

УДК 519.854

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОКРЕСТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕЧИ ОБЖИГА КЛИНКЕРА

© А.М. Шмырин, И.А. Седых, А.П. Щербаков,
А.Г. Ярцев, Е.С. Аникеев

Ключевые слова: билинейная окрестностная модель; параметрическая идентификация.

Рассматривается билинейная окрестностная модель печи обжига клинкера, представлен переход модели к параметрическому виду.

ВВЕДЕНИЕ

Производство цемента состоит из нескольких этапов, ключевым из которых является обжиг клинкера во вращающихся печах [1]. В работе рассматривается вопрос моделирования печи обжига как сложного распределенного по зонам процесса.

Исходя из технологического разбиения процесса на стадии обжига в зависимости от температуры, рассмотрена дискретная распределенная модель. Для данных моделей существуют обобщающие окрестностные системы, методы и алгоритмы идентификации которых хорошо известны. Ставится задача моделирования процессов обжига клинкера окрестностными системами.

ОКРЕСТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕЧЕЙ ОБЖИГА КЛИНКЕРА

Печь условно можно разделить на четыре зоны, которые были приняты в качестве узлов билинейной окрестностной модели. Связь между узлами представлена в виде графа на рис. 1, где 1 – зона подогрева сырья; 2 – зона декарбонизации; 3 – зона появления клинкера; 4 – зона охлаждения.

Билинейная окрестностная модель для 4-х узлов имеет вид [2]:

$$\begin{cases} w_x[1,1] \cdot x[1] + w_x[1,2] \cdot x[2] + w_v[1,1] \cdot v[1] + \\ + w_{xv}[1,1,1] \cdot x[1] \cdot v[1] + w_{xv}[1,2,1] \cdot x[2] \cdot v[1] = 0; \\ w_x[2,1] \cdot x[1] + w_x[2,2] \cdot x[2] + w_x[2,3] \cdot x[3] + w_v[2,2] \cdot v[2] + \\ + w_{xv}[2,1,2] \cdot x[1] \cdot v[2] + w_{xv}[2,2,2] \cdot x[2] \cdot v[2] + \\ + w_{xv}[2,3,2] \cdot x[3] \cdot v[2] = 0; \\ w_x[3,2] \cdot x[2] + w_x[3,3] \cdot x[3] + w_x[3,4] \cdot x[4] + w_v[3,3] \cdot v[3] + \\ + w_{xv}[3,2,3] \cdot x[2] \cdot v[3] + w_{xv}[3,3,3] \cdot x[3] \cdot v[3] + \\ + w_{xv}[3,4,3] \cdot x[4] \cdot v[3] = 0; \\ w_x[4,3] \cdot x[3] + w_x[4,4] \cdot x[4] + w_v[4,4] \cdot v[4] + \\ + w_{xv}[4,3,4] \cdot x[3] \cdot v[4] + w_{xv}[4,4,4] \cdot x[4] \cdot v[4] = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для печи обжига были выделены существенные компоненты управления и состояния, представленные в табл. 1.

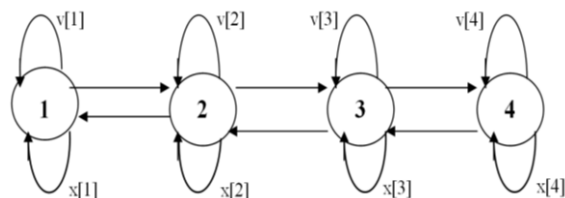


Рис. 1. Граф зон вращающейся печи

Зададим значения компонент состояния и управления и проведем идентификацию билинейной окрестностной модели (1) по разработанным ранее алгоритмам [2].

Будем считать, что для зон одной печи скорость вращения одинакова: $v[1] = v[2] = v[3] = v[4]$. Значения состояния и управления, в соответствии с технологическими параметрами печей обжига клинкера, равны:

$x[1] = 830 \text{ }^\circ\text{C}$; $x[2] = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$; $x[3] = 1450 \text{ }^\circ\text{C}$; $x[4] = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$; $v[1] = v[2] = v[3] = v[4] = 1,515 \text{ об./мин.}$

В связи с разным порядком входных данных произведем их нормализацию по следующей формуле:

$$x' = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}, \quad (2)$$

Таблица 1

Компоненты состояния и управления печи
обжига клинкера

$v[1]$	Скорость вращения печи, об./мин.
$v[2]$	Скорость вращения печи, об./мин.
$v[3]$	Скорость вращения печи, об./мин.
$v[4]$	Скорость вращения печи, об./мин.
$x[1]$	Температура печи в зоне подогрева, $^\circ\text{C}$
$x[2]$	Температура печи в зоне декарбонизации, $^\circ\text{C}$
$x[3]$	Температура печи в зоне появления клинкера, $^\circ\text{C}$
$x[4]$	Температура печи в зоне охлаждения, $^\circ\text{C}$

где x – нормализуемое значение; $\bar{x}$ – среднее арифметическое; σ – среднеквадратическое отклонение значений.

