

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБОНАТОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Киктев Н.А., Чичикало Н.И.

Донецкий национальный технический университет
кафедра электронной техники

Abstract. *Kiktev N.A., Chichikalo N.I. Optimization of process control of obtaining karbonats by a method of dynamic programming. In paper the method of dynamic programmings used in a management information system by the technological process of obtaining of carbonic salts, providing optimization of speed of course of the process of anode dissolution and derivations of salts of the given sort is offered.*

Постановка проблемы и ее актуальность. Оптимизация системы управления процессом получения карбонатов является важной задачей, поскольку нарушение технологического режима может привести к получению вещества с другой химической формулой. Оптимальная система управления позволит также унифицировать процесс электрохимического растворения применительно ко всем видам карбонатов для премиксов в комбикорма сельскохозяйственным животным. Эта важная народнохозяйственная задача в настоящее время на Украине и в СНГ не решена.

Анализ исследований по проблеме. В настоящее время производятся сернокислые соли рядом предприятий Донецка, Киевской области, Одессы. Употребление этих солей в качестве премиксов могут оказывать вредное воздействие, так как они подвержены гидролизу.

Нерешенные ранее вопросы. В работе [1] рассмотрены вопросы постановки экспериментов по получению карбонатов, построения регрессионной модели, проверка ее адекватности. Выявлены значимые факторы, влияющие на скорость процесса: анодная плотность тока (D_a), кислотность (pH) и температура (T). В работе [3] сформулирована постановка задачи управления процессом электрохимического растворения.

Цель статьи. Обеспечивать максимальную скорость процесса анодного растворения путем определения оптимальных управляющих воздействий методом динамического программирования.

Основные материалы исследований. Задача динамического программирования при оптимальном управлении электрохимическим процессом состоит в нахождении стратегии управления, определяемой решениями, принимаемыми при каждом управляющем воздействии, при котором скорость процесса является максимальной [1]:

$$v = 0,434 + 0,072 \cdot pH - 0,019 \cdot D_a - 0,012 \cdot T + 0,001 \cdot pH \cdot T - 0,007 \cdot pH^2 + 0,001 \cdot D_a^2 \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} pH_{\min} &\leq pH \leq pH_{\max} \\ T_{\min} &\leq T \leq T_{\max} \\ D_{a \min} &\leq D_a \leq D_{a \max} \end{aligned} .$$

Исходное состояние системы (S^0) можно представить вектором измеренных значений pH , плотности тока и температуры в момент времени t^0 :

$$S^0 = [pH^0 \quad D_a^0 \quad T^0] .$$

Вектор управляющих воздействий на i -м шаге равен:

$$Y^i = [\Delta pH^i \quad \Delta D_a^i \quad \Delta T^i] .$$

В результате применения управления Y^i , система переходит в новое со-

стояние $S^i = \varphi^i \left(S^{i-1}, \begin{array}{c} \Delta pH^i \\ \Delta D_a^i \\ \Delta T^i \end{array} \right) .$

Сформулируем основное функциональное уравнение Беллмана для поставленной задачи, характеризующее эффективность управления за n шагов:

$$F_{n-k}(S^0) = \max_{Y_{k+1}} \left[Z_{k+1}, \left(S^k, \begin{array}{c} \Delta pH^{k+1} \\ \Delta D_a^{k+1} \\ \Delta T^{k+1} \end{array} \right) + F_{n-k-1} \left(\varphi_{n-k} \left(S^{k+1}, \begin{array}{c} \Delta pH^{k+1} \\ \Delta D_a^{k+1} \\ \Delta T^{k+1} \end{array} \right) \right) \right] ,$$

где $k=0,1,\dots,n-1$.

Задаваясь некоторыми фиксированными значениями S^{n-1} и $Y^n = [\Delta pH^n \quad \Delta D_a^n \quad \Delta T^n]$, найдем максимальное значение $Z_n(S^{n-1}, Y^n)$ и оптимальное управление $Y_n^{onm} = [\Delta pH^{onm} \quad \Delta D_a^{onm} \quad \Delta T^{onm}]$. Вычисление по рекуррентной формуле будем продолжать от $k=n-2$ до $k=0$, таким образом, найдя все оптимальные управления и максимальную эффективность управления $F_n(S^0)$.

