

УДК 519.718

## ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ

Корнеев А.М., Аль-Сабри Г.М.

ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»,  
Липецк, e-mail: ghassanalsabri@mail.ru

В работе рассмотрена проблема оптимизации сложной многостадийной технологии, приведены расчеты на примере двух переделов технологии. Приведена схема многостадийной обработки, вероятностная модель многомерной многоступенчатой технологии и многомерного качества, описан критерий оптимизации многостадийной металлургической технологии. Продемонстрированы возможности изменения количества интервалов технологических факторов для выбора оптимальной сетки технологических факторов. Представлены возможности изменения приоритетов технологических стадий в алгоритме гибкой оптимизации многостадийной технологии. На основе данных для двух переделов металлургической технологии произведен поиск оптимальной технологии прямым методом, приведены соответствующие расчеты, показано влияние приоритета передела при оптимизации на ширину диапазона оптимальных значений технологических факторов. Разработаны алгоритмы поиска оптимальных режимов сложных промышленных систем с использованием в качестве параметров оптимизации подпространств, образованных случайными величинами. Предложен метод выбора оптимальных подпространств на отдельных этапах обработки с учетом поиска оптимальных режимов на предыдущих этапах.

**Ключевые слова:** многостадийная технология, оптимизация технологического процесса, вероятностная модель технологии и качества, критерий оценки эффективности режимов функционирования сложных систем

## SEARCH OF OPTIMUM MODES OF FUNCTIONING OF COMPLEX INDUSTRIAL SYSTEMS

Korneev A.M., Al-Sabri G.M.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, e-mail: ghassanalsabri@mail.ru

The paper considers the problem of complex technology optimization, in the paper described calculations for two process stages. Also described the multi-processing scheme, the probabilistic model of the multidimensional multi-technology and the multi-dimensional quality optimization criterion. Described the possibilities of changing the number of technological factors to reach the optimal mesh for technological factors. Used some data for 8 technological factors to search the optimum technology, described these calculations, showed the effect of redistribution of priority while optimizing the width of the optimal values of technological factors range. Developed the algorithms for search the optimal regimes of complex industrial systems, which used optimization subspace formed by random variables as a parameter. Described the method for selecting optimal subspaces at different stages of processing using information about the search for optimal regimes in the previous stages.

**Keywords:** multi-stage technology, process optimization, probabilistic model of technology and quality, performance criteria for complex systems

Сложные производственные процессы характеризуются многостадийностью обработки, при которой на каждом агрегате или стадии обработки существует свой набор технологических параметров  $\bar{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in_i})$ , где  $i = 1, 2, \dots, N$  – индекс агрегата или стадии обработки;  $N$  – количество стадий;  $j = 1, 2, \dots, n_i$  – индекс технологического параметра для  $i$ -го агрегата или стадии обработки;  $n_i$  – количество технологических факторов на данном переделе. Набор выходных свойств продукции (показателей качества) можно описать как  $y = (y_1, \dots, y_m)$ . Тогда производственные процессы можно представить (рис. 1) в виде цепочки стадий обработки или агрегатов [1–10].

Каждая случайная технологическая величина изменяется в определенных границах:  $x'_i \leq x_i \leq x''_i$ . Для идентификации тех-

нологии осуществляется выбор исходных границ, образующих подпространство  $\Xi_j^*$ :

$$X^{ru} = (x_{1m_1}^{ru}, \dots, x_{km_k}^{ru}, \dots, x_{km_k}^{ru});$$

$$X^{ru} = (x_{1m_1}^{ru}, \dots, x_{km_k}^{ru}, \dots, x_{km_k}^{ru}),$$

где  $k$  – номер стадии обработки;  $j_k$  –  $j$ -я случайная технологическая величина  $k$ -й стадии обработки.

На первом этапе для каждой случайной технологической величины определяются минимальные и максимальные значения по исследуемой выборке  $x_{km_k}^{rb}, x_{km_k}^{rb}$ . Затем этот диапазон изменения входной величины разбивается на ряд составляющих алфавитов:

$$b_{km_k 1}, b_{km_k 2}, \dots, b_{km_k j_{m_k}}, \dots, b_{km_k J_{m_k}},$$

где  $k$  – номер стадии обработки;  $m_k$  – случайная величина  $k$ -й стадии обработки;  $j_{m_k} = 1, \dots, J_{m_k}$  – номера составляющих алфавита данной величины.

