

УДК 519.71

О.В. ШЕСТОПАЛ

*Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Рыбница, Приднестровье, Молдова*

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ СТАЛИ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В данной статье описывается последовательность приведения исходных показателей технологического процесса выплавки стали к виду, пригодному для построения математической модели с целью прогнозирования, внедрения новых видов стали и создание основы для разработки системы автоматизированного управления качеством продукции. В процессе преобразования выделяются следующие этапы: сбор и анализ исходных данных, построение таблицы слабокоррелированных параметров, сокращение факторного пространства с помощью корреляционных плеяд и метода весовых коэффициентов. Полученные результаты позволяют оптимизировать процесс построения модели многофакторного процесса.*

**Ключевые слова:** *плавка стали, исходная таблица данных, корреляционная матрица, корреляционные плеяды, матрица факторов, весовые коэффициенты.*

### Введение

Практика показала, что список параметров, имеющих место при исследовании сложного объекта современного производства, варьируется от нескольких десятков до нескольких сот наименований, причем степень воздействия каждого из факторов в начальный момент не ясна. Приступать к работе по непосредственному определению модели в этих условиях нельзя – объем требуемой информации может оказаться слишком велик, причем большая часть работы по сбору этой информации будет проделана впустую из-за того, что степень влияния на параметры оптимизации большинства факторов из первоначального списка окажется пренебрежимо малой. Поэтому необходимым этапом при определении модели сложного объекта является работа по сокращению размерности факторного пространства. Большинство промышленных производств являются групповыми иерархическими процессами массового и крупносерийного производства, характеризующимися сотнями факторов. С целью исследования системных связей и закономерностей функционирования таких сложных объектов обычно выбираются несколько информативных параметров и осуществляется их выборочный контроль.

Дополнительной трудностью, характерной для металлургического производства, является формирование выходного показателя качества, который представляет собой комплекс химических и механических параметров. Для получения выходного показателя требуется выполнить ряд операций, связанных с анализом, отсевом и выбором из всей сово-

купности только тех параметров, которые будут использованы в построении математической модели.

В статье [1] была предложена схема (алгоритм расчета) для получения статистической модели технологического процесса плавки стали, которая была опробована на материалах Молдавского металлургического завода (г. Рыбница, Приднестровье, Молдова).

Для дальнейшего исследования были выбраны показатели выплавки низкоуглеродистой марки стали.

### 1. Анализ исходных данных

Результаты пассивного эксперимента представлены в многомерной таблице, столбцы которой представляют собой набор факторов, влияющих на целевую функцию, а также сама целевая функция (или параметр оптимизации); строки являются числовыми измерениями этих факторов в ходе технологического процесса и каждая строка принадлежит одному объекту измерения. Такая таблица является результатом длительных контрольных измерений выходного показателя качества однородной продукции и сопутствующих ему факторов, например, режимов работы оборудования или параметров самого изделия.

Таблица пассивного эксперимента представляет собой основу для решения достаточно сложной задачи, по извлечению из нее скрытой информации, конечная цель которой получение модели исследуемого объекта в виде уравнения многомерной регрессии.

