

І.П. Сімінченко, ст. викл.,  
О.В. Малигін, ст. викл.,

Херсонський національно технічний університет

### Багатофакторне статистичне моделювання при дослідженні процесів у технічній обробці металів

*Встановлено залежності зносостійкості ріжучого інструменту від режимів механічної обробки в МОТЗ. Використане багатофакторне математичне моделювання для дослідження складного процесу механічної обробки металу з урахуванням впливу МОТЗ.*

*Для безвідмовної роботи всіх деталей і вузлів на протязі заданого ресурсу треба постійно підвищувати якість продукції машинобудівних підприємств шляхом удосконалення технології механічної обробки деталей машин. При цьому слід враховувати, що розвиток сучасного машинобудування супроводжується освоєнням нових конструкційних, жароміцних і зносостійких сталей і сплавів з високими міцнісними властивостями. В доступній формі висвітлюється теорія перевірки багатофакторних статистичних моделей по основним критеріям якості та приводять приклади її застосування при дослідженні впливу мастильно-охолодних технологічних середовищ (МОТЗ) на процес механічної обробки металів. Представлені результати дослідження закономірностей зміни стійкості металорізального інструмента, енергосилових параметрів при різних режимах і видах механічної обробки в різних МОТЗ. Технологічну ефективність МОТЗ оцінювали на операціях точіння, свердлування й торцевого фрезерування.*

*В експериментах поставлена задача виявити можливий вплив легуючих елементів сталей та їх твердості на ефективність прояву дії полімерної МОТЗ. У всіх випадках вплив створених в зоні різання хімічно активних елементів і, в першу чергу, водню на технологічні процеси, пов'язані із прискоренням високих пластичних деформацій і руйнування матеріалу. У цьому, очевидно, одна з головних причин високої ефективності полімервмісних МОТЗ.*

*Розроблена математична модель експериментальних результатів зносостійкості ріжучого інструменту від параметрів механічної обробки та МОТЗ. Таким чином, проведений аналіз властивостей отриманих математичних моделей необхідно рахувати добрими і моделі можна використовувати для вивчення причинно-наслідкових і структурних зв'язків між факторами і критеріями якості технологічного процесу.*

**Ключові слова:** статистика; обробка металів; перевірка багатофакторних статистичних моделей; оцінка семантичності.

В теперішній час загально визнано, що підняти продуктивність обробки і якість виробів можна не тільки використанням високоєфективного обладнання, інструментів, технологічних процесів, но й застосуванням раціональних марок мастильно-охолодних технологічних засобів (МОТЗ). У процесі обробки МОТЗ охолоджують зону різання, мають змащувальну дію, утворюючи тверді плівки на поверхні інструмента. Крім цього рідини з поверхнево-активними компонентами здатні понизити міцність та зсув тонкого поверхневого шару оброблюваного матеріалу і тим самим полегшити його деформування (ефект П.О. Ребіндера) [1].

Разом з тим слід відмітити, що мастильна дія МОТЗ вивчена недостатньо. В теперішній час навіть відсутній єдиний погляд на природу змащуючу дію МОТЗ і механізм проникнення її у зону різання. Тому експерименти, що проводять студенти по дослідженню впливу МОТЗ на процес механічної обробки металів мають не тільки навчальний, але і науковий характер.

Використання багатофакторного математичного моделювання для дослідження такого складного процесу механічної обробки як різання металу з урахуванням впливу мастильно-охолодних технологічних середовищ орієнтує науковців на використання сучасних методів аналізу причинно-наслідкових і структурних зв'язків, на інтенсивне використання інформаційних систем, побудованих на базі сучасних персональних комп'ютерів.

**Загальна методика регресійного аналізу**

Регресія – залежність середнього значення будь-якої випадкової величини від деякої іншої величини, або декількох величин. Задача регресійного аналізу полягає в будові такої моделі, яка б репрезентувала емпіричні лінії регресії і дала можливість вивчати статистичну залежність не тільки в межах проведеного експерименту, а і для розв'язування задач прогнозування.