На рис. 1 иллюстрируется выработка оптимальной стратегии управления рассматриваемой задачи, с использованием метода динамического программирования.

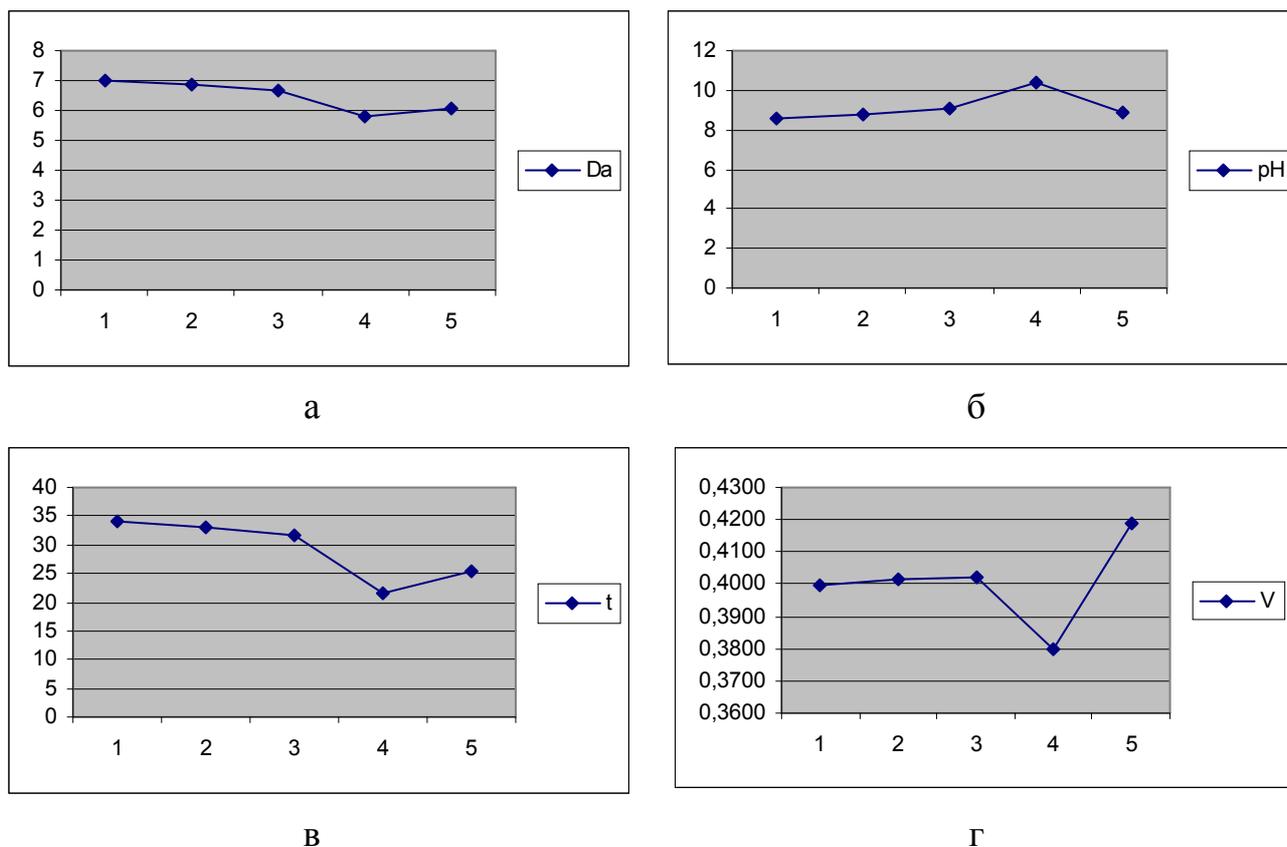


Рисунок 1 — Оптимизация параметров технологического процесса ЭХР методом динамического программирования

На основании критерия управления током процесса [3] выработаем оптимальную стратегию управления анодной плотностью тока. Оптимизация режима плотности тока дает возможность получить оптимальные значения продолжительности процесса τ^{opt} и плотности тока D_a^{opt} .