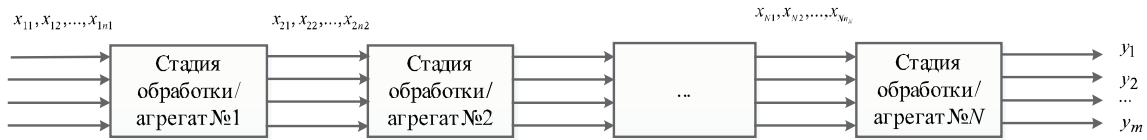


Рис. 1. Схема многостадийной обработки

Каждая выделенная составляющая алфавита

$$b_{km,j_{m_k}} = (x'_{km,j_{m_k}}, x''_{km,j_{m_k}}),$$

где  $x'_{km,j_{m_k}}$ ,  $x''_{km,j_{m_k}}$  – границы выделенной  $j_{m_k}$ -й составляющей алфавита;  $n$  – начальная установка:

$$x'_{km,j_{m_k}} = x'_{km} + (j_{m_k} - 1)(x''_{km} - x'_{km}) / J_{m_k};$$

$$x''_{km,j_{m_k}} = x'_{km} + j_{m_k} (x''_{km} - x'_{km}) / J_{m_k}.$$

Для каждой составляющей алфавита  $b_{km,j_k}$  определяется свое  $\Xi_j^*$ .

Задача дискретной оптимизации сводится к определению такого технологического подпространства  $\Xi^*$  (таких границ случайных величин

$$\Xi_j^* = \{ \xi_{\beta_1}^*, \dots, \xi_{\beta_k}^*, \dots, \xi_{\beta_K}^* \}$$

( $\xi_{\beta_k}$  – вариант сочетания алфавитов на  $k$ -м агрегате), для которого целевая функция (критерий оценки эффективности режимов функционирования сложных систем) принимает максимальное значение:

$$Q_{\Xi_j^*} = Q(\xi_{\beta_1}^*, \dots, \xi_{\beta_k}^*, \dots, \xi_{\beta_K}^*) = Q_{\max}.$$

Критерий оценки эффективности режимов функционирования сложных систем представляется в виде

$$Q_{X_j} = \frac{1}{N(X_j)} N(t_g^+ / X_j) f(X_j).$$

Определяется количество, попавших в оптимальное подпространство свойств  $\tau_\gamma^+$ ,

т.е.  $N(\tau_\gamma^+ / \Xi_j)$ , из общего количества точек в исследуемом подпространстве  $N(\Xi_j)$ .

Для того чтобы суммарный критерий учитывал число точек, удовлетворяющих технологии ( $\Xi^*$ ), его необходимо также помножить на штрафной коэффициент, который понижает критерий при малом числе попавших точек и повышает – при большом. В качестве такого «штрафа» использована функция

$$f(X_j) = 1 - \exp\left(\frac{-N(X_j)}{K^* M}\right).$$

Насыщение (значение стремится к 1,0) данной функции происходит примерно в точке  $-K^*M$ , где  $M$  – количество экспериментальных значений (объем выборки);  $K$  – доля объема выборки (например,  $K = 0,1$ ).

Данное соотношение можно продемонстрировать на графике.

Таким образом, можно выделить сочетания алфавитов технологических параметров  $\xi_{\beta_j}$ , которые позволяют получать оптимальное сочетание выходных алфавитов

$$\tau_\gamma^+ = c_{k1,j_1}^* \dots c_{kr,j_r}^* \dots c_{KR,j_{Rk}}^*.$$

Необходимо подобрать технологическую цепочку  $\Xi^*$  из набора сочетаний алфавитов технологических величин, обеспечивающую максимальную вероятность попадания в  $\tau_\gamma^+$ . Используется метод сеток, состоящий в построении сетки подмножеств, вычислении значений целевой функции в каждом из них и выборе лучшего.

Пример формирования сетки подмножеств приведен в табл. 1. Рассматриваются четыре случайных величины, алфавит каждой из которых равен двум или трем.

