{32} & 0 & 0 & 0 & -1
 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{16} \\ x_{17} \\ x_{18} \\ x_{19} \\ x_{20} \\ x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{25} \\ x_{26} \\ x_{27} \\ x_{28} \\ x_{29} \\ x_{30} \\ x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \\ x_{34} \\ x_{35} \\ x_{36} \\ x_{37} \\ x_{38} \\ x_{39} \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

Благодаря матричному виду записи модели, можно получить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 & x_1 - x_{14} + w_5 \cdot x_{15} + w_{36} \cdot x_{77} = 0 \\
 & x_2 + w_{31} \cdot x_{13} + w_4 \cdot x_{14} - x_{15} + w_{10} \cdot x_{16} + \\
 & \quad + w_{38} \cdot x_{77} = 0 \\
 & x_3 + w_9 \cdot x_{15} - x_{16} = 0 \\
 & w_{14} \cdot x_4 + w_{17} \cdot x_5 + w_{20} \cdot x_6 + w_{23} \cdot x_7 + \\
 & \quad + w_{25} \cdot x_8 + w_1 \cdot x_{14} + \\
 & w_6 \cdot x_{15} + w_{11} \cdot x_{16} - x_{74} + w_{34} \cdot x_{76} = 0 \\
 & w_{28} \cdot x_{10} + w_{29} \cdot x_{11} + w_7 \cdot x_{15} - x_{75} + w_{39} \cdot x_{93} = 0 \\
 & w_{15} \cdot x_4 + w_{18} \cdot x_5 + w_{21} \cdot x_6 + w_{26} \cdot x_8 + \\
 & \quad + w_{27} \cdot x_9 + w_{30} \cdot x_{12} + w_2 \cdot x_{14} + \\
 & w_8 \cdot x_{15} + w_{12} \cdot x_{16} + w_{33} \cdot x_{74} - x_{76} = 0 \\
 & w_{16} \cdot x_4 + w_{19} \cdot x_5 + w_{22} \cdot x_6 + w_{24} \cdot x_7 + w_3 \cdot x_{14} + \\
 & \quad + w_{13} \cdot x_{16} + w_{35} \cdot x_{76} - x_{77} = 0 \\
 & w_{32} \cdot x_{74} - x_{93} = 0
 \end{aligned} \right\} (2)$$

Из системы уравнений (2) определяется уравнение для нахождения модели процесса анодного эффекта:

$$W_{16}X_4 + W_{19}X_5 + W_{22}X_6 + W_{24}X_7 + W_3X_{14} + \\
 + W_{13}X_{16} + W_{35}X_{76} - X_{77} = 0,$$

Где X_4 – криолитовое отношение; X_5 – фтористый кальций, (%); X_6 – фтористый магний, (%); X_7 – уровень электролита, (см); X_{14} – действительное значение тока серии, (кА); X_{16} – действительное количество доз глинозема, поданного на электролизную ванну, (доз); X_{76} – температура электролита электролизера, (С°); X_{77} – частота анодных эффектов на электролизере. Математическая модель процесса анодного эффекта имеет вид (3):

$$X_{77} = W_{16}X_4 + W_{19}X_5 + W_{22}X_6 + W_{24}X_7 + W_3X_{14} + \\
 + W_{13}X_{16} + W_{35}X_{76}$$

При связности параметров процесса функциональные зависимости искомого компонент можно свести к другому виду, исключив из (1) трудноконтролируемые технологические параметры.

Поэтому параметр X_{16} исключим из соотношения и введем параметр $X_0 = 1$ – начальные условия функционирования системы. Получим:

$$X_{77} = K_1 X_0 + W_{16} X_4 + W_{19} X_5 + W_{22} X_6 + W_{24} X_7 + W_3 X_{14} + W_{35} X_{76}$$

Процесс получения алюминия – устойчивый процесс, поэтому для параметрической идентификации был выбран стационарный режим, а математическим аппаратом моделирования принят метод регрессионного анализа.

Для процесса получения алюминия предложена регрессионная модель в виде:

$$Y = XB, \quad (3)$$

где

$$B = [X^T X]^{-1} X^T Y \quad (4)$$

X – матрица результатов наблюдений за параметрами ($X_1 \dots X_n$); Y – матрица-столбец выходных результатов измерений; B – матрица-столбец коэффициентов регрессионной модели.

Был проведен ряд экспериментов по замеру необходимых технологических параметров, при этом значения экспериментов брались усредненными за сутки, т. е. центрированными. С учетом специфики электролизного производства, замер некоторых параметров представляет собой известную сложность, поэтому применялась малая выборка результатов экспериментов. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты замеров технологических параметров