С целью обеспечения максимальной скорости процесса выполняется оптимизация режима плотности тока, включающая:

- выявление диапазона гранично-допустимых значений плотности тока;
- организация цикла по плотности тока;
- вычисление продолжительности процесса τ из модели $D_a^{opt} = f(\tau)$;
- вычисление произведения $A^i = D_a^i \cdot \tau^i$;
- вычисление оптимального значения $A^{opt} = \min\{A^i\}$ и соответствующего ему D_a^{opt} .

Блок-схема алгоритма приведена на рис.2.

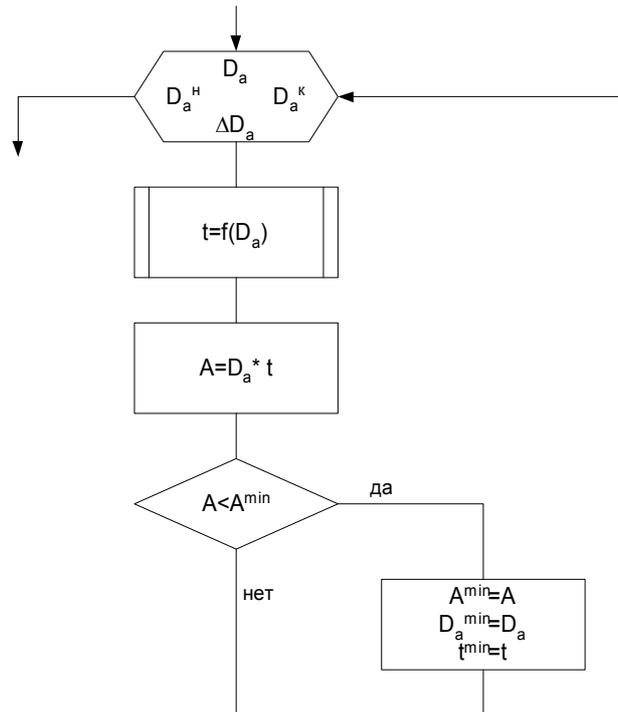


Рисунок 2 — Блок-схема алгоритма оптимизации режима управления плотностью тока

В результате сравнения текущей плотности тока $D_a(t)$ с оптимальным значением D_a^{opt} осуществляется вычисление величины управляющего воздействия

$$\Delta U = U - U^{opt} = (D_a(t) - D_a^{opt}) \cdot S_a(t) \cdot \sigma_{эл}$$

где $\sigma_{эл}$ — проводимость электролита.

На основании дифференциального уравнения скорости электрохимического процесса [1] находится максимальное значение функции $\frac{dm}{d\tau}$ и устанавливается функциональная связь между оптимальной плотностью тока D_{opt} и концентрацией C :

$$D_a^{opt} = \Phi(C). \quad (2)$$

Используя выведенное ранее дифференциальное уравнение

$$-\frac{dc}{\eta(D_a, C)} = \frac{KS_a D_a}{VZF} d\tau \quad (3)$$

и учитывая (2), получим уравнение, связывающее концентрацию с временем электролиза при оптимальном режиме:

$$-\frac{dC}{\eta[C \cdot \Phi(C)]} = \frac{kS_a \cdot \Phi(C)}{VZF} d\tau, \quad (4)$$

где k — стехиометрический коэффициент, Z — порядок электрохимической реакции, S_a — поверхность электродов.

Решение уравнения (4) приводит к зависимости

$$C = \psi(\tau) \quad (5)$$

И, наконец, подставив значение C из (5) в (3), находим искомую функцию

$$D_{onm} = \Phi[\psi(\tau)] \quad (6)$$

которая используется в АСУ ТП электрохимического растворения для определения концентрации в процессе электролиза. Подставив в (5) минимальную концентрацию, находим предельное время электролиза τ_{np} .

С целью обеспечения максимальной скорости процесса необходимо поддерживать оптимальную плотность тока, которая определяется путем нахождения максимума функции (3). Решение составленного выше дифференциального уравнения для максимального значения функции $\frac{dm}{d\tau}$ приводит к полиномиальной зависимости

$$D_{onm}^{(j)} = \sum_{i=0}^4 A_i^{(j)} \cdot \tau^i, \text{ различной для каждого } j\text{-го производимого продукта (табл. 1,}$$

рис. 3), а — при получении малахита, б — азурита, в — кобальта углекислого, г — цинка углекислого основного.

