

**МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОЗВ'ЯЗАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАДАЧ**

З метою підвищення якості розв'язання технологічних задач пропонується максимально повно використовувати масиви початкової інформації шляхом її стиснення методами факторного аналізу. Наведено приклади стиснення масивів початкової інформації (отримання латентних змінних, що характеризують початкову інформацію) та доцільне використання запропонованої методики.

Вступ. Для технології приладо- та машинобудування характерне використання величезних інформаційних масивів і значної кількості їх складових елементів (параметрів). Тому при дослідженні технологічних багатопараметричних систем виникає необхідність виключити деякі з параметрів, а також деякі функції з математичної моделі, зберігши при цьому всю їх інформативність. Одним із найпоширеніших видів представлення даних про систему є багатомірна матриця, рядки якої відповідають окремим об'єктам системи (для технологічної системи це виріб, деталь, технологічний маршрут, режими обробки тощо), що описується набором конкретних значень параметрів, а стовпцями – різні набори конкретних значень параметрів цих об'єктів. На практиці розміри розглянутих матриць можуть бути досить великими. Безпосередній, візуальний аналіз таких матриць практично неможливий та і практичне їх використання в розрахунках викликає значні труднощі. Тому в математичній статистиці виникло багато підходів і методів, призначених для того, щоб стиснути вихідну інформацію до доступних для огляду розмірів, вибрати з неї найбільш істотну, відкинути всю другорядну, не значну та випадкову [1–9].

У багатьох дослідницьких роботах в технології машино- та приладобудування початкова кількість ознак, що характеризують досліджувані об'єкти, досить велика, проте ці ознаки варто обробити й осмислити. Тому дослідник, заздалегідь не уявляючи собі, які ознаки будуть найбільш корисні для моделювання, в якості опису об'єкта використовує не весь набір характеристик об'єкта, наявний у його розпорядженні. Іноді висловлюється думка, що варто складати „повний опис” об'єкта, який був би придатним для будь-якого його моделювання. Але такий „повний опис” одержати неможливо, тому що кількість властивостей будь-якого реального об'єкта нескінченна, а вибір кінцевої, але надлишкової кількості ознак приводить до необґрунтованих витрат [4], а саме: збільшення кількості ознак призведе до більших витрат машинного часу і, як наслідок, до подорожчання досліджень; ступінь представлення вибірки ознак одного і того ж обсягу обернено пропорційна розмірності простору ознак; при великій розмірності простору опису втрачається наочність подання даних, яка особливо важлива при використанні діалогових систем обробки інформації, ускладнюється також інтерпретація отриманих результатів.

Постановка задачі. Методи багатомірного статистичного аналізу, в тому числі і методи факторного аналізу, дозволяють значно зменшити розмірність початкових масивів інформації без зниження їх інформативності [1–9]. Але ці методи не використовуються при розв'язанні різноманітних задач технологічної підготовки виробництва, що в значній мірі знижує якість та точність отриманих результатів. Тому поставлена задача реалізувати методику стиснення масивів початкової інформації методами факторного аналізу шляхом зменшення початкової кількості властивостей досліджуваного об'єкта від n до l факторів, де $l < n$. Це дозволяє розв'язати три основні задачі: підвищення ефективності дослідження за рахунок більш раціонального використання можливостей машинної обробки; підвищення статистичної вірогідності інформаційної вибірки даних, що представлена для моделювання; забезпечення більшої наочності й простоти інтерпретації результатів. Тут особливо важливими є випадки, коли розмір нового факторного простору $l \leq 3$, тобто можливий безпосередній візуальний аналіз простору опису.

Методологія підвищення інформативності технологічних задач. У загальному вигляді задача факторного аналізу полягає в тому, щоб виразити параметр y_j , де y_j нормоване значення j -ї властивості об'єкта x_{ij} , у вигляді схованих гіпотетичних факторів. Найпростішою моделлю для опису одного параметра може служити лінійна модель:

$$y_j = a_{j1}f_1 + a_{j2}f_2 + \dots + a_{jn}f_n, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

де кожен із параметрів лінійно залежить від n некорельованих між собою компонентів (факторів) f_1, f_2, \dots, f_n . Найважливішою властивістю методу є те, що кожен наступний компонент вносить максимально можливий внесок у сумарну дисперсію параметрів.