После нормализации получаем:

$$x[1] = -1,3175; x[2] = -0,09086; \\ x[3] = 1,49922; x[4] = -0,09086.$$

В результате идентификации билинейной окрестностной модели (1) были получены следующие значения параметров:

$$w_x[1,1] = 0,43005; w_x[1,2] = 0,3006774; \\ w_x[2,1] = 0,24556; w_x[2,2] = 0,009139; \\ w_x[2,3] = -0,150811; w_x[3,2] = 0,095411; \\ w_x[3,3] = -1,574269; w_x[3,4] = 0,095411; \\ w_x[4,3] = -0,294312; w_x[4,4] = 0,017831; \\ w_{xv}[1,1,1] = 0,43005; w_{xv}[1,2,1] = 0,455526; \\ w_{xv}[2,1,2] = 0,200795; w_{xv}[2,2,2] = 0,32544; \\ w_{xv}[2,3,2] = -0,228487; w_{xv}[3,2,3] = 0,144555; \\ w_{xv}[3,3,3] = 0,39726; w_{xv}[3,4,3] = 0,144555; \\ w_{xv}[4,3,4] = -0,445886; w_{xv}[4,4,4] = 0,43137.$$

Представим, что переменные $v[1]$, $x[1]$ и $x[4]$ постоянны, а $x[2]$ и $x[3]$ изменяются. Тогда, сложив уравнения системы (1), получим:

$$1,80739 \cdot x[2] - 2,43921 \cdot x[3] + 1,23127 = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) представим в виде графика (рис. 2).

Допустимые значения переменной $x[2]$ лежат в пределах от 830 до 1100 °С, переменной $x[3]$ – в пределах от 1100 до 1450 °С. Путем отбора определили, что допустимые решения изменяются от 1100 до 1216,29 для $x[3]$ и от 943,06 до 1100 для $x[2]$. Эти значения есть зона возможного управления переменными.

Для учета всех переменных управления и состояния и построения графика отклонений системы выразим все переменные управления v и состояния x через независимые параметрические переменные U и P .

Представим окрестностные переменные x и v через параметрические переменные U и P на примере $x[1]$. Допустимые значения переменной $x[1]$ лежат в пределах от 100 до 830 °С. В соответствии с методикой [3] примем, что значение U и значение P изменяются от $U_1 = P_1 = \text{const}$ до $U_2 = P_2 = \text{const}$. Сопоставим эти значения (табл. 2).

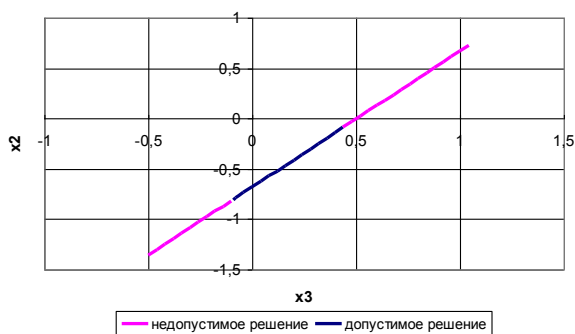


Рис. 2. Решение уравнения (3) с указанием зон недопустимых и допустимых решений

Таблица 2

Квадратичная зависимость нормализованных значений $x[1]$ от значений U и P

U	P	$x[1]$	$x[1]$ нормализ.
-1000	-1000	100	-4,633962401
-1000	-500	102,4333333	-4,622907524
-1000	0	107,3	-4,600797768
-1000	500	114,6	-4,567633136
-1000	1000	124,3333333	-4,523413625
-500	-1000	136,5	-4,468139237
-500	-500	151,1	-4,401809971
-500	0	168,1333333	-4,324425828
-500	500	187,6	-4,235986807
-500	1000	209,5	-4,136492908
0	-1000	233,8333333	-4,025944132
0	-500	260,6	-3,904340478
0	0	289,8	-3,771681947
0	500	321,4333333	-3,627968538
0	1000	355,5	-3,473200251
500	-1000	392	-3,307377086
500	-500	430,9333333	-3,130499044
500	0	472,3	-2,942566125
500	500	516,1	-2,743578328
500	1000	562,3333333	-2,533535653
1000	-1000	611	-2,3124381
1000	-500	662,1	-2,08028567
1000	0	715,6333333	-1,837078362
1000	500	771,6	-1,582816177
1000	1000	830	-1,317499114