Сутки	КО (мол) <Ср.>	CaF2 (%) <Ср.>	MgF2 (%)	Уров. эл-та (см) <Ср.>	Сила тока (кА)	Температура (С) <Ср.>	АЭ
1 фев.	2,307	7,333	0,892	17,1	169,3	957,9	65
2 фев.	2,307	7,333	0,892	17,3	169,2	960,4	96
3 фев.	2,307	7,333	0,892	17,4	169,5	960,9	93
4 фев.	2,307	7,333	0,892	17,2	169,5	960,5	121
5 фев.	2,312	7,309	0,889	17,2	169,5	959,9	112
6 фев.	2,312	7,309	0,889	16,9	169,5	958,4	104
7 фев.	2,312	7,309	0,889	17,4	169,5	960,9	79
8 фев.	2,312	7,309	0,889	17,8	169,5	962,4	68
9 фев.	2,312	7,309	0,889	17,8	169,5	964,6	70
10 фев.	2,312	7,309	0,889	17,7	169,2	966,0	65
11 фев.	2,312	7,309	0,889	17,2	169,5	963,7	53
12 фев.	2,357	7,388	0,838	17,1	169,5	963,0	59
13 фев.	2,357	7,388	0,838	17,1	169,5	961,0	50
14 фев.	2,357	7,388	0,838	16,7	169,5	960,2	57
15 фев.	2,357	7,388	0,838	17,2	169,5	964,1	61
16 фев.	2,357	7,388	0,838	17,0	169,5	965,0	74
17 фев.	2,357	7,388	0,838	16,8	169,5	964,5	59
18 фев.	2,357	7,388	0,838	17,3	169,5	963,6	55
19 фев.	2,314	7,436	0,868	17,5	169,5	964,0	58
20 фев.	2,314	7,436	0,868	17,3	169,5	963,1	58
21 фев.	2,314	7,436	0,868	17,8	169,2	963,6	78
22 фев.	2,314	7,436	0,868	17,4	169,5	962,5	93
23 фев.	2,314	7,436	0,868	17,9	169,5	964,2	86
24 фев.	2,314	7,436	0,868	17,8	169,5	964,4	53
25 фев.	2,314	7,436	0,868	17,6	169,5	964,4	53
26 фев.	2,349	7,396	0,847	17,5	169,5	966,8	60
27 фев.	2,349	7,396	0,847	17,4	169,5	966,3	45
28 фев.	2,349	7,396	0,847	17,5	169,5	966,5	72

Используя соотношение (4), данные экспериментов таблицы 2, а также программный пакет Matlab 6.1, получим следующую математическую модель процесса анодного эффекта в стационарном режиме.

Функция частоты анодных эффектов имеет вид:

$$X_{77} = K_1 X_0 +$$

$$W_{16}X_4 + W_{19}X_5 + W_{22}X_6 + W_{24}X_7 + W_3X_{14} + W_{35}X_{76}$$

Компоненты уравнения (3) равны:

Результат расчета

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 2,31 & 7,33 & 0,89 & 17,2 & 169,5 & 960,5 \\ 1 & 2,36 & 7,39 & 0,84 & 17,1 & 169,5 & 961,0 \\ 1 & 2,36 & 7,39 & 0,84 & 16,7 & 169,5 & 960,2 \\ 1 & 2,36 & 7,39 & 0,84 & 17,0 & 169,5 & 965,0 \\ 1 & 2,31 & 7,44 & 0,87 & 17,8 & 169,2 & 963,6 \\ 1 & 2,31 & 7,44 & 0,87 & 17,4 & 169,5 & 962,5 \\ 1 & 2,35 & 7,40 & 0,85 & 17,5 & 169,5 & 966,5 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 121 \\ 50 \\ 57 \\ 74 \\ 78 \\ 93 \\ 72 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 182,09 \\ -2421,3 \\ -456,39 \\ -1290,9 \\ -28,1 \\ 31,96 \\ 5,3 \end{bmatrix}$$

Математическая модель частоты анодных эффектов принимает вид:

$$X_{77} = 182,09 - 2421,3X_4 - 456,39X_5 -$$

$$-1290,9X_6 - 28,1X_7 + 31,96X_{14} + 5,3X_{76}$$

Полученная математическая модель позволит разработать алгоритмы управления анодными эффектами, возникающими при электролизе алюминия, что может сократить нежелательные технологические влияния анодного эффекта и уменьшить затраты на производство.

Литература

1. Теоретические основы электрометаллургии алюминия / Г. А. Абрамов, М. М. Ветюков, И. П. Гупало, А. А. Костюков, Л. Н. Ложкин. М.: Metallurgizdat, 1953. 583 с.
2. Алпатов Ю. Н. Синтез систем управления методом структурных графов. Иркутск : ИГУ, 1988. 144 с.
3. Громько А. И., Шайдуров Г. Я. Автоматический контроль технологических параметров алюминиевых электролизеров. Красноярск : КрасГУ, 1984. 235 с.
4. Янко Э. А., Лозовой Ю. Д. Производство алюминия в электролизерах с верхним токоподводом. М.: Metallurgia, 1976. 160 с.
- 5.

УДК 621.879

М.А. Приходько, Ю.Н. Булатов, И.В.Игнатьев*

РАЗРАБОТКА БЛОКА АВТОНАСТРОЙКИ АРЧМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

В работе рассматриваются вопросы создания блока автонастройки автоматического регулятора частоты и активной мощности (АРЧМ) в MATLAB на основе нечеткой логики. Показано повышение эффективности и робастности АРЧМ при работе совместно с блоком автонастройки.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, моделирование, автоматический регулятор частоты и активной мощности, ПИД-регулятор, фаззи-блок автонастройки, нечеткая логика

* – автор, с которым следует вести переписку