При визначенні кількості факторів (латентних змінних) часто застосовують правило, яке дозволяє залишати фактори з власними числами, що мають значення більше одиниці. При цьому

використовується кореляційна (нередукована) матриця факторів. Це простий спосіб визначення кількості латентних змінних добре зарекомендував себе, тому що зазвичай дає результати, які співпадають з тими, що очікує дослідник. Крім того, цей метод був ретельно перевірений на модельних штучних даних.

Використовують також критерії вибору кількості факторів, що основані на величині долі відтворюваної дисперсії. Критерії значимості «оперують» з вибірковою змінністю даних. Критерії, що засновані на власних числах, формулюються в термінах абстрактних характеристик матриці. Можливий і третій підхід – для кожного фактора оцінюється доля дисперсії, яка відтворювана цим фактором.

Факторний аналіз дозволяє одержати не тільки відображення, але і значення коефіцієнтів кореляції між параметрами і факторами.

Практична реалізація методології. На основі методики, що викладена в [1–3, 6, 8, 9] розроблено алгоритм факторного аналізу. Створений алгоритм програмно реалізовано й апробовано при обробці різноманітної технологічної інформації [10, 11].

Як приклад, що реалізує підвищення інформативності початкової інформації при дослідженні технологічного процесу токарної обробки титанового сплаву ВТ3–1 твердосплавними пластинками з вольфрамових сплавів ВК3, ВК4, ВК6, та ВК8. Метою досліджень є визначення періоду стійкості різців від режимів різання та матеріалу інструмента. При цьому обробку виконували пластинками з параметрами різальної крайки $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\gamma = 15^\circ$, $r = 1$ мм та режимами різання $V = 16..45$ м/хв., $s = 0,2$ мм/об., $t = 1..4,5$ мм. Як критерій зношення інструмента вибрано знос по задній грані 0,9–1 мм. З метою підвищення точності результатів досліджень доцільно враховувати хімічний склад та фізико механічні властивості оброблюваних матеріалів. Але це призводило до збільшення кількості початкових параметрів і, в результаті, до значного підвищення вартості досліджень, витрат інструментальних і оброблюваних матеріалів та часу проведення цих експериментів. Тому для зменшення кількості початкових параметрів без втрати їх інформативності характеристики інструментальних матеріалів (вміст кобальту та вольфраму в матеріалі інструмента і його фізико-механічні властивості) стиснено методами факторного аналізу. Критерієм вибору кількості латентних змінних (факторів), які в достатній мірі характеризують початкову інформацію, вибрано величину власних значень λ кореляційної матриці параметрів вказаних матеріалів. Залишено тільки ті фактори, власні значення яких перевищували 1. Ці фактори, після ранжирування власних значень λ , відповідні дисперсії й сумарні значення дисперсії отриманих факторів (значення параметрів інформативності) наведено в таблиці 1. Таким чином, отримано два латентні фактори f_1 і f_2 , що на 85,98 % характеризують інформативність початкових даних, значення яких для кожного інструментального матеріалу наведено в таблиці 2.

Таблиця 1

Власні значення та відповідні їм дисперсії, що визначають інформативність факторів вольфрамових твердих сплавів

№ фактора	Початкові власні значення			Суми квадратів навантажень вибірки		
	всього	% дисперсії	% накопичення	всього	% дисперсії	% накопичення
1	3,677	73,534	73,534	3,677	73,534	73,534
2	1,057	21,141	94,675	0,685	13,700	85,980
3	0,250	5,000	99,675			
4	0,16	0,325	100,000			
5	3,358 E–17	6,715 E–16	100,000			

Таблиця 2

Значення факторів, що характеризують хімічний склад та фізико-механічні властивості вольфрамових твердих сплавів