Таблица 1

Фрагмент таблицы исходных данных

| № пла<br>вки | C, %                                  | Mn, %  | Si, %  | Al, %  | S, %   | ... | $\sigma_b$<br>мин,<br>Н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_b$<br>макс,<br>Н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_T$<br>мин,<br>Н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_T$<br>макс,<br>Н/мм <sup>2</sup> | $\delta$<br>мин,<br>% | $\Psi$<br>макс,<br>% |
|--------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-----|---|--|---|--|-----------------------|----------------------|
|              | химический состав в готовой заготовке |        |        |        |        |     | показатели работы СПЦ                   |  |   |  |                       |                      |
| 1            | 0,055                                 | 0,3    | 0,0892 | 0,0028 | 0,0096 |     | 373                                     | 397                                      | 246                                     | 283                                      | 77                    | 79                   |
| 2            | 0,0552                                | 0,3003 | 0,0799 | 0,0031 | 0,0097 |     | 391                                     | 396                                      | 268                                     | 281                                      | 76                    | 78                   |
| 3            | 0,0559                                | 0,3    | 0,0914 | 0,0038 | 0,0109 |     | 383                                     | 392                                      | 263                                     | 285                                      | 77                    | 79                   |
| 4            | 0,0578                                | 0,3057 | 0,0761 | 0,0031 | 0,0119 |     | 376                                     | 387                                      | 259                                     | 272                                      | 74                    | 77                   |
| 5            | 0,0551                                | 0,3096 | 0,0831 | 0,003  | 0,0124 |     | 392                                     | 395                                      | 274                                     | 278                                      | 78                    | 79                   |
| 6            | 0,0617                                | 0,3153 | 0,0832 | 0,0034 | 0,0119 |     | 382                                     | 397                                      | 259                                     | 285                                      | 78                    | 79                   |
| 7            | 0,0625                                | 0,312  | 0,0897 | 0,0032 | 0,013  |     | 394                                     | 408                                      | 274                                     | 293                                      | 74                    | 78                   |
| 8            | 0,0577                                | 0,3093 | 0,0766 | 0,0033 | 0,008  |     | 377                                     | 385                                      | 256                                     | 269                                      | 77                    | 78                   |
| 9            | 0,0657                                | 0,3334 | 0,075  | 0,0037 | 0,0061 |     | 386                                     | 395                                      | 266                                     | 284                                      | 76                    | 77                   |
| 10           | 0,0699                                | 0,35   | 0,0722 | 0,0032 | 0,0091 |     | 387                                     | 399                                      | 232                                     | 234                                      | 66                    | 72                   |

Таблица исходных данных (табл.1) представляет собой матрицу размером  $N \times M$  (5305\*115), где  $M$  – факторы (столбцы), отобранные для исследования параметры какого-либо процесса, а  $N$  – строки, являющиеся данными измерений, причем каждая строка принадлежит одному объекту исследования. Такая матрица может содержать значительный объем информации, извлечь которую является сложной статистической задачей.

Все параметры были разделены на две группы: входные и выходные, и для каждой группы схема обработки выполнялась по отдельности. В статье освещен материал по 18 выходным параметрам. В результате отсева осталось 1495 плавок, пригодных для дальнейшей обработки.

Первоначальная таблица исходных данных содержит довольно большой список измеряемых параметров. Для построения модели необходимо этот список параметров значительно сократить, так как с ростом числа факторов трудоемкость моделирования растет как степенная функция, и уравнение модели, имеющее очень большое количество членов, непригодно для эффективного и гибкого управления сложным объектом. Отсев факторов можно производить по двум критериям: факторы незначимые, то есть не влияющие на целевую функцию и внесенные в первоначальный список ошибочно, и факторы, коррелированные между собой, то есть имеющие сильную внутреннюю связь. Для моделирования достаточно выбрать один из этих факторов, а другой можно отбросить как не дающий дополнительной информации в будущую модель. Не существует никаких формальных критериев, позволяющих опре-

делить, какой из факторов должен быть отброшен, а какой оставлен. Выбор остается за исследователем, который может положиться на свою интуицию, опыт и знание структуры объекта.

## 2. Построение корреляционной таблицы

Для понижения размерности факторного пространства путем сокращения сильно коррелированных факторов предлагается использовать метод корреляционных плеяд, получаемых на основе анализа корреляционной матрицы (табл. 2).

Корреляционная матрица представляет собой симметричную относительно главной диагонали квадратную матрицу размером  $M \times M$ , где  $M$  – число исследуемых факторов. Главная диагональ матрицы заполнена единицами (или нулями) для удобства дальнейшего анализа. Недиagonальные элементы представляют собой меру тесноты связи между любой парой факторов.

В качестве мер тесноты связи использовались:

- коэффициент корреляции или корреляционное отношение (если сравнивались количественные величины при альтернативной группировке);
- коэффициент ассоциации или тетрафорический коэффициент (если сравнивались качественные величины дихотомического признака);
- таблица контингентности (если сравнивались качественные признаки, принимающие более двух вариантов значений);
- модифицированный индекс Фехнера (используется в случае подозрения не соблюдения нормального закона распределения);