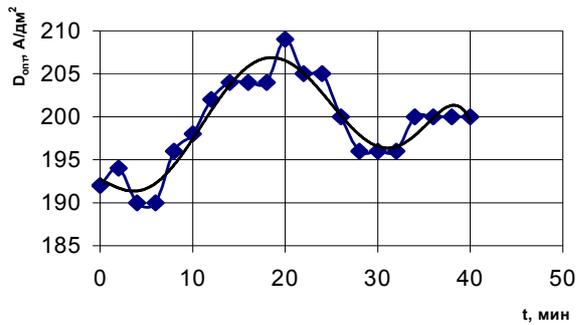
Таблица 1 — Зависимости оптимальной плотности тока от продолжительности процесса

Продукт	Модель	R^2
Малахит	$D_{onm} = 0.01 \cdot t^4 - 0.24 \cdot t^3 + 1.69 \cdot t^2 - 2.49 \cdot t + 300,03$	0,7839
Азурит	$D_{onm} = 0.04 \cdot t^3 - 0.09 \cdot t^2 - 0.44 \cdot t + 192,68$	0,9045
Цинк углекислый основной	$D_{onm} = -0.05 \cdot t^4 + 0.56 \cdot t^3 - 3.09 \cdot t^2 + 8.95 \cdot t + 250,11$	0,9833
Кобальт углекислый	$D_{onm} = 0.01 \cdot t^4 - 0.29 \cdot t^3 + 3.47 \cdot t^2 - 21.03 \cdot t + 802,97$	0,9807

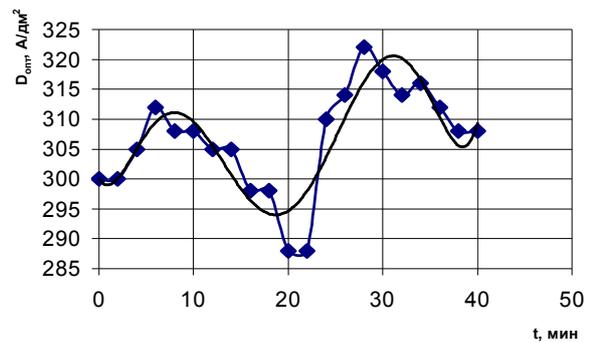
Обоснование полученных научных результатов. Вследствие того, что рассматриваемая целевая функция (1) является квадратичной, нахождение максимума осуществляется одним из методов нелинейного программирования. Для решения поставленной задачи применим метод штрафных функций. Алгоритм оптимизации реализован при помощи языка Visual Basic. Результаты просчета приведены в табл. 2. В качестве начальных приближений выбраны векторы X^0 , а оптимальным решением являются соответственно векторы X^{onm} :

$$X^0 = \begin{bmatrix} 4 \\ 8 \\ 40 \end{bmatrix} \text{ и } X^0 = \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \\ 20 \end{bmatrix}, \quad X^{opt} = \begin{bmatrix} 7.88 \\ 12.68 \\ 34.29 \end{bmatrix} \text{ и } X^{opt} = \begin{bmatrix} 7.09 \\ 11.56 \\ 32.39 \end{bmatrix}.$$

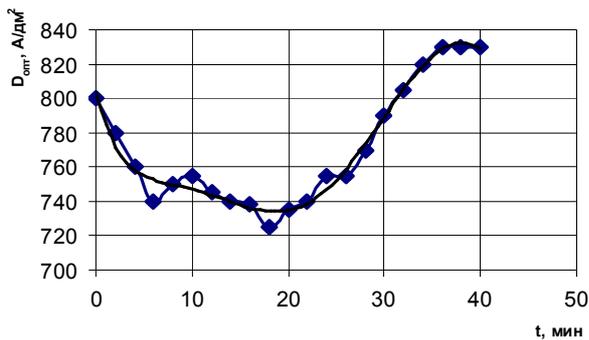
При этом максимальное значение целевой функции (скорости процесса) 0.37. На рис. 4 в плоскости линий уровня показано движение точки от начального приближения к экстремуму.