№ з/п	Інструментальний матеріал	Латентні фактори	
		f_1	f_2
1	ВК3	1,36149	-0,34050
2	ВК3М	1,36149	-0,34050
3	ВК4	0,96775	-0,53012
4	ВК4В	0,96775	-0,53012
5	ВК6	0,61754	-0,48490
6	ВК6М	0,79366	-0,37340
7	ВК6ОМ	0,98314	2,93859
8	ВК6В	0,57381	-0,52734

9	ВК8	0,26732	-0,43967
10	ВК8В	0,13614	-0,56701
11	ВК8ВК	0,13614	-0,56701
12	ВК10	-0,03916	-0,35200
13	ВК10М	0,09202	-0,22465
14	ВК10ОМ	0,28271	3,02904
15	ВК10КС	-0,12662	-0,43689
16	ВК11В	-0,34667	-0,39843
17	ВК11ВК	-0,48151	-0,35088
18	ВК15	-0,82724	-0,15404
19	ВК20	-1,57038	0,02808
20	ВК20КС	-1,65783	-0,05682
21	ВК20К	-1,22056	0,36766
22	ВК25	-2,27100	0,31093

Використання визначених факторів дозволило зменшити кількість експериментів щонайменше з 128 до 16 (при використанні повного факторного експерименту). Крім того, отримано залежності, що дозволяють визначити значення факторів для будь-якого іншого інструментального матеріалу вольфрамівної групи за його властивостями та факторними навантаженнями. Ці залежності мають такий вигляд:

$$x_{li} = a_{i1} * f_{l1} + a_{i2} * f_{l2},$$

де x_{li} – нормоване значення i -ї властивості (параметра) l -го інструментального матеріалу, $i = 1, \dots, 5$, $l = 1, \dots, 22$; f_{lk} – значення k -ї латентної змінної l -го конструкційного матеріалу, $k = 1, 2$; a_{ik} – значення k -го факторного навантаження i -ї властивості, що наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Значення факторних навантажень для факторів, що характеризують вольфрамівні тверді сплави

№ з/п	Властивості матеріалу	Факторні навантаження	
		a_{i1}	a_{i2}
1	C_o	-0,989	0,086
2	W_c	0,980	-0,203
3	T_{ac}	0,175	0,747
4	σ_b	-0,812	-0,272
5	Густина	0,993	-0,067

Тоді, використовуючи отримані значення факторів, в результаті проведення експериментальних досліджень отримана залежність $T = F(V, t, \text{instr. material}) = F(V, t, f_1, f_2)$, що пов'язує стійкість T різального інструмента з режимами різання (швидкістю V та глибиною t) й параметрами титанових сплавів, що представлені латентними змінними f_1 і f_2 , яка має такий вигляд:

$$T = 4,107341 + 5,23698 V^2 - 9,27578 V - 2,22188 V f_1 + 0,30767 V f_2 - 2,808351 V t + 0,235668 f_1^2 + 1,96771 f_1 - 0,065268 f_1 f_2 + 0,595746 f_1 t + 0,004518952 f_2^2 - 0,27247637 f_2 - 0,08249541 f_2 t + 0,376497 t^2 + 2,4871 t.$$

З метою дослідження вихідних параметрів процесу різання (складових сили різання та шорсткості обробленої поверхні) вуглецевих якісних конструкційних сталей з врахуванням їх хімічного складу та фізико-механічних властивостей, виконано зниження розмірності простору початкових даних. Використання факторного аналізу дозволило представити властивості 30 найменувань конструкційних матеріалів – кількість вуглецю C , марганцю Mn , кремнію Si , хрому Cr та його фізико-механічні властивості σ_s , σ_b , δ , ζ , HB двома латентними факторами f_1 і f_2 . Значення факторних навантажень, що дозволяють вирахувати відповідні величини латентних факторів для кожного матеріалу, наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Значення факторних навантажень факторів для вуглецевих якісних конструкційних сталей

№ з/п	Вихідний параметр x_i	Факторні навантаження	
		a_{i1}	a_{i2}
1	C	0,993	-0,082
2	Mn	0,627	0,486
3	Si	0,669	0,357
4	Cr	0,612	0,320
5	σ_t	0,830	-0,339
6	σ_b	0,944	-0,311
7	δ	-0,989	-0,006
8	ζ	-0,965	0,058
9	HB	0,982	-0,034