Далее найдем квадратичную зависимость нормализованных значений $x[1]$ (4 столбец табл. 2) от значений U и P (1 и 2 столбцы). Аналогичные действия проведем и для остальных переменных окрестностной модели. В результате получаем следующие зависимости:

$$v[1] = 1,4598 + 9,5833 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1,19167 \cdot 10^{-5} \cdot P + \\ + 3,8333 \cdot 10^{-8} \cdot U^2 + 1,5333 \cdot 10^{-8} \cdot U \cdot P + 1,5333 \cdot 10^{-9} \cdot P^2; \\ x[1] = -3,7717 + 0,0014 \cdot U + 0,0003 \cdot P + \\ + 5,5274 \cdot 10^{-7} \cdot U^2 + 2,211 \cdot 10^{-7} \cdot U \cdot P + 2,211 \cdot 10^{-8} \cdot P^2; \\ x[2] = -0,9986 + 0,0005 \cdot U + 0,0001 \cdot P + \\ + 2,0444 \cdot 10^{-7} \cdot U^2 + 8,1776 \cdot 10^{-8} \cdot U \cdot P + 8,1776 \cdot 10^{-9} \cdot P^2; \\ x[3] = 0,3226 + 0,0007 \cdot U + 0,0001 \cdot P + \\ + 2,66501 \cdot 10^{-7} \cdot U^2 + 1,0601 \cdot 10^{-7} \cdot U \cdot P + 1,0601 \cdot 10^{-8} \cdot P^2; \\ x[4] = 1,0858 - 0,0007 \cdot U - 0,0001 \cdot P + \\ - 2,6501 \cdot 10^{-7} \cdot U^2 - 1,0601 \cdot 10^{-7} \cdot U \cdot P - 1,0601 \cdot 10^{-8} \cdot P^2.$$

Складывая уравнения (1), получаем общее параметрическое уравнение системы:

$$a_1 + a_2 \cdot U + a_3 \cdot P + a_4 \cdot U^2 + a_5 \cdot U \cdot P + a_6 \cdot P^2 + \\ + a_7 \cdot U^3 + a_8 \cdot U^2 \cdot P + a_9 \cdot U \cdot P^2 + a_{10} \cdot P^3 + \\ + a_{11} \cdot U^4 + a_{12} \cdot U^3 \cdot P + a_{13} \cdot U^2 \cdot P^2 + a_{14} \cdot U \cdot P^3 + \\ + a_{15} \cdot P^4 = 0. \quad (4)$$

Таблица 3

Часть решений уравнения (5)

U	P	$v[1]$	$x[1]$	$x[2]$	$x[3]$	$x[4]$
-200	4613,8	1,54909	596,3898	1003,246	1292,222	1257,786
	-22347	1,848083	1405,262	1367,445	1940,215	609,7938
-100	4280,4	1,554172	611,1852	1009,131	1303,166	1246,842
	-22988	1,855506	1425,888	1376,228	1956,923	593,0857
-50	4112,8	1,556717	618,5909	1012,078	1308,651	1241,358
	-23307,9	1,859208	1436,176	1380,609	1965,259	584,7496
0	3944,6	1,559264	626,0001	1015,028	1314,143	1235,866
	-23627,2	1,862894	1446,413	1384,969	1973,565	576,4437
50	3775,9	1,561816	633,4217	1017,984	1319,646	1230,363
	-23946,2	1,866578	1456,648	1389,328	1981,867	568,142
100	3606,6	1,564369	640,8441	1020,942	1325,154	1224,854
	-24264,7	1,87025	1466,846	1393,672	1990,146	559,8625
200	3266,3	1,56948	655,6961	1026,864	1336,192	1213,817
	-24900,4	1,877566	1487,162	1402,328	2006,654	543,3543