Узагальнена багатофакторна лінійна регресивна модель з  $k$  змінними може бути записана у такому вигляді:

$$y_{ul} = b_0 x_{0u} + b_1 x_{1u} + b_2 x_{2u} + \dots + b_k x_{ku} + \varepsilon_{ul} = \sum_{i=0}^k b_i x_{iu} + \varepsilon_{ul}; \quad (1)$$

де  $y_{ul}$  – значення відліку для  $u$ -го сполучення рівней факторів і  $l$  – го повторного дослідження;  $u = 1, 2, \dots, N$ ;  $l = 1, 2, \dots, n$ ;  $N$  – число дослідів в матриці плану експерименту;  $n$  – число дослідів в кожному рядку результатів експериментів;

$b_0, b_1, \dots, b_k$  – математичне сподівання коефіцієнтів регресії, які потрібно оцінити;  $x_0$  – фіктивна незалежна змінна ( $x_0 \equiv 1$ );  $k$  – загальна кількість факторів;

$\varepsilon_{ul}$  – неспостережувана випадкова помилка для  $u$  - го сполучення рівней факторів і  $l$  – го повторного дослідження.  $x_1, x_2, \dots, x_k$  – керовані фактори, виражені у перетворених значеннях натуральних значень  $X_1, X_2, \dots, X_k$  факторів.

Результати спостережень при проведенні дослідів записують у відповідну таблицю 1.

Таблиця 1

Результати спостережень при проведенні дослідів

$Y$	$X_1$	$X_2$	...	$X_i$	...	$X_{k-1}$	$X_k$
$Y_1$	$x_{11}$	$x_{21}$	...	$x_{i1}$			$x_{k1}$
$Y_2$	$x_{12}$	$x_{22}$	...	$x_{i2}$			$x_{k2}$
...	...	...	...	...			
$Y_i$	$x_{1i}$	$x_{2i}$	...	$x_{ii}$			$x_{ki}$
...	...	...	...	...			
$Y_k$	$x_{1k}$	$x_{2k}$	...	$x_{ik}$			$x_{kk}$

Розрахунок невідомих параметрів багатфакторної регресії проводиться за методом найменших квадратів (МНК), тобто мінімізуючи суму квадратів відхилень фактичних даних  $Y_u$ , що одержані з експериментів, від значень  $\hat{y}_u$ , що ми отримуємо з регресійної моделі:

$$\sum_{u=1}^N [Y_u - \hat{y}_u]^2 = \sum_{u=1}^N [Y_u - b_0 + b_1 x_{1u} + \dots + b_k x_{ku}]^2 = Q = \min; \quad (2)$$

Робимо припущення, що кількість повторних дослідів для кожного рядка плану експерименту однакова, тобто  $n_u = n$  і дисперсії відтворюваності  $S_u^2$  однорідні. Якщо кількість дослідів  $n > 1$ , то  $Y_u = \sum_{i=1}^n y_{ui} / n$

Значення  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$  можна знайти, якщо взяти частинні похідні функції  $Q$  по  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ , прівняти їх нулю і розв'язати одержану систему лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial b_0} &= 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial b_1} &= 0; \\ &\dots \dots \dots \\ \frac{\partial Q}{\partial b_k} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

При цьому результат

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \dots + b_k x_k; \quad (4)$$

що знаходиться по визначаємій моделі, у випадку адекватності моделі приблизно дорівнює середньому арифметичному значенню у результатів повторних дослідів, тобто  $y \approx \bar{y}$ , для одних і тих же умов експерименту, що задаються значеннями факторів:

$$Y_1 = x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1k}; \quad Y_2 = x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2k}; \quad \dots, \quad Y_k = x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kk}; \quad (5)$$

На рисунку 1 подано абстрактний приклад у випадку, коли результати експерименту апроксимуються поліномом  $p$  – го порядку.