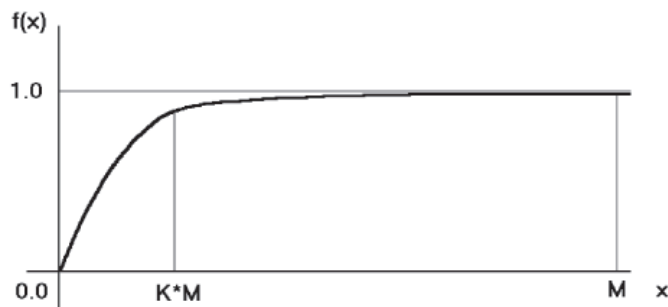


Рис. 2. График распределения штрафной функции

Таблица 1

Пример формирования сетки подмножеств для первых четырех технологических факторов

$X_1X_2X_3X_4$	$N(X_j)$	$N(t_g^+ / X_j)$	$N(t_g^+ / X_j) / N(t_g^+ / X_j), \%$	$Q_{X_j}$	$X_1X_2X_3X_4$	$N(X_j)$	$N(t_g^+ / X_j)$	$N(t_g^+ / X_j) / N(t_g^+ / X_j), \%$	$Q_{X_j}$
$K = 2$					$K = 3$				
0000	36	13	36,111	0,184	0000	0100	44	36,364	0,211
0001	2	0	0,00	0	0001	0110	6	33,333	0,037
0100	110	61	55,455	<b>0,492</b>	0100	0122	1	100	0,019
0101	42	22	52,381	0,296	...	...	...	...	...
0111	1	1	100	0,019	<b>0111</b>	1100	176	52,273	<b>0,506</b>
1000	59	22	37,288	0,257	...	...	...	...	...
1001	8	2	25,000	0,036	2200	39	18	46,154	0,248
1100	221	101	45,701	0,451	2201	7	7	100,000	0,129
1101	25	20	80,000	0,312	2202	2	1	50,000	0,019

Процедуры поиска границ очень сложно реализовать для всех факторов многостадийной технологии. Если стадий обработки много, то необходимо процедуры выбора оптимальных границ проводить по отдельным агрегатам. Если начать процедуру поиска с первого агрегата, то полученные оптимальные диапазоны изменения его факторов, как правило, оказываются уже диапазонами изменения по выборке.

В рассмотренном примере для технологических факторов  $X_1X_2X_3X_4$  лучшим является сочетание (0111) для  $K = 3$  при значении критерия оценки эффективности режимов функционирования сложных систем, равном 0,506. В данное подмножество попало 176 опытов. Как видно, при  $K = 2$  максимальное значение критерия наблюдается для 0,492 и сочетания факторов (0100), что меньше, чем при  $K = 2$ , что говорит о том, что для факторов  $X_1X_2X_3X_4$

увеличение размерности алфавита приводит к увеличению значения критерия и оптимизации технологии. В общем случае увеличение размерности алфавита не может гарантировать увеличение значения критерия, как будет видно из следующего примера, однако есть возможности выбора иных алгоритмов построения сетки (например, с использованием достаточно сложной формы подпространств сетки разбиения), которые могут позволить получить более точное решение рассматриваемой задачи оптимизации сложной многостадийной технологии.

Далее выполняется поиск оптимальных границ на следующем этапе со «сжатием» диапазонов факторов из-за уменьшения исследуемого объема выборки.

Пример формирования сетки для следующих четырех переменных приведен в табл. 2.

Таблица 2

Пример формирования сетки подмножеств для следующих четырех технологических факторов

$X_5X_6X_7X_8$	$N(X_j)$	$N(t_g^+ / X_j)$	$N(t_g^+ / X_j) / N(t_g^+ / X_j), \%$	$Q_{X_j}$	$X_5X_6X_7X_8$	$N(X_j)$	$N(t_g^+ / X_j)$	$N(t_g^+ / X_j) / N(t_g^+ / X_j), \%$	$Q_{X_j}$
$K = 2$					$K = 3$				
0000	9	8	88,889	0,355	0010	5	5	100,000	0,247
0010	2	2	100,000	0,107	0100	4	4	100,000	0,203
0100	30	20	66,667	0,545	0110	4	3	75,000	0,152
0101	2	1	50,000	0,053	...	...	...	...	...
0111	36	5	13,889	0,120	<b>1110</b>	20	14	70,000	<b>0,475</b>
1000	27	14	51,852	0,406	...	...	...	...	...
1011	1	1	99,999	0,055	2212	1	0	0	0
<b>1100</b>	36	23	63,889	<b>0,556</b>	2221	5	3	60,000	0,148
1101	1	1	100	0,055	2222	10	6	60,000	0,260

В результате проведения всех расчетов и сравнения между собой критериев оценки эффективности режимов функционирования сложных систем, рассчитанных для подпространств, полученных в результате разбиения пространства качества с различными алфавитами  $K$ , определяется оптимальное сочетание факторов, представляющее из себя оптимальную технологию производства продукции заданного качества.