В нашем случае:

$$\begin{aligned}
 & -1,68235 + 0,000867 \cdot U + 0,00034 \cdot P + 4,165 \cdot 10^{-7} \cdot U^2 + \\
 & 1,91 \cdot 10^{-7} \cdot U \cdot P + 1,95 \cdot 10^{-8} \cdot P^2 + 5,8589 \cdot 10^{-11} \cdot U^3 + \\
 & + 3,69 \cdot 10^{-11} \cdot U^2 \cdot P + 7,75 \cdot 10^{-12} \cdot U \cdot P^2 + 5,4 \cdot 10^{-13} \cdot P^3 + \\
 & + 1,2 \cdot 10^{-14} \cdot U^4 - 9,56 \cdot 10^{-15} \cdot U^3 \cdot P + 2,87 \cdot 10^{-15} \cdot U^2 \cdot P^2 + \\
 & + 3,83 \cdot 10^{-16} \cdot U \cdot P^3 + 1,91 \cdot 10^{-17} \cdot P^4 = 0.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Решения уравнения (5) представим в виде графика. Как видно из графика (рис. 3), одному значению U соответствуют два значения P . Линией выделена траектория решений, удовлетворяющая исходным переменным x и v , т. е. значениям параметрических переменных U и P , при которых исходные окрестностные переменные принадлежат своим областям допустимых значений состояния и управления.

Соответственно, другой линией выделена траектория решений, не удовлетворяющая исходным областям допустимых значений. Выпишем некоторые решения уравнения (5) и соответствующие им значения x и v (табл. 3).

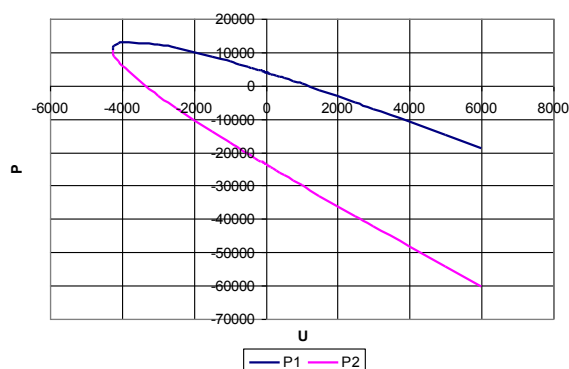


Рис. 3. Траектория решений уравнения (5)

В табл. 3 курсивом выделены значения P и окрестностных переменных, которые выходят за область допустимых значений при данном P .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана методика перехода окрестностной модели к параметрическому виду, позволяющая найти совокупность значений переменных, обеспечивающих минимальное отклонение значений левых частей уравнений системы (1) от нуля и попадание в технологические режимы. Построены графики для параметрической модели, способствующие определению сочетаний значений переменных, обеспечивающих зоны попадания в технологические режимы и их визуализацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голованова Л.В. Общая технология цемента: учебник для средних проф.-тех. училищ. М.: Стройиздат, 1984. 118 с.
2. Блюмин С.Л., Шмырин А.М., Шмырина О.А. Билинейные окрестностные системы: монография. Липецк: ЛГТУ, 2006. 131 с.
3. Щербаков А.П., Ярцев А.Г. Разработка билинейной окрестностной модели системы теплоснабжения на основе параметрических переменных // Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания: девятая школа молодых ученых Липецкой области. Липецк, 19–20 сентября 2013, Липецк, 2013.

Поступила в редакцию 12 мая 2014 г.

Shmyrin A.M., Sedykh I.A., Shcherbakov A.P., Yartsev A.G., Anikeev E.S. PARAMETRIC NEIGHBORHOOD MODELING OF CLINKER KILN

Bilinear neighborhood model of clinker kiln is considered, transition of this model to parametric mind is presented is presented.

Key words: bilinear neighborhood system; parametrical variables.

Шмырин Анатолий Михайлович, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой высшей математики, e-mail: amsh@lipetsk.ru

Shmyrin Anatoliy Mikhailovich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor, Head of High Mathematics Department, e-mail: amsh@lipetsk.ru

Седых Ирина Александровна, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru

Sedykh Irina Aleksandrovna, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of High Mathematics Department, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru

Щербаков Артем Петрович, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, аспирант, ассистент кафедры высшей математики, e-mail: 6dragon9@mail.ru

Shcherbakov Artyom Petrovich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, Post-graduate Student, Assistant of High Mathematics Mathematics, e-mail: 6dragon9@mail.ru

Ярцев Алексей Геннадьевич, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, студент физико-технологического факультета, e-mail: yartsevlekha@mail.ru

Yartsev Aleksey Gennadyevich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, Student of Physics and Technology Faculty, e-mail: yartsevlekha@mail.ru

Аникеев Евгений Сергеевич, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, студент физико-технологического факультета, e-mail: emtec1994@yandex.ru

Anikeev Evgeniy Sergeyevich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, Student of Physics and Technology Faculty, e-mail: emtec1994@yandex.ru