Таблица 2

Фрагмент таблицы корреляции

|    | X1     | X2     | X3     | X4     | X5     | X6     | X7     | X8     |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X1 | 1      | 0,9695 | 0,9298 | 0,1945 | 0,8585 | 0,9206 | 0,8644 | 0,6521 |
| X2 | 0,9695 | 1      | 0,969  | 0,2    | 0,8819 | 0,9478 | 0,8927 | 0,7244 |
| X3 | 0,9298 | 0,969  | 1      | 0,1907 | 0,8411 | 0,9325 | 0,8842 | 0,746  |
| X4 | 0,1945 | 0,2    | 0,1907 | 1      | 0,1734 | 0,188  | 0,1784 | 0,1313 |
| X5 | 0,8585 | 0,8819 | 0,8411 | 0,1734 | 1      | 0,8727 | 0,8304 | 0,6858 |
| X6 | 0,9206 | 0,9478 | 0,9325 | 0,188  | 0,8727 | 1      | 0,8824 | 0,7407 |
| X7 | 0,8644 | 0,8927 | 0,8842 | 0,1784 | 0,8304 | 0,8824 | 1      | 0,7694 |
| X8 | 0,6521 | 0,7244 | 0,746  | 0,1313 | 0,6858 | 0,7407 | 0,7694 | 1      |

– коэффициенты точечной и точечно-бисериальной корреляции (если сравниваются количественные и качественные величины).

Другими словами, для заполнения корреляционной матрицы необходимо найти меры тесноты связи между всеми парами факторов по принципу «каждый с каждым». Затем заполняют верхний треугольник матрицы и зеркально отображают его на нижний треугольник.

Непосредственный анализ корреляционной матрицы представляет значительную трудность, так как корреляционные связи между факторами образуют деревья, цепи, циклы и другие фигуры графов. Для выделения главных зависимостей следует прибегнуть к одному из методов анализа таких матриц, простейшим из которых является метод корреляционных плеяд [2, 3].

### 3. Сокращение факторного пространства

Для анализа корреляционной матрицы строится граф. Его построение начинают с отыскания в матрице наибольшего по модулю численного значения используемой меры тесноты связи  $|r_{ij}| = \max$ . На графе изображаются две вершины с обозначениями факторов  $x_i$  и  $x_j$ , соединенных линией-ребром, длина которого обратно пропорциональна силе связи. В матрице вычеркиваются два столбца с соответствующими номерами  $i$  и  $j$ . Далее в строках с номерами  $i$  и  $j$  ищется следующий наибольший по модулю элемент, например,  $|r_{il}|$ , на графе дорисовывается новый узел и вычеркивается столбец с номером  $l$ . В строках  $i$ ,  $j$  и  $l$  выбирается следующий максимальный по модулю элемент. Процедура рисования графа продолжается до тех пор, пока все столбцы не будут вычеркнуты, а все факторы отображены на графе.

Внутри каждой плеяды связь между факторами признается тесной, а между плеядами – слабой. Это означает, что если от каждой плеяды выбрать по одному представителю, то новое количество факторов,

сокращенное до количества плеяд, будет нести практически всю информацию, что и раньше. Причем факторы в новой таблице исходных данных будут слабо коррелированные между собой, что является одним из главных требований всех факторных планов проведения экспериментов.

Выбрав пороговое значение коэффициента корреляции – 0,55, были выделены 15 плеяд.

В нашем исследовании был разработан программный продукт, позволяющий вычерчивать не весь граф, а сразу выделять плеяды и отображать их в графическом и описательном виде (рис. 1).

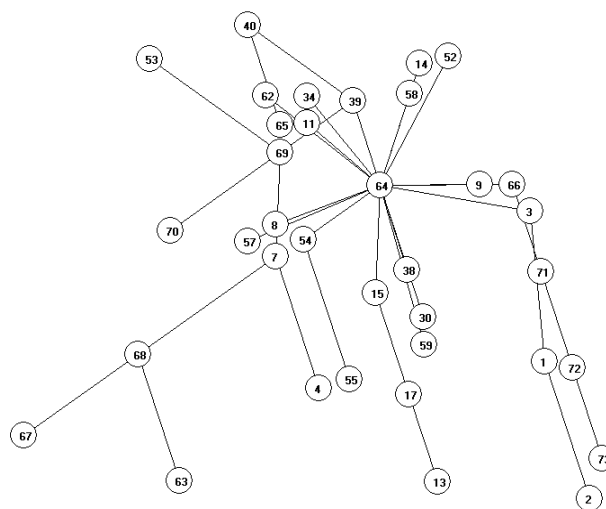


Рис. 1. Пример одной из плеяд, получившейся в результате эксперимента

Задача выбора одного фактора из плеяды – неформальная задача и решать ее надо всеми возможными методами с учетом мнения специалистов (в нашем случае, технологов процесса выплавки стали). Лучше всего результат достигается с помощью экспертных методов.