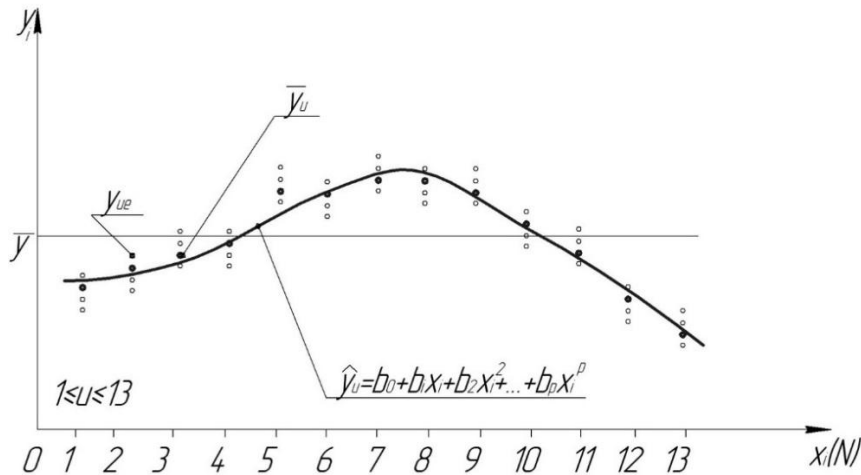


Рис. 1. Апроксимація результатів експериментів багатофакторною регресійною моделлю  $p$ -го порядку [2]

Для прийняття рішення про межі використання побудованої моделі необхідно провести аналіз її властивостей. Необхідна комплексна оцінка, яка дозволяє оцінити статистичні та споживачькі властивості моделі в повному обсязі. Перелічимо найбільш важливі критерії якості, які потрібно перевірити та оцінити після початкового та кінцевого формування багатофакторної математичної моделі [2, 3].

Отримання інформативної підмножини головних ефектів і взаємодій факторів.

Забезпечення максимально високої теоретичної ефективності одержання корисної інформації з вихідних даних.

Перевірка на статистичну значимість отриманої математичної моделі .

Перевірка передумов про властивості випадкових похибок, які входять до результатів експериментів.

Перевірка на адекватність (відповідність, правильність) одержаної моделі

Перевірка на інформативність.

Перевірка на стійкість коефіцієнтів математичної моделі.

Перевірка фактичної ефективності добування корисної інформації з початкових даних.

Перевірка правильності опису (фізичної несуперечливості) одержаної математичної моделі по всій області моделювання.

Оцінка семантичності (інформаційної) по одержаним коефіцієнтам математичної моделі.

Перевірка властивостей залишків  $e_{u,\varepsilon} = y_{u,\varepsilon} - \hat{y}_u$ .

Загальна оцінка властивостей одержаної математичної моделі .

По результатам багатофакторного моделювання можна зробити наступні висновки:

Усі отримані математичні моделі максимально стійкі, тобто  $\text{cond}=1$ .

Перевірка на адекватність отриманих математичних моделей показала, що всі вони адекватні. Для більшості моделей  $S_{ad}^2 < S_{відм}^2$ . Перевірка проводилася з використанням F-відношення у вигляді:

$$F_{fвідм;fad}^{експ} = S_{відм}^2 / S_{ad}^2 \leq F_{\alpha; fвідм;fad}^{крит} \quad (5)$$

Коефіцієнти кореляції R для отриманих моделей мають значення 0,9142...0,9973, всі коефіцієнти R статистично значимі. Їх перевірка за критерієм Бокса і Веца показала, що інформативність моделей добра, висока та дуже висока. Таким чином, проведений аналіз властивостей отриманих математичних моделей необхідно рахувати добрими і моделі можна використовувати для вивчення причинно-наслідкових і структурних зв'язків між факторами і критеріями якості технологічного процесу. Тобто проведені розрахунки дозволяють зробити наступні висновки:

1. Всі досліджувані режими різання – S, V, t, а також d свердла та Mкр для трьох груп сталей, статистично значимо впливають на критерії якості ET, EП, EP.