Таким чином, замість залежності

$$Y = F(V, s, t, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9),$$

де $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ – відповідно нормовані значення кількості вуглецю C , марганцю Mn , кремнію Si , хрому Cr в досліджуваному матеріалі та його фізико-механічні властивості $\sigma_t, \sigma_b, \delta, \zeta, HB$, отримано можливість представити вихідні параметри процесу різання як

$$Y = F_1(V, s, t, f_1, f_2).$$

Вказана заміна дозволяє врахувати в отриманій моделі 81,5 % інформації про хімічний склад і фізико-механічні властивості досліджуваного матеріалу (таблиця 5), зменшити кількість експериментів та час на їх проведення, знизити витрати оброблюваного й інструментального матеріалів і енергетичні витрати.

Також, як приклад, що показує ефективність факторного аналізу для зниження розмірності початкового масиву інформації, розглянуто фізико-механічні властивості та хімічний склад низьколегованих конструкційних сталей, що включає загалом 20 різноманітних найменувань. Початковий набір інформації складається із таких компонентів хімічного складу сталей як вуглець C , кремній Si , марганець Mn , хром Cr , нікель Ni , мідь Cu , ванадій V , ніобій Nb , азот N та алюміній Al . Фізико-механічні властивості сталей представлено межею міцності на розрив σ_b , межею текучості σ_t , відносним вздовженням після розриву δ .

Таблиця 5

Власні значення та відповідні їм дисперсії, що визначають інформативність факторів вуглецевих якісних конструкційних сталей

№ фактора	Початкові власні значення			Суми квадратів навантажень вибірки		
	всього	% дисперсії	% накопичення	всього	% дисперсії	% накопичення
1	6,779	75,320	75,320	6,654	73,934	73,934
2	1,020	11,330	86,650	0,689	7,650	81,584
3	0,520	5,778	92,427			
4	0,365	4,057	96,484			
5	0,283	3,150	99,634			
6	0,017	0,193	99,827			
7	0,009	0,100	99,927			
8	0,005	0,050	99,977			
9	0,002	0,023	100,000			

Встановлено, що майже 80 % узагальненої дисперсії доводиться на перші чотири фактори. Таким чином, за допомогою цих латентних змінних можна представити всі початкові параметри низьколегованих конструкційних сталей, використовуючи залежність:

$$x_{li} = a_{i1} * f_{l1} + a_{i2} * f_{l2} + a_{i3} * f_{l3} + a_{i4} * f_{l4}, \quad l = 1, \dots, 20, \quad i = 1, 2, \dots, 13,$$

де a_{ij} – j -те факторне навантаження i -ї властивості матеріалу.

Значення факторних навантажень для кожної властивості досліджуваного матеріалу наведено в таблиці 6.

На рис. 2 наведено графік залежності власних чисел λ кореляційної матриці параметрів низьколегованих конструкційних сталей від номера отриманого фактора (латентної змінної).

Висновки. Застосування методів багатомірного статистичного аналізу, а саме – методів факторного аналізу, як показали наведені приклади, дозволяє значно підвищити інформативність технологічних задач за рахунок використання максимальної сукупності початкових параметрів, спростити їх рішення за рахунок зменшення ознакового простору, скорочення обсягів оброблюваної інформації, скоротити час розв’язання різноманітних технологічних задач, знизити матеріальні та енергетичні витрати на проведення експериментальних досліджень, а також підвищити точність отримуваних рішень.