Для технологических факторов  $X_5X_6X_7X_8$  при алфавите для каждого фактора, равном двум ( $K=2$ ), максимальное значение критерия 0,556 достигается для сочетания (1100), при  $K=3$  значение критерия максимально (0,475) для (1110). Как видно, в данном случае применение алфавита, равного двум, дало лучшие результаты оптимизации технологии для факторов  $X_5X_6X_7X_8$ , и увеличение размерности алфавита не привело к увеличению значения критерия, т.е. оптимальная технология определяется сочетанием (1100) для  $K=2$ .

Итоговая оптимальная технология для двух переделов определяется сочетанием (01111100), где сочетание (0111) – оптимальная технология на первом переделе для факторов  $X_1X_2X_3X_4$ , достигаемое при алфавите  $K=3$ , и сочетание (1100) – оптимальная технология для факторов  $X_5X_6X_7X_8$  на втором переделе, достигаемое при  $K=2$ .

Поскольку оптимизация на втором этапе производилась со «сжатием» диапазонов факторов из-за уменьшения исследуемого объема выборки, можно сказать, что на втором этапе производилась условная оптимизация, в качестве дополнительного условия выступало условие реализации на первом переделе оптимальной технологии, т.е. сочетания (0111) технологических факторов  $X_1X_2X_3X_4$ . Это условие иллюстрирует статистическую связь переделов в методах оптимизации многоступенчатой технологии.

Таким образом, в настоящей работе:

1) разработаны алгоритмы поиска оптимальных режимов сложных про-

мышленных систем с использованием в качестве параметров оптимизации подпространств, образованных случайными величинами;

2) предложен метод выбора оптимальных подпространств на отдельных этапах обработки с учетом поиска оптимальных режимов на предыдущих этапах.

### Список литературы

1. Блюмин С.Л., Сараев П.В. Комбинации норм невязок и методы параметрической идентификации моделей // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 2612–2618.
2. Корнеев А.М. Методы идентификации сквозной технологии производства металлопродукции: монография / Липецкий государственный педагогический университет. – Липецк: ЛГПУ, 2009. – 286 с.
3. Корнеев А.М., Блюмин С.Л., Сметанникова Т.А. Численные методы поисковой оптимизации дискретных клеточно-иерархических систем // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2013. – № 3. – С. 21–26.
4. Корнеев А.М., Сметанникова Т.А., Аль-Сабри Г.М., Наги А.М. Стратегия поиска оптимальных технологических режимов в дискретных клеточно-иерархических системах // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–2; URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=22892>.
5. Кузнецов Л.А., Погодаев А.К., Корнеев А.М. Статистические модели в задачах оптимизации сквозной технологии производства авто листовой стали // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 3. – С. 34–36.
6. Кузнецов Л.А., Белянский А.Д., Корнеев А.М., Погодаев А.К. Система автоматизированного проектирования сквозной технологии производства листового проката // Сталь. – 1994. – № 8. – С. 51–54.
7. Кузнецов Л.А., Корнеев А.М. Автоматизированная система выбора оптимальной технологии производства проката // Известия вузов. Черная металлургия. – 1994. – № 5. – С. 45–48.
8. Сараев П.В., Галкин А.В., Сокольских М.Ю. Разработка и исследование распределенной системы параметрической идентификации математических моделей // Вести вузов Черноземья. – 2014. – № 2. – С. 26–30.
9. Шмырин А.М., Седых И.А., Щербаков А.П., Ярцев А.Г. Исследование окрестностной модели печи обжига клинкера с учетом допустимых значений параметров // Вестник ЛГТУ. – 2015. – № 2(24). – С. 11–14.
10. Korneev A.M., Al-Sabry G.M., Al-Saeedi F.A. The optimal strategy for adapting technological regimes in discrete systems // Proceedings of the 4rd International Academic Conference «Applied and Fundamental Studies». – Vol. I. – St. Louis, Missouri, USA, 2013. – P. 264–267.