2. Вплив факторів виявляється на рівні головних ефектів – лінійних x1, x2 та квадратичних z1, z2. Взаємодія факторів виявляється тільки в одній з одинадцяти моделей виду x1, x2.

#### Список використаної літератури:

1. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К. : Лыбидь, 1991. – 240 с.

2. Радченко С.Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей : монография / С.Г. Радченко. – К. : Санепарель, 2005. – 504 с.
3. Радченко С.Г. Математические моделирования технологических процессов в машиностроении / С.Г. Радченко. – К. : Укрспецмонтажпроект, 1998. – 274 с.
4. Лапач С.М. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем : методичні вказівки для студентів / Укл. С.М. Лапач, С.Г. Радченко, Р.В. Галайда. – К. : НТУУ КПІ, 2007. – 116 с.
5. Сошко А.И. Физико – химическая механика обработки твердых тел в полимерсодержащих СОТС. Свойства конструкционных материалов при воздействии рабочих сфер / А.И. Сошко. – Киев : Наук. Думка, 1980. – 332 с.
6. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1969. – 288 с.
7. Грановский Г.Н. Трение и износ при резании металлов / Г.Н. Грановский. – М. : Малигиз, 1955. – С. 14.
8. Сошко А.И. Полимеросодержащие СОТС / А.И. Сошко. – К. : Каменяр, 1986. – 55 с.
9. Точность производства в машиностроении и приборостроении / под ред. А.Н. Гаврилова. – М. : Машиностроение, 1973. – 567 с.
10. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К. : Техника, 1975. – 168 с.

#### References:

1. Yakimov, A.V., Slobodyanik, P.T. and Usov, A.V. (1991), *Teplofizika mekhanicheskoi obrabotki*, Lybid', K., 240 p.
2. Radchenko, S.G. (2005), *Ustoichivye metody otsenivaniya statisticheskikh modelei*, monografiya, PP Saneparel', K., 504 p.
3. Radchenko, S.G. (1998), *Matematicheskie modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii*, Ukrspetsmontazhprouekt, K., 274 p.
4. Lapach, S.M., Radchenko, S.G. and Galaida, R.V. (2007), *Matematichne modelyuvannya ta optimizatsiya tekhnologichnikh sistem*, metodichni vkazivki, NTUU «KPI», K., 116 p.
5. Soshko, A.I. (1980), *Fiziko – khimicheskaya mekhanika obrabotki tverdykh tel v polimersoderzhashchikh SOTS. Svoistva konstruktivnykh materialov pri vozdeystviy rabochikh sfer*, Nauk. Dumka, Kiev, 332 p.
6. Reznikov, A.N. (1969), *Teplofizika rezaniya*, Mashinostroenie, M., 288 p.
7. Granovskii, G.N. (1955), *Trenie i iznos pri rezanii metallov*, Maligiz, M., P. 14.
8. Soshko, A.I. (1986), *Polimerosoderzhashchie SOTS*, Kamenyar, K., 55 p.
9. In Gavrilova, A.N. (ed.) (1973), *Tochnost' proizvodstva v mashinostroenii i priborostroenii*, Mashinostroenie, 567 p.
10. Vinarskii, M.S. and Lur'e, M.V. (1975), *Planirovanie eksperimenta v tekhnologicheskikh issledovaniyakh*, Tekhnika, K., 168 p.

**Сімінченко** Ігор Павлович – старший викладач кафедри системтехнологій та менеджменту виробництва Херсонського національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– інженерія.

Тел.: (050) 728–73–14.

E-mail: igor@kntu.net.ua.

**Малигін** Олександр Васильович – старший викладач кафедри системтехнологій та менеджменту виробництва Херсонського національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– програмування.

Тел.: (093) 848–10–34.

E-mail: azov192@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2017.