Метод опроса в значительной степени определяется особенностями исследуемого процесса и числом экспертов, располагающих необходимой информацией, а также временем и средствами, имеющимися в распоряжении исследовательской группы. Метод весовых коэффициентов важности

является в нашем исследовании оптимальным. Так в выявленных плеядах содержится много различных представителей, что в свою очередь представляет трудность для выявления одного наиболее важного. Он обладает меньшей неопределенностью и более удобен для эксперта с психологической точки зрения.

Десяти экспертам были предложены таблицы-анкеты (рис.2), представляющие собой квадратную матрицу, столбцы и строки которой соответствуют каждому из  $n$  объектов. В клетки с номерами для  $i$ -й

строки и для  $j$ -го столбца заносятся 1, если эксперт предпочитает объект  $i$  объекту  $j$  и 0, если эксперт предпочитает объект  $j$  объекту  $i$ .

В конечном виде факторы были ранжированы (1) по величине весовых коэффициентов важности  $k$ -го порядка (табл. 3, рис. 3):

$$b_i(k) = p_i(k) / \sum_{i=1}^n p_i(k) \quad (1)$$

| Факторы влияния в готовой заготовке |  | Факторы $i$ | Факторы $j$ |   |    |    |    |    |    |    |    | $P_i(1)$ | $P_i(2)$ |
|-------------------------------------|--|-------------|-------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----------|----------|
|                                     |  |             | 1           | 8 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |          |          |
| 1                                   | С, %                                     | 1           | 1           | 2 | 2  | 2  | 2  | 0  | 0  | 1  | 1  | 11       | 110      |
| 8                                   | В, %                                     | 8           | 0           | 1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1        | 1        |
| 13                                  | профиль катанки                          | 13          | 0           | 2 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 3        | 48       |
| 14                                  | предел прочности мин, Н/мм <sup>2</sup>  | 14          | 0           | 2 | 2  | 1  | 0  | 1  | 2  | 2  | 2  | 12       | 110      |
| 15                                  | предел прочности макс, Н/мм <sup>2</sup> | 15          | 0           | 2 | 2  | 2  | 1  | 0  | 2  | 2  | 2  | 13       | 110      |
| 16                                  | предел текучести мин, Н/мм <sup>2</sup>  | 16          | 2           | 2 | 2  | 1  | 2  | 1  | 0  | 2  | 2  | 14       | 20       |
| 17                                  | предел текучести макс, Н/мм <sup>2</sup> | 17          | 2           | 2 | 2  | 0  | 0  | 2  | 1  | 2  | 2  | 13       | 20       |
| 18                                  | относительное сужение мин, %             | 18          | 1           | 2 | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 6        | 14       |
| 19                                  | относительное сужение макс, %            | 19          | 1           | 2 | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 1  | 8        | 28       |

Рис. 2. Опросный лист экспертов

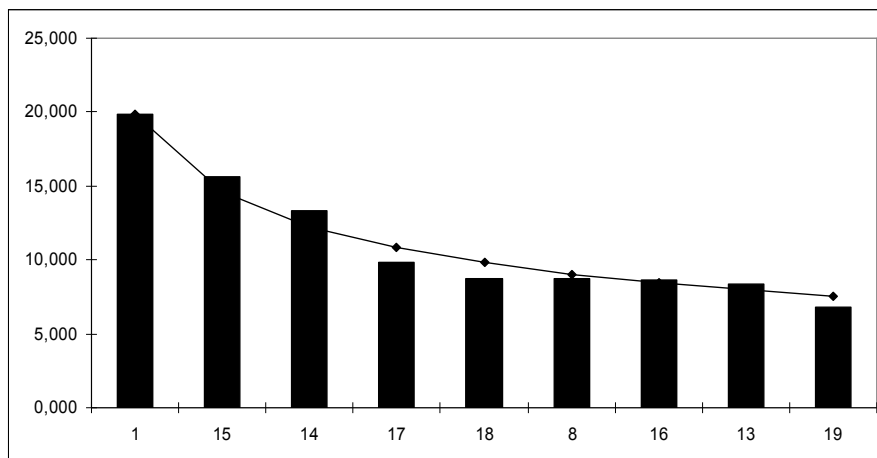


Рис. 3. Гистограмма рангов факторов

Таблица 3  
Итоговая таблица ранжирования факторов

| $X_i$ | $b_{i\_cp}(2)$ | $n(r)$ | Ранг |
|-------|----------------|--------|------|
| 1     | 0,199          | 19,869 | 1    |
| 15    | 0,156          | 15,644 | 2    |
| 14    | 0,134          | 13,371 | 3    |
| 17    | 0,098          | 9,825  | 4    |
| 18    | 0,088          | 8,772  | 5    |
| 8     | 0,087          | 8,699  | 6    |
| 16    | 0,086          | 8,646  | 7    |
| 13    | 0,084          | 8,365  | 8    |
| 19    | 0,068          | 6,808  | 9    |