Таблиця 6

Значення факторних навантажень факторів для низьколегованих конструкційних сталей

№ з/п	Хім. скл., фіз.-мех. вл.	Факторні навантаження			
		a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}
1	C	0,685	0,141	0,047	0,725
2	Mn	0,646	-0,564	0,044	-0,346
3	Si	-0,479	0,021	0,893	-0,012
4	P	-0,351	0,360	-0,327	-0,007
5	Cr	-0,549	0,667	-0,023	0,141
6	Ni	-0,611	0,760	0,037	-0,019
7	Cu	-0,499	0,780	-0,024	-0,122
8	V	0,845	0,372	-0,016	-0,016
9	Nb	0,010	-0,110	-0,174	-0,294
10	N	0,744	0,350	0,032	-0,037
10	σ_t	0,696	0,627	0,208	-0,156
11	σ_b	0,729	0,544	0,306	-0,031
12	δ	-0,325	-0,565	0,104	0,350
13	a_H	-0,147	-0,224	0,622	-0,086

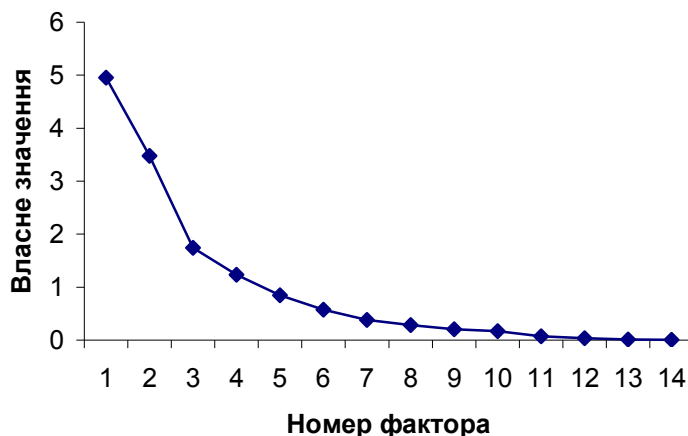


Рис. 2. Графік залежності власного значення λ кореляційної матриці параметрів низьколегованих конструкційних сталей від номера фактора (латентної змінної)

Методика стиснення масивів початкової інформації апробована при розв'язанні різноманітних технологічних задач, за результатами яких можна зробити наступні висновки:

- 1) методам факторного аналізу інформації є характерною математична суворість і закінченість методик;
- 2) запропонована методика факторного аналізу інформації дає можливість зменшити (стиснути) початковий простір у 3...5 разів і скоротити час обчислення з використанням отриманих моделей в 1,5...2 рази;
- 3) використання методів факторного аналізу дозволяє науково обгрунтовано забезпечити розробку нових нормативів з режимів різання матеріалів, що будуть враховувати реальні фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу та його хімічний склад;
- 4) розроблені алгоритми та програми факторного аналізу доцільно включити в підсистему розрахунків режимів різання та нормування процесів обробки матеріалів різанням в якості програмного модуля САПР ТП, який дозволить врахувати всі характеристики оброблюваного та інструментального матеріалів та отримати більш якісні результати технологічного проектування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Лоули Д.Н., Максвелл А.Э. Факторный анализ как статистический метод: Пер с англ. Ю.Н. Благовещенского. – М.: Мир, 1967. – 146 с.
2. Харман Г. Современный факторный анализ: Пер. с англ. – М.: Статистика, 1972. – 488 с.
3. Иберла К. Факторный анализ: Пер с нем. В.М. Ивановой; Предисл. А.М. Дуброва. – М.: Статистика, 1980. – 398 с.
4. Айвазян С.А. Методы анализа данных. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 357 с.
5. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 488 с.
6. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. / В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин; Под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
7. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер с англ. / Дж.О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др.; Под ред. И.С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
8. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика в задачах и упражнениях. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 270 с.
9. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ. (Наука и искусство решения проблем). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – 186 с.
10. Выслоух С.П. Факторный анализ технологической информации // Вестник Харьковского государственного политехнического университета / Машиностроение. – Вып. 100. – Харьков, 2000. – С. 26–29.
11. Выслоух С.П. Применение методов многомерного статистического анализа при решении технологических задач // Материалы двадцать второй ежегодной международной конференции

«Композиционные материалы в промышленности».
1–5 июня. Ялта–Киев. УИЦ «Наука. Техника. Технология». – 2002. – С. 148–150.

ВИСЛОУХ Сергій Петрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри виробництва приладів
Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– технологія різання.

Тел. (роб.): 8 044 454 94 75.

Тел. (дом.): 8 044 402 72 76.

E-mail: vp@users.ntu-kpi.kiev.ua

Подано 24.09.2009