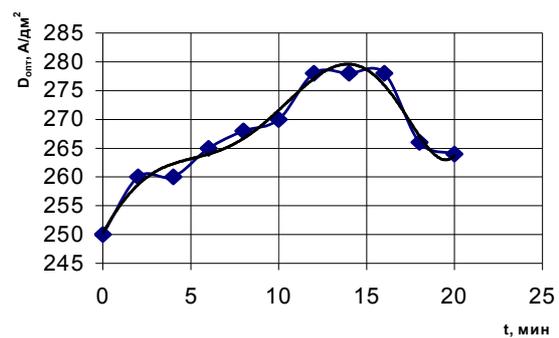
а



б



в



г

Рисунок 3 — Зависимости оптимальной плотности тока от продолжительности процесса

Таблица 2 — Результаты оптимизации технологического процесса получения карбонатов

pH	Da	T	V
3,99	7,95	39,05	0,22
4,97	8,89	38,09	0,28
5,95	9,84	37,14	0,32
6,92	10,79	36,19	0,35
7,88	11,73	35,24	0,37
7,88	12,68	34,29	0,37

pH	Da	T	V
3,98	2,94	19,05	0,43
4,95	3,88	18,09	0,45
5,91	4,83	17,14	0,46
6,87	5,77	16,19	0,46
7,06	8,72	35,24	0,37
7,07	9,67	34,29	0,37
7,08	10,62	33,34	0,37
7,09	11,56	32,39	0,37

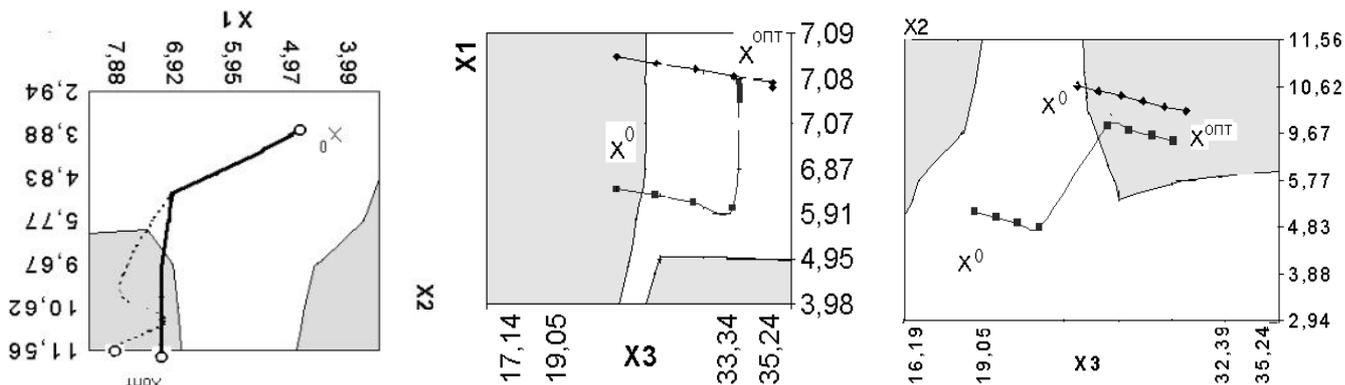


Рисунок 4 — Движение точки к экстремуму в плоскости линий одного уровня

Выводы.

1. Из результатов, приведенных на рис. 4 и в табл. 2 следует: если начальное приближение лежит в области допустимых решений, то максимальная скорость процесса достигается за 5 шагов, а если вне области — то за 7 шагов.

2. Оптимальное управление процессом возможно при совместном использовании метода динамического программирования и градиентного метода штрафных функций.

3. Разработанный алгоритм позволяет управлять процессом, находясь в области допустимых решений, что гарантирует качество полученного карбоната.

Литература

1. Киктев Н.А. Построение регрессионной математической модели процесса электрохимического получения карбонатов на основе экспериментальных исследований. / Наукові праці ДонДТУ, вип. 3. — Д.: ДонДТУ, 1999. — С. 307–313.
2. Фролов В.А. Математические модели и методы оптимального конструирования ЭВА и РЭА. — Харьков: Вища школа, 1985. — 130 с.
3. Чичикало Н.І., Кіктев М.О. Математична постановка задачі керування технологічним процесом електрохімічного одержання вуглекислих солей. / Наукові праці ДонДТУ, вип. 20. — Д.: ДонДТУ, 2001. — С. 114–121.
4. Патент США №3652229 от 28.03.72 по кл. 23-260.

Сдано в редакцию:

Рекомендовано к печати: д.т.н., проф. Зори А.А.