Данный коэффициент не должен быть меньше 0,5, иначе мнение такого эксперта не следует учитывать для дальнейшего расчета. В нашем случае данный коэффициент превысил допустимое значение у двух экспертов, поэтому мнениями этих экспертов пришлось проигнорировать.

Полученные расчетные значения критерия Кохрена  $G$  ( $G=0,251 < G_{табл}(5\%;5;9)$ ), коэффициента конкордации ( $W=0,175$ ) и критерия Пирсона ( $\chi^2=9,810 < \chi_{таблич}(5\%; 8)=15,51$ ) при сравнении с табличными значениями подтвердили гипотезу о согласованности и непротиворечивости мнений ос-

тальных экспертов. Полученное ранжирование было принято за окончательное решение.

Данные методы позволили выделить по одному представителю из каждой плеяды, затем была выполнена повторная процедура корреляции и процедура выбора одного представителя из вновь сформированных 10 плеяд.

### Заключение

В результате было получено конечное количество слабо коррелированных параметров (C; Mn; Si; Al; P; S; N; Ca и т.д.), которые будут использованы для построения обобщенного отклика с помощью обобщенной функции желательности Харрингтона-Менчера. Это в дальнейшем позволит получить математическую модель с целью прогнозирования, внедрения новых видов стали и создание основы для

разработки системы автоматизированного управления качеством продукции.

### Литература

1. Долгов, Ю.А. *Схема математического моделирования технологического процесса плавки стали. [Текст] / Ю.А. Долгов, Л.Я. Козак, О.В. Шестопал // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №7. – С. 157-160.*

2. Долгов, Ю.А. *Статистическое моделирование [Текст]: учебник для вузов / Ю.А. Долгов. – 2-е изд., доп. – Тирасполь: Приднестр. ун-т, 2011. – 349 с.*

3. Дружинин, Г.В. *Методы оценки и прогнозирования качества [Текст] / Г.В. Дружинин. – М.: Радио и связь, – 1982. – 160 с.*

Поступила в редакцию 2.03.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.А. Скобцов, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина.

### ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИХІДНИХ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ СТАЛІ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО МОДЕЛЮВАННЯ

*О.В. Шестопал*

У статті описується послідовність приведення вихідних показників технологічного процесу виплавки сталі до вигляду, придатного для побудови математичної моделі з метою прогнозування, впровадження нових видів плавок сталі і створення основи для розробки системи автоматизованого управління якістю продукції. В процесі перетворення виділяються наступні етапи: збір та аналіз вихідних даних, побудова таблиці слабокорельованих параметрів, скорочення факторного простору за допомогою кореляційних плеяд та методу вагових коефіцієнтів. Отримані результати дозволяють оптимізувати процес побудови моделі багатфакторного процесу.

**Ключові слова:** плавка сталі, вихідна таблиця даних, кореляційна матриця, кореляційні плеяди, матриця факторів, вагові коефіцієнти.

### THE TRANSFORMATION PROCESS OF BASELINE STEEL PRODUCTION FOR SUBSEQUENT MODELING

*O.V. Shestopal*

This article describes the sequence of reduction of the baseline process of steel production to a suitable form for the constructing of a mathematical model to predict, introduce new types of steel, and provide the basis for the development of automated quality control. During the conversion process the following stages are singled out: collection and analysis of baseline data, building of a table of weakly correlated characteristics, reduction of the factor space with the help of correlation pleiads and the method of weighting coefficients. The obtained results allow optimizing the process of model construction of multifactorial process.

**Keywords:** steel melting, the source of data table, the correlation matrix, correlation pleiads, the matrix of factors, weighty coefficients.

**Шестопал Оксана Викторовна** – ст. преподаватель Рыбницкого филиала ПГУ им. Т.Г. Шевченко, Рыбница, Приднестровье, Молдова, e-mail: mov\_73@mail.ru.